МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Ким Александра Сергеевна

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИНЕЙКИ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ P/P$^+$-SI

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н Юрчук Сергей Юрьевич

Москва - 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ... 4
РАЗДЕЛ 1. Аналитический обзор литературы ... 10
1.1 Физические принципы работы ЛФД ... 10
1.1.1 Коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок ... 10
1.1.2 Коэффициент лавинного умножения ... 14
1.1.3 Механизм формирования лавины в ЛФД ... 18
1.2 ЛФД с раздельными областями поглощения и умножения ... 20
1.3 Инерционность ЛФД с раздельными областями поглощения и умножения ... 23
1.4 Особенности технологии изготовления ЛФД ... 26
1.5 Архитектура и топология существующих массивов ЛФД ... 28
1.5.1 ЛФД на основе GaN ... 28
1.5.2 ЛФД на основе Al0,2Ga0,8As ... 32
1.5.3 ЛФД на основе Hg0,78Cd0,22Te ... 35
1.5.4 ЛФД на основе Si ... 39
1.5.4.1 S8550-02 ... 39
1.5.4.2 SAH1L12 ... 41
1.6 Выводы по разделу 1 ... 42
РАЗДЕЛ 2. АРХИТЕКТУРА, ТОПОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ... 44
2.1 Определение архитектуры и топологии линейки ЛФД ... 44
2.2 Пленки Al_2O_3 для пассивации SiO_2 ... 49
2.1.1 Изготовление образцов ... 50
2.1.2 Исследование образцов ... 52
2.1.3 Применимость в технологиях изготовления фотодиодных структур ... 55
2.3 Быстрый термический отжиг ... 57
2.3.1 Применимость в технологиях изготовления диодных структур ... 59
2.3.1.1 Изготовление образцов ... 59
2.3.1.2 Исследование образцов ... 62
2.3.2 Применимость в технологиях изготовления фотодиодных структур ... 64
2.3.2.1 Изготовление образцов ... 64
2.3.2.2 Исследование образцов ... 65
2.4 Выводы по разделу 2 ... 66
РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ... 68
3.1 Режимы технологических процессов и операций ... 73

3.1.1 Химическая обработка ... 73
3.1.2 Фотолитография ... 78
3.1.3 Жидкостное травление ... 96
3.1.4 Термические процессы ... 107
3.1.5 Ионная имплантация ... 112
3.1.6 Напыление металлизации ... 115
3.1.7 Пооперационный технологический контроль ... 116
3.2 Изготовление ... 131
3.3 Уточнение режимов термических процессов ... 136
3.4 Маршрут изготовления ... 143
3.5 Статистическая оценка возможностей технологических процессов ... 146
3.4.1 Фотолитография ... 150
3.4.2 Жидкостное травление ... 152
3.4.3 Термические процессы ... 153
3.4.4 Напыление металлизации ... 155
3.6 Технологическая документация ... 157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 184
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ... 186
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ... 189
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА ... 197
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Акт внедрения ... 203

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Лавинные фотодиоды представляют собой класс полупроводниковых приборов, обладающих рядом ключевых характеристик, таких как высокое быстродействие, большое усиление сигнала, высокие квантовая эффективность и отношение сигнала к шуму. Благодаря этому подобные фоточувствительные структуры, а также массивы из них различной конфигурации, нашли широкое распространение для регистрации падающего излучения малой интенсивности. К наиболее перспективным областям применения относят дальнометрию и лазерное сканирование. Применение массивов ЛФД в лазерных средствах дальнометрирования позволяет производить измерения дальности и угловых координат объектов наблюдения. При этом расстоянии до объекта может определяться либо за счет измерения временной задержки отраженного от объекта импульса, либо за счет измерения разности фаз модулируемого и отраженного сигналов. В частности, массивы ЛФД в составе лазерных локаторов обеспечивают безопасное для маневра уклонения расстояние между мелкими препятствиями и летательным аппаратом с высокой скоростью и низкой высотой полета, а в составе следящих бортовых систем осуществляют ведение наблюдения за дальними объектами в условиях плохой видимости. Также известно применение в оптико-механических устройствах сканирования авиационной лазерной аппаратуре воздушной съемки местности, в дефектоскопии и томографии в составе сцинтиэлектронных детекторов в рентгеновских сканерах, что в неменьшей степени обуславливает значимость и высокий спрос на данный тип твердотельных фотопреобразователей.

При этом несмотря на существование общепринятых принципов выстраивания производственной линии для изготовления многих типов твердотельных фотопреобразователей разработка новых технологий изготовления зачастую является необходимым требованием для создания устойчивого производства. В первую очередь это связано с разнообразием известных методов и устанавливаемых ими технологических процессов и операций для полупроводниковой промышленности фотоэлектронных устройств, а также ощутимым влиянием применяемого оборудования, его технологических ограничений и используемых материалов на фактический выход годных. По этой причине удовлетворение высокого спроса на конкретные фотоприемные устройства требует проведения работ по определению набора технологических процессов и операций, последовательности из них и оптимальных операционных режимов, позволяющих получить заданную фоточувствительную структуру на имеющейся технологической и производственной базе, а также организации технологической подготовки производства.

В данной диссертационной работе представлены результаты работ по определению топологии и архитектуры линейки ЛФД для длины волны 0,85 мкм на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости, входящих в маршрут изготовления фоточувствительного кристалла технологических процессов и операций, операционных режимов их проведения и признаков годности, а также статистической оценки возможностей установленных технологических процессов в рамках маршрута изготовления.

Цель работы

Разработать технологию изготовления кристалла линейки лавинных фотодиодов для длины волны 0,85 мкм на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости. Технология должна быть жизнеспособна и устойчива для производственной линии кремниевых изделий микроэлектроники.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. определить топологию и вертикальную архитектуру фоточувствительного кристалла;
2. составить эскизный маршрут изготовления фоточувствительного кристалла;
3. произвести поиск технологических решений и изучить влияние их внедрения в маршрут изготовления на характеристики получаемого фоточувствительного кристалла;
4. определить способ пассивации изолирующей пленки SiO_2 на подложке высокоомного кремния *p*-типа проводимости для предотвращения образования канала инверсного типа проводимости в приповерхностной области подложки и снижения электрической взаимосвязи планарно расположенных фоточувствительных элементов;
5. определить способ снижения уровня темновых токов фоточувствительных элементов на основе кремния *p*-типа проводимости;
6. определить оптимальные операционные параметры проведения технологических процессов и операций химической обработки, фотолитографии, жидкостного травления, ионной имплантации, а также термодиффузионных процессов и процессов формирования диэлектрических слоев для получения фоточувствительного кристалла с заданными характеристиками;
7. сформулировать признаки годности на этапах изготовления фоточувствительного кристалла;
8. провести статистическую оценку возможностей технологических процессов в рамках маршрута изготовления фоточувствительного кристалла;
9. составить эскизную технологическую документацию в виде операционных карт на технологические процессы и операции, применяемые в рамках маршрута изготовления фоточувствительного кристалла.

Научная новизна

1. Проведено исследование электрофизических свойств пленки Al_2O_3, полученной методом ВЧ-катодного распыления, и определен потенциал ее применения в качестве дополнительного пассивирующего слоя в фотодиодных структурах на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости. Установлено, что применение Al_2O_3 позволяет стабилизировать зарядовые свойства на границе раздела SiO_2/*p*-Si за счет наличия встроенного отрицательного заряда и таким образом снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов, а также повысить сопротивление изоляции планарно расположенных фоточувствительных площадок в многоэлементных структурах.

2. Проведено исследование влияния низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на удельное контактное сопротивление диодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости. Установлено, что применение процесса в маршруте изготовления кремниевых диодов позволяет снизить их последовательное сопротивление посредством минимизации вклада контактного сопротивления за счет образования низкотемпературных силицидов титана.

3. Проведено исследование влияния низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на уровень темновых токов фотодиодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости. Установлено, что применение процесса в маршруте изготовления кремниевых фотодиодов позволяет снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов.

4. Разработана топология и планарная технология изготовления кристалла линейки лавинных фотодиодов с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм, площадь каждого фоточувствительного элемента которой соответствует 0,12 мм^2.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Выявлено положительное влияние низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на удельное контактное сопротивление диодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости вследствие образования низкотемпературных силицидов титана. На примере серийно выпускаемого ограничительного диода p^+-*n* на основе кремния с малой площадью контакта, равной 0,002 мм^2, определены оптимальные температура и длительность процесса и показано повышение выхода годных кристаллов на 15 % за счет улучшения последовательного сопротивления изготовленных диодов.

2. Обнаружено положительное влияние низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на уровень темновых токов фотодиодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости посредством стабилизации оборванных Si-связей, а именно их насыщения водородом. На примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p*-*i*-*n* фотодиода определены

оптимальные температура и длительность процесса и показано повышение выхода годных кристаллов на 15 % за счет улучшения уровня темновых токов фоточувствительных площадок и охранного элемента.

3. В фотодиодных структурах на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости зачастую наблюдается образование инверсного канала, электрически связывающего планарно расположенные фоточувствительные элементы. Изучены свойства пленки Al_2O_3, полученной методом ВЧ-катодного распыления, в качестве слоя, стабилизирующего зарядовые свойства границы раздела SiO_2/*p*-Si за счет наличия встроенного отрицательного заряда. На примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p-i-n* фотодиода на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости определена толщина пленки Al_2O_3, достаточная для пассивации встроенного положительного заряда в изолирующей пленке SiO_2 толщиной 0,18 мкм, и равная 0,14 мкм, и показано повышение выхода годных кристаллов на 18 % за счет улучшения как уровня темновых токов фоточувствительных площадок и охранного элемента, так и повышение сопротивления изоляции между фоточувствительными площадками.

4. Разработана топология кристалла линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм, содержащая области карманов и периферийные стоп-области p^+-типа проводимости, фоточувствительные площадки n^+-типа проводимости, стоп-области *p*-типа проводимости между фоточувствительными элементами, контактные окна к фоточувствительным площадкам, металлизацию, фотолитографические метки для совмещения слоев и метки для монтажа кристалла в корпус.

5. Разработана планарная технология изготовления кристалла линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм, позволяющая получить фоточувствительную структуру со следующими усредненными фотоэлектрическими параметрами на рабочей длине волны: $U_{прокол}$ = 50,6 В; $U_{при\ M=100}$ = 137,8 В; $M_{макс}$ = 190; $U_{макс}$ = 180 В; I_T = (4–12) нА.

6. Разработаны эскизные операционные карты технологических процессов и операций, входящих в маршрут изготовления кристалла линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм.

Положения, выносимые на защиту

1. Низкотемпературный импульсный отжиг в среде H_2 позволяет снизить удельное контактное сопротивление диодных структур и снизить уровень темновых токов фотодиодных структур на основе *p*-Si;

2. Предложен способ формирования омических контактов к кремнию на основе двухслойной металлизации Ti/Au посредством проведения низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с;

3. Предложен способ снижения уровня темновых токов многоэлементных фотодиодных структур на основе *p*-Si посредством проведения низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с;

4. Дополнительная пассивация пленкой Al_2O_3, полученной методом ВЧ-катодного распыления, способна предотвратить образование инверсного канала в многоэлементных фотодиодных структурах на основе высокоомного *p*-Si и повысить сопротивление изоляции между фоточувствительными элементами.

5. Предложена топология и планарная технология изготовления кристалла линейки ЛФД, состоящая из 12 фоточувствительных элементов, на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием сертифицированного технологического оборудования, изготовлением достаточного количества экспериментальных партий фоточувствительных кристаллов и применением известных методик характеризации параметров ЛФД для получения правдивых сведений. Кроме того, была проведена статистическая оценка возможностей ряда технологических процессов, допускающая их внедрение в мелкосерийное производство с установленными оптимальными операционными режимами. Также достоверность результатов подтверждается имеющимися публикациями в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, представлением результатов на конференциях и наличием акта внедрения ряда технических предложений по проведению низкотемпературных отжигов в инертной среде и осуществлению пооперационного технологического контроля при изготовлении приборов электронной техники в организации ООО «Динамические системы».

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных конференциях, таких как XI научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство» и XXVI международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения.

Публикации

По материалам диссертационного исследования опубликовано 5 статей, из которых 3 опубликованы в индексируемых ВАК и Scopus журналах, входящих в рекомендуемый список изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на

соискание ученой степени, 2 статьи опубликованы в сборниках материалов научно-практической конференции и международной научно-технической конференции, также получены 3 патента, из которых 1 патент на полезную модель, 1 патент на топологию интегральной микросхемы и 1 патент на изобретение.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в планировании и проведении изысканий по теме диссертационного исследования, включая операторскую реализацию ряда технологических процессов и операций химической обработки, фотолитографии и технологического пооперационного контроля, определение оптимальных параметров входящих в маршрут изготовления кристалла линейки ЛФД технологических процессов и операций, необходимых для получения заданных параметров и выполнения поставленных задач, а также характеризацию электрофизических параметров изготовленных фоточувствительных структур.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 203 страницах и содержит 98 рисунков, 31 таблиц, 43 формулы и 1 приложение. Список используемой литературы включает 105 источник.

РАЗДЕЛ 1. Аналитический обзор литературы

1.1 Физические принципы работы ЛФД

В основе принципа работы лавинного фотодиода лежит преобразование падающего оптического излучения в электрический сигнал и усиление величины фототока, что достигается за счет многократной ударной ионизации носителей заряда в области объемного заряда *p-n* перехода при подаче напряжения на фоточувствительный элемент, величина которого близка к напряжению пробоя структуры.

Для более детального понимания принципа работы необходимо рассмотреть физические явления, протекающие в лавинных фотодиодах, чему и посвящен данный раздел.

1.1.1 Коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок

В сильных электрических полях, характеризуемых приближением дрейфовой скорости носителей тока в полупроводнике к скорости звука, средняя скорость носителей заряда начинает резко отличаться термодинамически равновесные величины. При этом дрейфовая скорость носителей перестает зависеть от напряженности электрического поля и стремится к насыщению, приближаясь к значениям, определяемым следующей формулой (1):

$$v_s = \sqrt{\frac{8 \cdot \xi_ф}{3 \cdot \pi \cdot m^*}}, \quad (1)$$

где v_s – скорость насыщения, диапазон значений которой соответствует (6–20)·10^6 см·$с^{-1}$;

$\xi_ф$ – энергия оптического фонона;

m^* – эффективная масса носителей заряда.

Дальнейшее увеличение напряженности электрического поля приводит к тому, что кинетическая энергия носителей заряда, скорость которых достигла насыщения, продолжает увеличиваться за счет увеличения их эффективной массы. Известно, что при комнатной температуре скорость насыщения в Ge равна 6·10^6 см·$с^{-1}$. Достижение скорости насыщения обеспечивается при напряженностях электрического поля $E \geq (2–3)\cdot 10^3$ В·$см^{-1}$ и $E \geq 10^4$ В·$см^{-1}$ –

для электронов и дырок, соответственно [1]. Аналогичные значения напряженности электрического поля в кремнии, равные $E \geq (2–3)\cdot 10^4$ В·см$^{-1}$ и $E \geq 5\cdot 10^4$ В·см$^{-1}$, достаточны для достижения носителей заряда скорости насыщения, равной 10^7 см·с$^{-1}$ [2].

При последующем увеличении напряженности электрического поля нагретые им свободные носители заряда претерпевают ударную ионизацию. Выделяемая при этом неупругом соударении горячих электрона или дырки с атомом решетки энергия является достаточной для перехода нового валентного электрона в зону проводимости [3]. Вследствие этого каждый акт ударной ионизации приводит к возникновению свободной электронно-дырочной пары заместо одного носителя, вызвавшего ударную ионизацию. Таким образом, в области пространственного заряда (ОПЗ) появляется три свободных носителя, которые в свою очередь ускоряются электрическим полем. Последовательные акты ударной ионизации и определяют лавинное умножение.

Лавинное умножение в первую очередь определяется основными параметрами ударной ионизации, а именно пороговыми значениями ионизации и коэффициентами ударной ионизации α и β носителей обоих типов проводимости. Пороговые значения ионизации электронов и дырок обозначаются как ξ_n и ξ_p, коэффициенты ударной ионизации – α и β, соответственно. Первостепенно коэффициенты ударной ионизации определяются зонной структурой полупроводника, а именно его запрещенной зоной [4].

Пороговая энергия ионизации носителя заряда, ξ_n или ξ_p, характеризует минимальную энергию, необходимую для ударной ионизации. В случае параболических валентной зоны и зоны проводимости пороговая энергия ионизации соответствует формулам (2) и (3):

$$\xi_n = \triangle \xi_g \cdot \left(1 + \frac{m_n^*}{m_n^* + m_p^*}\right), \tag{2}$$

$$\xi_n + \xi_p = \triangle \xi_g \cdot \left(1 + \frac{m_n^*}{m_n^* + m_p^*}\right) + \triangle \xi_g \cdot \left(1 + \frac{m_p^*}{m_p^* + m_p^*}\right) = 3 \triangle \xi_g \tag{3}$$

где $\triangle \xi_g$ – ширина запрещенной зоны полупроводника;

m_n^* – эффективная масса электрона;

m_p^* – эффективная масса дырки.

Коэффициенты ударной ионизации электронов α и дырок β определяют величины, обратно пропорциональные их средним длинам ионизации. При этом принимается локальное приближение, т. е. область полупроводника, в которой напряженность электрического поля остается постоянной, достаточно протяженная, чтобы коэффициенты ионизации в ней

находились в динамическом равновесии [1]. При таком приближении α и β могут быть определены как число актов ионизации одним носителем на единичном пути пробега.

В полупроводниках длины ионизации $1/\alpha$ и $1/\beta$ резко уменьшаются с ростом электрического поля. Однако даже в условиях сильных полей они обычно остаются больше длины свободного пробега носителей заряда. Рассеяние горячих носителей заряда приводит к их изменению энергии и импульса, а также увеличивает длины ионизации по сравнению с их баллистическими пределами, соответствующими ξ_n/qE и ξ_p/qE.

Для полупроводников, имеющих ширину запрещенной зоны порядка или более 0,5 эВ, в число которых входит и кремний, основными механизмами рассеяния при лавинном умножении являются междолинное рассеяние на продольных оптических и акустических фононах. При рассеянии на оптических фононах энергия носителя заряда изменяется на величину энергии фотона $\xi_{\phi,}$ при этом волновой вектор меняется неизотропно [5]. По некоторым оценкам частота фононных столкновений в сильных полях электрических полях больше или равно 10^{14} $с^{-1}$.

В случае узкозонных полупроводников определяющими механизмами рассеяния являются рассеяние, обусловленное пространственными флуктуациями электростатического потенциала в сплавах, и рассеяние на полярных оптических фононах [6].

Скорость генерации электронно-дырочных пар в области объемного заряда при лавинном умножении в постоянном электрическом поле описывается формулой (4):

$$g = \alpha \cdot n \cdot v_n + \beta \cdot p \cdot v_p \approx (\alpha \cdot n + \beta \cdot p) \cdot v_s, \quad (4)$$

где n – концентрация электронов;

p – концентрация дырок;

v_n – дрейфовая скорость электронов, равная или близкая к скорости насыщения;

v_p – дрейфовая скорость дырок, равная или близкая к скорости насыщения;

Коэффициенты ударной ионизации экспериментально определяются в достаточно протяженных областях лавинного умножения с постоянным электрическим полем, и в этих условиях их значения характеризуются исключительно значением поля, а не особенностями его пространственного распределения [7].

Первым рассчитал коэффициент ударной ионизации для электронов α в приближении, что приобретаемая электроном в электрическом поле энергия на длине свободного пробега между соударениями с фононами значительно больше энергии фонона, в 1954 году П.А. Вольф. Для этого случая коэффициент ударной ионизации для электронов зависит от напряженности электрического поля по следующей формуле (5) [8]:

$$\alpha = \frac{q \cdot E}{\xi_n} \cdot exp\left(-\frac{3 \cdot \xi_ф \cdot \xi_n}{(q \cdot E \cdot \lambda)^2}\right), \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля;

$\xi_ф$ – энергия фонона;

λ – длина свободного пробега электрона.

В 1961 году В. Шокли рассмотрел модель, в которой потери энергии при столкновении носителей заряда с фононами сравнимы с энергией, приобретаемой ими на длине свободного пробега. В этом случае необходимую для ударной ионизации энергию приобретают только баллистические носители, которые случайным образом избегают столкновений. Тогда зависимость коэффициента ударной ионизации для баллистических электронов зависит от напряженности электрического поля по следующей формуле (6) [8]:

$$\alpha = \frac{q \cdot E}{\xi_n} \cdot exp\left(-\frac{\xi_n}{q \cdot E \cdot \lambda}\right). \quad (6)$$

В обоих рассмотренных случаях коэффициенты ударной ионизации являются резкими функциями напряженности электрического поля. Далее З.С. Грибников выявил, что в полупроводниках с двумя долинами и различными эффективными массами, баллистический режим ударной ионизации наблюдается и при значительно больших напряженностях электрического поля [8].

В 1962 году Г.А. Барафф объединил оба подхода в теории, успешно описывающей полевые зависимости коэффициентов ударной ионизации в германии, кремнии и других полупроводниках. Им было установлено, что в большинстве случаев коэффициенты ударной ионизации экспоненциально зависят от обратного поля при относительно малых напряженностях электрического поля, а в условиях сильных полей показатель экспоненты пропорционален E^{-2}. При этом в слабых полях коэффициенты ударной ионизации в значительной степени определяются фононным рассеянием и отличаются друг от друга. Одновременно с этим, за счет температурной зависимости интенсивности рассеяния носителей заряда на фононах наблюдается и сильная зависимость коэффициентов ударной ионизации от температуры. В сильных полях значения коэффициентов ударной ионизации для разных носителей заряда сближаются [8].

На рисунке 1 приведены зависимости коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок в кремнии от обратной напряженности электрического поля, которые описываются формулами (7) и (8) [8]:

$$\alpha(E) = 3{,}8 \cdot 10^6 \cdot exp\left(-1{,}75 \cdot \frac{10^6}{E}\right), \quad (7)$$

$$\beta(E) = 2{,}25 \cdot 10^7 \cdot exp\left(-3{,}26 \cdot \frac{10^6}{E}\right). \quad (8)$$

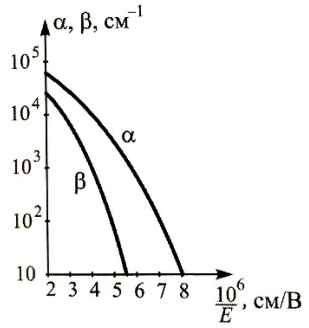


Рисунок 1 – Зависимости коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок для кремния при 300 К

При этом коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок для кремния в электрических полях с напряженностью меньше и при комнатной температуре оказываются значительно выше, а их отношение достигает значений в диапазоне (30–50) и более.

1.1.2 Коэффициент лавинного умножения

Коэффициент стационарного лавинного умножения M является одним из важных параметров лавинных фотодиодов. В общем случае методика расчета коэффициента умножения сложна, поскольку определяется обратными связями в двухсторонней лавине, когда участвуют оба типа носителей. По этой причине примем локальное приближение. Предположим, что все электроны, находящиеся в данной точке области пространственного заряда, имеют одинаковую вероятность ударной ионизации, зависящей только от локальной напряженности электрического поля, а коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок находятся в динамическом равновесии [9]. Данное локальное приближение обосновано для расчета основных характеристик ЛФД на основе кремния и германия, а также лавинных *p-i-n* фотодиодов с протяженной областью умножения.

На рисунке 2 представлены схема области умножения и распределение дырочного и электронного токов вдоль этой области.

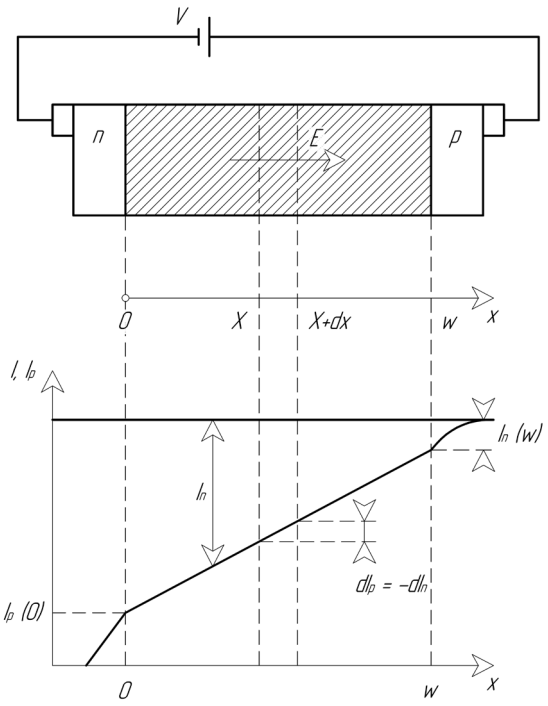


Рисунок 2 – Область умножения и распределение дырочного и электронного токов вдоль нее

В соответствии с рисунком 2 предположим, что в точке $x = X$ образовалась электронно-дырочная пара. При этом действие электрического поля в области объемного заряда инициирует движение электронов влево. Примем *M(X)* в качестве среднего числа электронно-дырочных пар, генерируемых и разделяющихся по всей области объемного заряда в результате образования первичной пары в точке $x = X$. Тогда *M(X)* может быть определено в интегральной форме формулой (9) [1]:

$$M(X) = 1 + \int_0^X \alpha(x)M(x)dx + \int_X^\omega \beta(x)M(x)dx, \quad (9)$$

где ω – толщина области умножения.

При движении электрона влево из точки $x = X$ за счет ударной ионизации на длине, равной *dx*, создается $\alpha(x)dx$ электронно-дырочных пар. Аналогично для дырки создается $\beta(x)dx$ электронно-дырочных пар. Поскольку все акты генерации равнозначны, то каждая новая пара приводит к разделению в области умножения еще *M(x)* пар.

Исходя из формулы (9), дифференциальное уравнение для *M(x)* будет иметь следующий вид по формуле (10):

$$\frac{dM(X)}{dX} = \big(\alpha(X) - \beta(X)\big) \cdot M(X), \quad (10)$$

общее решение которого имеет вид по формуле (11):

$$M(X) = C \cdot exp\left(\int \left(\alpha(X) - \beta(X)\right)M(X)\right), \tag{11}$$

Приняв постоянную интегрирования в виде коэффициента умножения в частном случае генерации первичной пары на одной из границ области умножения и обозначив *M(x = ω)* за *M(x)*, получаем соотношение (11) в виде формулы (12):

$$M(X) = M(\omega)exp\left\{-\int_X^{\omega}\left(\alpha(X`) - \beta(X`)\right)dX`\right\}. \tag{12}$$

Полагая $x = \omega$ из формул (9) и (11), получаем соотношение для M в частном случае генерации первичной электронно-дырочной пары на правой границу области умножения по формуле (13):

$$M(\omega) = \frac{1}{1 - \int_0^{\omega}\alpha(X)exp\left\{-\int_X^{\omega}\left(\alpha(X`) - \beta(X`)\right)dX`\right\}dX}. \tag{13}$$

Подстановка выражения (13) в (12) позволяет получить формулу для координатной зависимости коэффициента лавинного умножения (14):

$$M(X) = \frac{exp\left\{-\int_X^{\omega}\left(\alpha(x) - \beta(x)\right)dx\right\}}{1 - \int_0^{\omega}\alpha(x)exp\left\{-\int_X^{\omega}\left(\alpha(x`) - \beta(x`)\right)dx`\right\}dx}. \tag{14}$$

Таким образом, за счет обратных связей в двухсторонней лавине коэффициент умножения носителей, локально инжектированных в область объемного заряда вблизи произвольного сечения *X*, зависит от коэффициентов ионизации электронов и дырок вдоль всей области умножения.

Далее рассмотрим некоторые важные частные случаи, встречающиеся на практике.

Первый случай. Примем коэффициенты ионизации электронов и дырок вдоль всей области объемного заряда равными между собой [5], тогда выражение (14) упрощается к виду формулы (15):

$$M(X) = \frac{1}{1 - \int_0^{\omega} \alpha(X)dX}. \quad (15)$$

В данном случае в лавине проявляется в большей степени положительная обратная связь, и коэффициент лавинного умножения не зависит от места образования первичной электронно-дырочной пары в области умножения. Если при этом коэффициенты ударной ионизации окажутся постоянными при всех значениях *X*, то коэффициент умножения оказывается равным по формуле (16):

$$M(X) = \frac{1}{1 - \alpha \cdot \omega}. \quad (16)$$

Это реализуется в лавинных *p-i-n* фотодиодах, в которых область объемного заряда практически совпадает с областью умножения. В этой ситуации лавинный пробой *p-n* перехода имеет резкий вид и происходит при возрастании напряженности электрического поля до значений, при которых коэффициенты ионизации достигают величины *1/ω*.

Второй случай. Если в области умножения размножаются только дырки, то из формулы (13) получаем формулу (17):

$$M(X) = exp\left\{\int_X^{\omega} \beta(X)dX\right\}. \quad (17)$$

Если коэффициент ударной ионизации для дырок постоянен вдоль всей области умножения, то коэффициент умножения принимает вид по формуле (18):

$$M(X) = exp\{\beta(\omega - X)\}. \quad (18)$$

Если генерация дырок в области умножения происходит при $x = 0$ или если дырки инжектируются в область лавинного умножения из n-области, коэффициент лавинного умножения достигает максимального значения. Пробой в этом случае носит плавный характер и им легче управлять с помощью смещения в сравнении с первым случаем.

Третий случай. Если в области умножения размножаются только электроны, то из формулы (13) получаем формулу (19):

$$M(X) = \frac{exp\{-\int_X^\omega \alpha(X)dx\}}{1 - \int_0^\omega \alpha(X)exp\{-\int_X^\omega \alpha(X)dX\}dX}. \quad (19)$$

Четвертый случай. Если коэффициенты ионизации вдоль всей области остаются постоянными, выражение коэффициента умножения соответствует формуле (20):

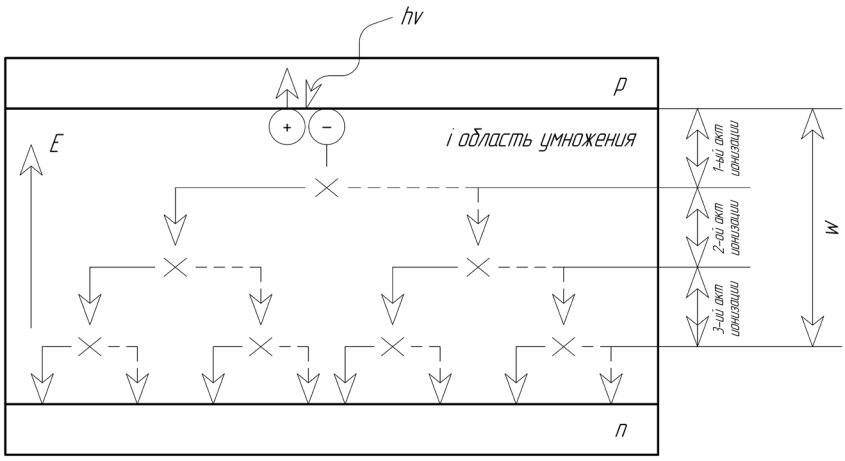
$$M(X) = \frac{(\alpha - \beta) \cdot exp\{(\alpha - \beta)X\}}{\alpha - \beta \cdot exp\{(\alpha - \beta)\omega\}} = \frac{(1 - k) \cdot exp\{(1 - k)\alpha X\}}{1 - k \cdot exp\{(1 - k)\alpha\omega\}}, \quad (20)$$

где $k = \frac{\beta}{\alpha} = const$, как в лавинных *p-i-n* фотодиодах.

1.1.3 Механизм формирования лавины в ЛФД

Для понимания механизма формирования лавины в ЛФД рассмотрим два предельных случая: формирование односторонней и двусторонней лавин.

Односторонняя лавина инициируется одним типом носителей заряда. На рисунке 3 показано развитие лавины на примере размножения только электронов, при этом для всех актов ионизации длины ионизации одинаковы, т. е. $\alpha = const$, $\beta = 0$. Инжекция первичных электронов в область умножения происходит из области *p*-типа проводимости. Электрон, двигаясь к области *n*-типа проводимости под действием электрического поля, после пролета длины ионизации, равной $1/\alpha$, претерпевает акт ударной ионизации. Таким образом, количество актов ионизации соответствует $n = \alpha/\omega$. На рисунке 3 $n = 3$. На втором и третьем актах ударной ионизации к первичному электрону добавляются рожденные в предыдущих актах вторичные электроны. При этом происходит образование и вторичных дырок, дрейфующих к области *p*-типа проводимости.



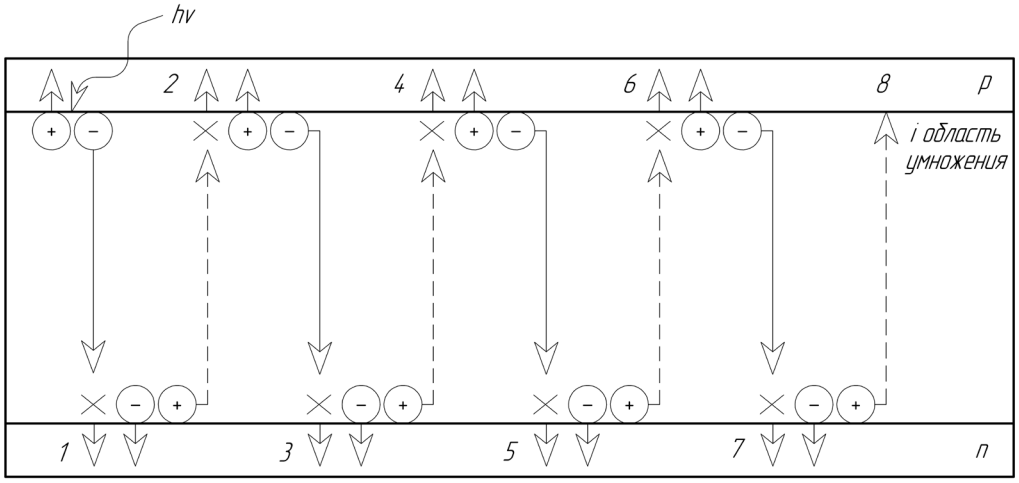
Сплошная линия – траектория ударного электрона;
штриховая линия – траектория вторичного электрона.
Рисунок 3 – Развитие односторонней лавины

В рассматриваемом случае односторонней лавины коэффициент умножения первичного электрона M равен $2^n = 2^3 = 8$. С учетом, что длины ионизации отличаются между всеми актами ударной ионизации, необходимо принимать усредненный коэффициент умножения, описываемый по формуле (27):

$$\bar{M} = 2^{\bar{n}} = 2^{\overline{\alpha \cdot \omega}} = exp\big((ln2 \cdot \bar{\alpha} \cdot \omega)\big) = exp(0{,}7 \cdot \bar{\alpha} \cdot \omega) = \exp(\alpha \cdot \omega), \quad (21)$$

где ω – ширина области умножения.

Двусторонняя лавина инициируется обоими типами носителей заряда. На рисунке 4 показано развитие лавины на примере размножения и электронов, и дырок с одинаковой активностью, т. е. $\alpha = \beta$. Если длина ионизации первичного электрона больше ширины области умножения, то носитель заряда пролетит эту область, не успев инициировать лавину. Для возникновения лавины достаточным условием является $1/\alpha = \omega - \Delta\omega$, где $\Delta\omega << \omega$. При данной длине ионизации электрон осуществит акт ударной ионизации только перед вылетом из области умножения. Образующийся в результате вторичный электрон вкупе с первичным дрейфует к области n-типа проводимости, в дырка – к области p-типа проводимости. Аналогично электрону, дырка пролетает через всю область умножения и перед вылетом из нее совершает акт ударной ионизации, вследствие чего возникает импульс тока, обозначенный на рисунке 4 цифрой, и вторая электронно-дырочная пара носителей, дырка из которой также вылетает в область p-типа проводимости, а электрон – повторяет траекторию первичного электрона. Таким образом, процесс умножения многократно повторяется, а пролет каждого носителя заряда индуцирует импульс тока во внешней цепи.



Сплошная линия – траектория электрона;

штриховая линия – траектория дырки.

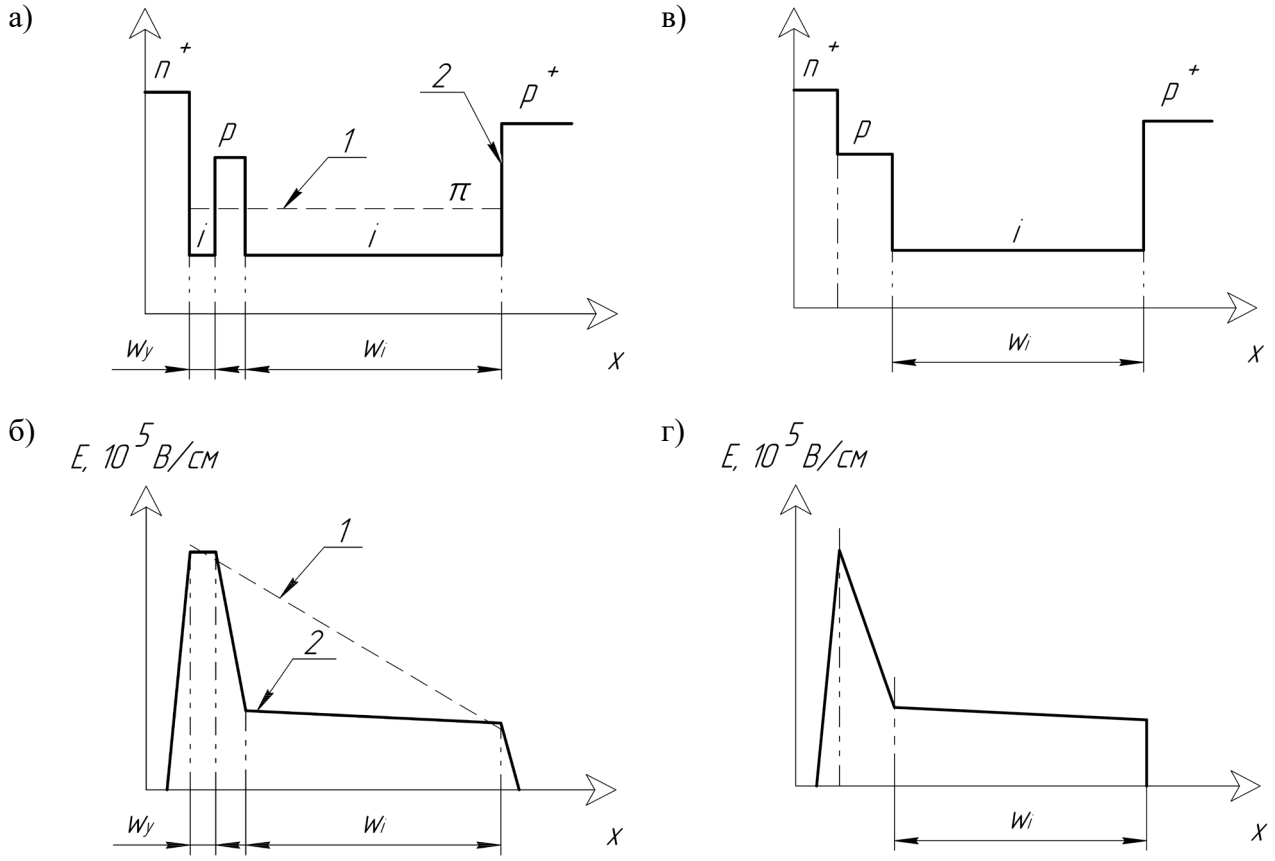
Рисунок 4 – Развитие двусторонней лавины

В рассматриваемом случае двусторонней лавины коэффициент умножения M описывается формулой (28):

$$M = \frac{1}{1 - \alpha \cdot \omega}. \tag{22}$$

1.2 ЛФД с раздельными областями поглощения и умножения

Лавинные фотодиоды с раздельными областями поглощения излучения и умножения носителей заряда предназначены для приема импульсного излучения, глубина поглощения которого в полупроводнике намного превышает толщину области лавинного умножения. На рисунке 5 приведены распределения легирующих примесей и напряженности электрического поля в лавинных фотодиодах данного типа для n^+–π–p^+ и n^+–p–i–p^+ структур, изготовленных из полупроводника с коэффициентами ударной ионизации $\alpha > \beta$ [8].



1 (штриховая линия) – n^+–π–p^+ структура; 2 (сплошная линия) – n^+–i–p–i–p^+ структура.

Рисунок 5 – Распределение концентраций и напряженности электрического поля:

а – распределение концентраций легирующих примесей в n^+–π–p^+ структуре;

б – распределение полей в n^+–π–p^+ структуре;

в – распределение концентраций легирующих примесей в n^+–i–p–i–p^+ структуре;

г – распределение полей в n^+–i–p–i–p^+ структуре.

Для такого типа лавинных фотодиодов толщина области поглощения излучения ω_i делается примерно равной обратной величине коэффициента поглощения, а напряженность электрического поля в ней поддерживается такой, чтобы сгенерированные фотоэлектроны дрейфовали к области сильного поля с максимально возможной скоростью – скоростью насыщения. Сильное электрическое поле при этом создается только в узком слое умножения, как слой ω_y на рисунках 5а и 5б, или часть p-области, прилегающая к n^+-p переходу, как на рисунке 5г. Поскольку $\alpha > \beta$, то лавина инициируется дрейфующими из области поглощения электронами. Для полупроводников с обратным соотношением коэффициентов умножения для электронов предпочтительно создание симметричных p^+–i–n–i–n^+ и p^+–n–i–n^+ структур.

Распределение электрического поля, как показано на рисунке 5б сплошной линией, наблюдается, если в n^+–i–p^+ структуре расположить тонкий слой p-типа проводимости на малом расстоянии от n^+-области, равном ω_y. Вид такой структуры приведен на рисунке 5а сплошной

линией. Этот слой должен быть столь тонким, чтобы при рабочем напряжении наступало его истощение, а ОПЗ пронизывало его и распространялось на *i*-область и область p^+-типа проводимости. Одновременно с этим, напряженность электрического поля в *i*-области вблизи области n^+-типа проводимости являлась много большей напряженности электрического поля в той же области вблизи области p^+-типа проводимости. Кроме того, в каждой из *i*-областей напряженность электрического поля должна линейно зависеть от координаты, а за счет малой концентрации примесей оставаться практически постоянной. Это и является n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структурой [8].

Лавинный фотодиод с n^+–*p*–*i*–p^+ структурой характеризуется рисунками 5в и 5г, распределение электрического поля которого схоже с n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структурой, но в отсутствии области сильного поля с почти постоянной напряженностью. Для получения такого же коэффициента лавинного умножения в этой структуре максимальная напряженность электрического поля должна быть немного выше, чем в лавинных фотодиодах с n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структурой. Также шум-фактор n^+–*p*–*i*–p^+ структуры оказывается немного больше, чем у n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структуры. Однако создание реальных n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структур стало возможным только после разработки достаточно совершенных методов эпитаксиального выращивания тонких полупроводниковых слоев, в то время как n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структуры изготавливаются по традиционным диффузионно-планарной или ионно-планарной технологиям [8].

Наличие двух областей пространственного заряда: тонкой области сильного поля, где происходит лавинное умножение, и сравнительно широкой области слабого поля, из которой фотоэлектроны быстро собираются в область сильного поля, – является основной чертой лавинных фотодиодов с раздельными областями поглощения и умножения носителей, или фотодиодов с проникновением электрического поля, или фотодиодов с проколом. Объясняется это тем, что при увеличении обратного смещения электрическое поле в n^+–*p*–*i*–p^+ и n^+–*i*–*p*–*i*–p^+ структурах распространяется от n^+-области, проникает через *p*-область и пронизывает всю относительно толстую *i*-область. Однако для приема импульсного слабопоглощаемого излучения зачастую применяют лавинные фотодиоды с n^+–*i*–p^+ структурой, толщина *i*-ого слоя которой равна обратной величине коэффициента поглощения. Тем не менее, рабочее напряжение таких приборов во много раз больше рассматриваемых выше структур. При этом рабочее напряжение n^+–π–p^+ структуры, показанной на рисунках 5а и 5б штриховой линией, в сравнении с аналогичным параметром n^+–*i*–p^+ структур уменьшается всего в два раза.

1.3 Инерционность ЛФД с раздельными областями поглощения и умножения

Инерционность лавинных фотодиодов, имеющих n^+–i–p–i–p^+ или n^+–p–i–p^+ структуру, определяется пролетом носителей заряда через толстую i-область поглощения с напряженностью электрического поля, меньшей, чем в тонкой области умножения. Кинетика таких приборов при пролете носителей заряда через ОПЗ рассчитывается с применением теоремы Рамо: носитель заряда, пролетая с определенной скоростью через область пространственного заряда, наводит во внешней цепи и в квазинейтральных областях ток, величина которого определяется формулой (23):

$$i = \frac{q \cdot v}{\omega_i}, \tag{23}$$

где q – заряд носителя;

v – скорость, с которой носитель заряда пролетает ОПЗ;

ω_i – ширина ОПЗ.

В общем случае инерционность ЛФД зависит от ряда факторов, таких как: толщина i-области поглощения; скорости электронов и дырок υ_n и υ_p; распределение носителей заряда по i-области, электрическое поле в которой может спадать к коллектору, или области p^+-типа проводимости; тип носителей заряда, инициирующих образование лавины; место фотогенерации носителей, а именно глубина поглощения излучения.

На рисунке 6 отражен пролет носителей заряда через обедненную i-область в различные моменты времени в n^+–p–i–p^+ структуре. В данном случае лавина инициируется электронами. Излучение поглощается по всей толщине области поглощения однородно, что является типовым случаем. В кремниевых n^+–p–i–p^+ структурах область поглощения имеет толщину в диапазоне (100–200) мкм, что значительно меньше глубины поглощения излучения с длиной волны, равной 1,06 мкм, для которой $1/\alpha \approx 1$ мм. Поскольку напряженность электрического поля в i-области практически постоянна, скорости υ_n и υ_p также не меняются.

Импульсная характеристика ЛФД $h(t)$ определяет его отклик $i(t)$ на мгновенную фотогенерацию в момент времени $t = 0$. На рисунке 6в для данного момента времени отмечены фотоэлектроны, при этом сгенерированные в этот момент фотодырки не изображены. Всего имеется N фотоэлектронов, равномерно распределенных вдоль i-области. Фотогенерированные электроны начинают дрейф к области умножения, тем самым формируя в первое мгновение ток, равный $i_n = q \cdot N \cdot \upsilon_n / \omega_i$. В то же время ток фотодырок соответствует $i_p = q \cdot N \cdot \upsilon_p / \omega_i$. Эти токи

первичных носителей заряда пренебрежительно малы примерно в M раз в сравнении с токами, наведенными умноженными носителями заряда.

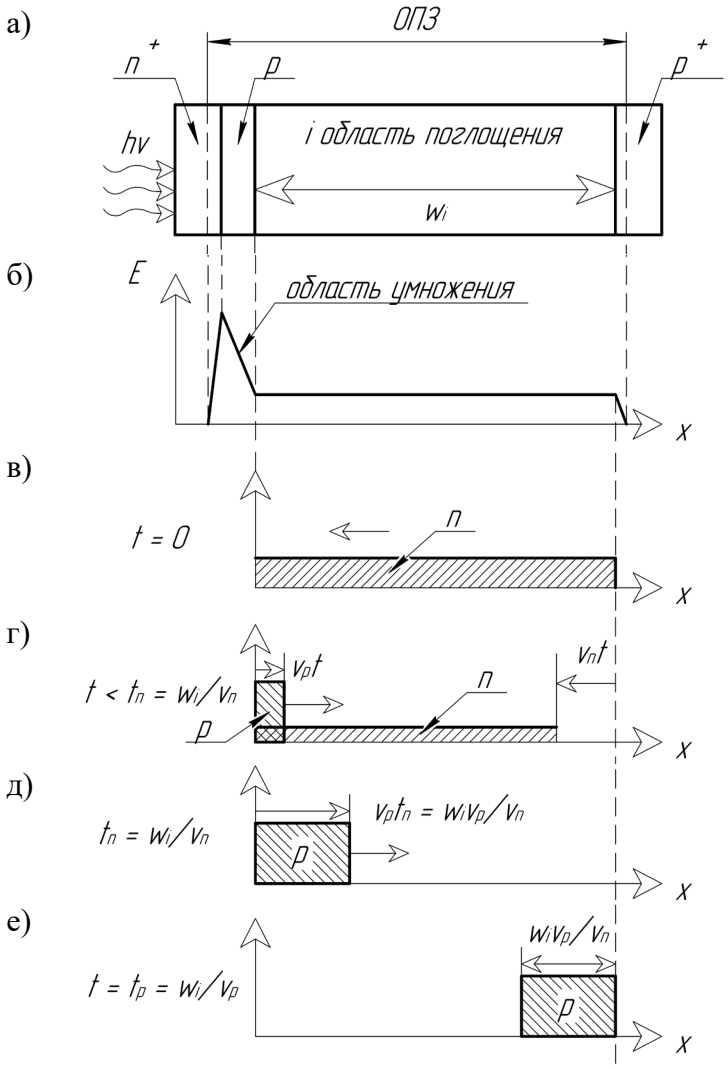


Рисунок 6 – Структура ЛФД и различные положения электронов и дырок в i-области в различные моменты времени:

а – структура; б – распределение полей;

в – момент времени $t = 0$; г – момент времени $t < t_n = \omega_i/\upsilon_n$;

д – момент времени $t_n = \omega_i/\upsilon_n$; е – момент времени $t = t_p = \omega_i/\upsilon_p$.

К моменту времени $t < t_n = \omega_i/\upsilon_n$, как показано на рисунке 6г, первичные фотоэлектроны сдвинутся вдоль области поглощения на длину $\upsilon_n t$. Другими словами, часть из них достигла области умножения и претерпела умножение в M раз. При этом фотоэлектроны в количестве $M{\cdot}N{\cdot}\upsilon_n t/\omega_i$ сразу уходят во внешнюю цепь в область n-типа проводимости. В свою очередь вторичные дырки в количестве $(M–1){\cdot}N{\cdot}\upsilon_n t/\omega_i$ дрейфуют через всю i-область. Именно эта часть носителей заряда наводит во внешней цепи ток в ответ на воздействие оптического излучения.

Получаемый ток определяется следующей формулой (24):

$$i(t) = \left(q \cdot M \cdot N \cdot \frac{\upsilon_n}{\omega_i} \cdot t\right) \cdot \frac{\upsilon_p}{\omega_i} = Q_0 \cdot \frac{1}{t_n} \cdot t \cdot \frac{1}{t_p}, \quad (24)$$

где q – заряд носителя;

M – коэффициент лавинного умножения;

N – число фотоэлектронов;

υ_n – скорость электрона;

υ_p – скорость дырки;

ω_i – толщина *i*-области;

t_n – время пролета электрона через всю *i*-область;

t_p – время пролета дырки через всю *i*-область;

Q_0 – генерированный при воздействии излучения полный заряд электронов и дырок, умноженный в *M* раз.

Импульсная характеристика *h(t)* определяется нормировкой отклика *i(t)* на заряд Q_0. При $0 < t < t_n$ импульсная характеристика имеет вид, описываемый формулой (25):

$$h(t) = \frac{i(t)}{Q_0} = \frac{1}{t_p} \cdot \frac{1}{t_n}. \quad (25)$$

В момент времени, равный t_n, как показано на риснуке 6д, все первичные фотоэлектроны достигают области умножения и осуществляют акт умножения, а вторичные дырки дрейфуют обратно через i-область к области коллектора p^+-типа проводимости. В этом случая импульсная характеристика достигает максимального значения, равного $1/t_p$.

В момент времени $t > t_n$, как показано на рисунке 6е, наведенный ток и импульсная характеристика остаются постоянными, вследствие постоянства числа вторичных дырок. При этом вследствие более медленного дрейфа вторичных дырок в сравнении с первичными электронами для дрейфа через всю *i*-область дырке требуется больше времени. Однако как только передний фронт вторичных дырок достигает область коллектора p^+-типа проводимости, они начинают инжектироваться в эту область, или «всасываться».

В момент времени $t \geq t_p$ наблюдается «всасывание» дырок, за счет чего их концентрация в ОПЗ, *i(t)* и *h(t)* линейно уменьшаются. Длительность всего переходного процесса составляет $t_n + t_p$. На рисунке 7 приведена получаемая импульсная характеристика.

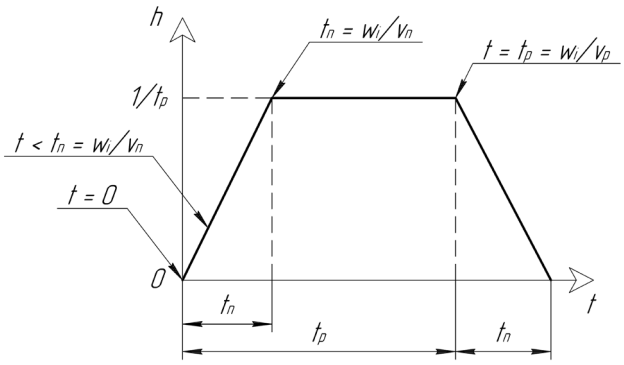


Рисунок 7 – Импульсная характеристика

1.4 Особенности технологии изготовления ЛФД

При разработке технологии изготовления ЛФД важно учитывать микроплазменный эффект. Микроплазма возникает вследствие неоднородного повышения плотности тока в отдельных областях структуры в рабочем режиме и представляет собой небольшие локальные центры разряда. Для стабильной работы ЛФД необходимо создание условий, при которых процесс лавинного умножения будет однороден.

На практике микроплазма возникает в трех областях ЛФД [10]:

— края *p-n* перехода;

— поверхности в мезаструктурах;

— области материала с несовершенной кристаллической структурой и с дефектами перехода.

Периферия *p-n* перехода в планарных структурах имеет специфическую форму диффузионной области, вследствие чего на его краях присутствует повышенная напряженность электрического поля в сравнении с плоской частью в центральной области, что ведет к образованию микроплазмы. В мезаструктурах дефекты в местах пересечения *p-n* перехода с поверхностью или загрязнения в этой области вызывают резкое искривление энергетических зон вблизи границы перехода, вследствие чего возникают локальные центры повышенной напряженности электрического поля. Неоднородное легирование полупроводниковой подложки, металлические включения или другие структурные дефекты в области объемного заряда *p-n* перехода определяют наличие областей материала с несовершенной кристаллической структурой и с дефектами *p-n* перехода, что также сопровождается образованием микроплазмы.

Являясь следствием нерегулярных токовых выбросов, микроплазма указывает на ранний пробой или на повышение уровня шума фоточувствительной структуры. Кроме того,

микроплазменное явление ухудшает и пороговую чувствительность ЛФД, повышая вероятность ложных срабатываний [11].

Для обеспечения широкой полосы рабочих частот и низкого уровня собственных шумов в ЛФД необходимо, чтобы коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок различались как можно значительней. В этом случае лавина инициируется фотоносителями заряда с большим коэффициентом, за счет чего сам процесс упорядочивается и приближается к одностороннему, при котором собственные шумы вызываются только статистическим разбросом длины ионизации вторичных носителей [8]. Выбор материала области поглощения, выполняющего данное условие, позволяет создать прибор с заведомо низким уровнем шумов. Кроме того, снижение избыточного шума ЛФД достигается и в случае, когда лавинное умножение определяется исключительно инжекцией электронов в относительно широкой области умножения. Помимо этого, достижение наименьших шумов реализуется при выборе архитектуры фоточувствительной структуры, регистрация оптического излучения в которой происходит со стороны контактной p^+-области. Обеспечение однородности легирования области умножения выше 0,1 % также снижает уровень шумов за счет подавления шумов, обусловленных флуктуацией плотности легирования p-области [10].

Существует ряд типовых топологий, реализуемых в лавинных фотодиодных структурах и не рассмотренных выше. На рисунке 8 приведен их вид.

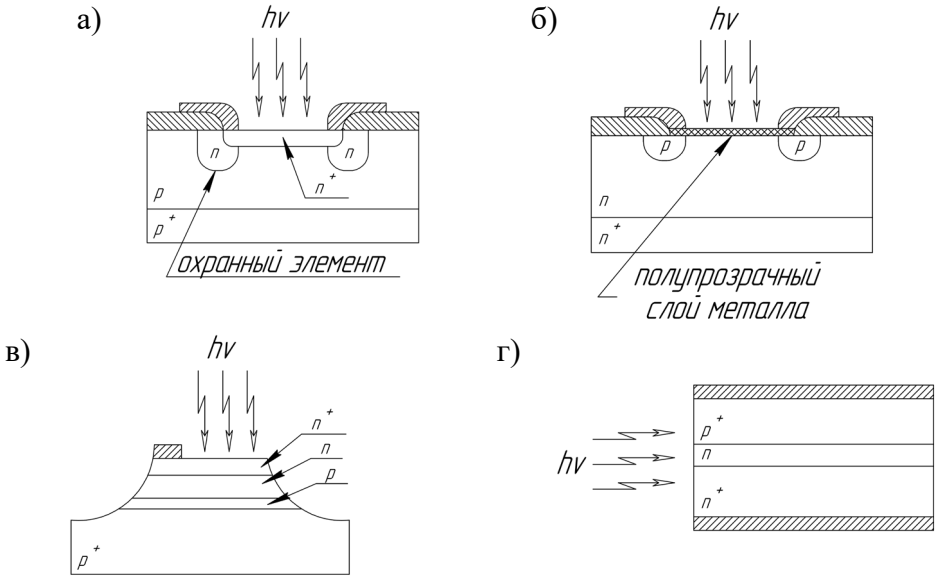


Рисунок 8 – Некоторые типовые структуры ЛФД:

а – структура с охранным кольцом; б – структура с барьером Шоттки;

в – меза-структура; г – p^+–n–n^+ структура с боковым освещением.

На рисунке 8а представлена структура высокочастотного ЛФД на основе германия с высокой квантовой эффективностью в спектральном диапазоне (1,0–1,6) мкм. Удельное сопротивление слоя *p*-типа проводимости толщиной 150 мкм составляет 0,5 Ом·см. Охранный элемент, необходимый для устранения токов утечки по периферии перехода, создается легированием сурьмой на глубину 7,5 мкм, а слой n^+-типа проводимости – легированием мышьяком на глубину 0,4 мкм. На рисунке 8б показана структура с барьером Шоттки. Такие структуры наиболее эффективны в видимой и ультрафиолетовой областях излучения. Удельное сопротивление подложки кремния *n*-типа проводимости составляет 0,5 Ом·см. На поверхности подложки имеется тонкая металлическая пленка PtSi толщиной порядка 0,001 мкм, через которую и реализуется регистрация падающего оптического излучения. В этой структуре также, как и в предыдущей структуре, имеется охранный элемент. ЛФД с барьером Шоттки, подложкой которой является кремний *n*-типа проводимости, особо применимы в качестве высокочастотных фотоприемников ультрафиолетового спектра оптического излучения. Топология ЛФД обеспечивает поглощение излучения в приповерхностной области кремния на глубине 0,001 мкм, за счет чего лавинное умножение инициируется преимущественно электронами. На рисунке 8в представлен вид ЛФД с меза-структурой. В качестве подложек применяются полупроводники типа A_3B_5. На рисунке 8г показана p^+–n–n^+ структура, регистрация падающего излучения которой реализуется через торцевую сторону ЛФД.

1.5 Архитектура и топология существующих массивов ЛФД

1.5.1 ЛФД на основе GaN

Известна технология изготовления кристалла массива лавинных фотодиодов, имеющей 16 фоточувствительных элементов [11]. Площадь каждого фоточувствительного элемента в виде пикселя размером 75 мкм х 75 мкм соответствует 5,625 мкм^2. Регистрация падающего излучения реализуется через верхний фоточувствительный слой.

В качестве материала подложки кристалла применяются легированные кремнием пластины нитрида галлия *n*-типа проводимости с плотностью дислокаций менее $5 \cdot 10^6$ см$^{-2}$. Данный выбор обоснован потенциалом материалов группы III-N для создания приборов, характеризуемыми высокой чувствительностью, малыми шумами и низкими плотностями темновых токов, а также высоким оптическим усилением, что упомянуто в работах [12] и [13].

Для многоэлементных фоточувствительных структур независимо от области применения и рабочим диапазоном длин волн излучения важными параметрами являются высокие значения чувствительности, внутреннего усиления и однородности, а также быстрый отклик и стабильный лавинный пробой. Создание подобных структур на стандартных полупроводниках зачастую характеризуется большими рабочими напряжениями для высокого внутреннего усиления, потребностью в охлаждаемом фотокатоде для уменьшения шумов прибора и использованием оптических фильтров, что ведет к повышению стоимости и громоздкости прибора. Материалы же группы III-N обладают химической и термической стабильностью, а за счет изменения ширины запрещенной зоны позволяют обеспечить высокую внутреннюю обнаружительную способность. Важным недостатком данной группы полупроводников является высокая плотность дислокаций, возникающая в результате гетероэпитаксиального роста, что в случае многоэлементных лавинных структур приводит к неравномерности параметров возникновения лавины и, как следствие, электрических свойств линейки, высоким токам утечки и раннему возникновению микроплазмы, а в конечном счете и к относительно низкому проценту выхода годных. Тем не менее, авторы работы [13] рассмотрели возможность повышения качества GaN-подложек за счет оптимизации технологических процессов эпитаксиального роста, травления и пассивации поверхности для уменьшения токов утечки на боковых стенках.

Технология изготовления массива ЛФД на основе *n*-GaN:Si следующая. Формирование фоточувствительной структуры проводится эпитаксией методом химического осаждения из паров металлоорганических соединений, или MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition) на свободностоящей подложке GaN. Для создания высоколегированных областей *n*- и *p*-типа проводимости были применены моносилан SiH_4 и бис-циклопентадиенил магния $Mg(C_5H_5)_2Cp_2Mg$, соответственно. Таким образом, структура состоит из слоя *n*-GaN:Si толщиной 2,3 мкм и концентрацией $4 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$, слоя *p*-GaN:Mg толщиной 0,1 мкм и концентрацией $1 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ и слоя *p*-GaN:Mg^{++} толщиной 15 нм, необходимого для формирования омического контакта к верхнему слою. Фоточувствительные элементы выделялись меза-травлением в индуктивно-связанной плазме (ICP-RIE) Cl_2/Ar. Размеры мезы при этом составляли 75 мкм х 75 мкм. Расстояние между соседними фоточувствительными элементами равно 7 мкм.

В качестве контактов к слоям *n*- и *p*-типа проводимости были выбраны многослойные металлические структуры Ti/Al/Ti/Au и Ni/Ag/Ni/Au, получаемые электронно-лучевым осаждением из паровой фазы, или EBPVD (Electron-Beam Physical Vapor Deposition). Вжигание осажденных металлических пленок проводилось при 700 °C в среде N_2 для верхнего контактного слоя и при 500 °C в среде сухого сжатого воздуха для тыльного контактного слоя. Нанесение диоксида кремния в качестве пассивирующего слоя осуществлялось плазмохимическим осаждением из газовой фазы, или PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). При этом

пленка SiO_2 необходима не только для уменьшения токов утечки через боковые стороны мезы, но и в качестве просветляющего покрытия, в связи с чем толщина пассивирующей пленки непосредственно на фоточувствительных площадках была утонена травлением методом ICP-RIE.

Схематичное отображение вертикальной архитектуры полученной структуры на примере одного фоточувствительного элемента представлена на рисунке 9, топологии фоточувствительного кристалла – рисунке 10.

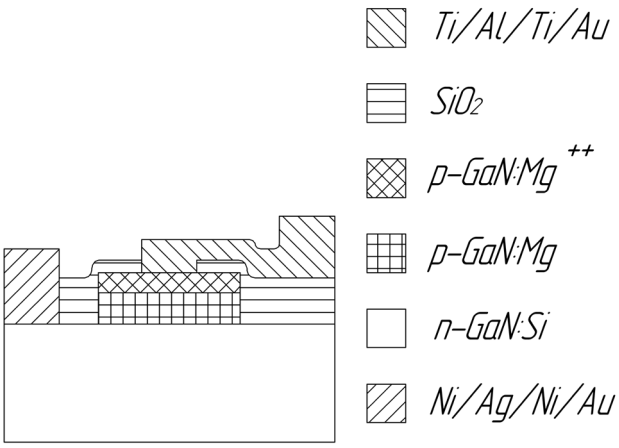


Рисунок 9 – Вертикальная архитектура фоточувствительного элемента

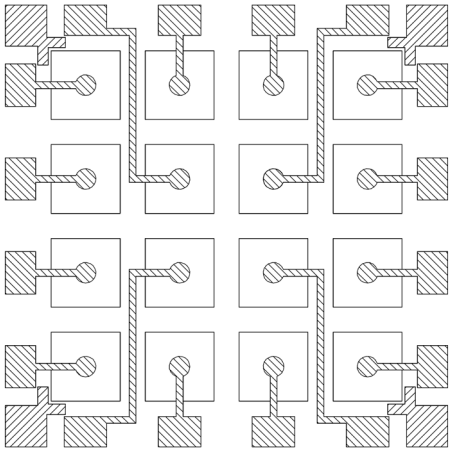


Рисунок 10 – Топология *p-i-n* массива ЛФД на основе GaN

Изготовленная партия кристаллов массива лавинных фотодиодов была исследована с помощью параметрического анализатора Keithly 4200 и источника излучения Newport Apex Illuminator, оснащенного ксеноновой лампой мощностью 150 Вт и монохроматической системой с максимальным пиком эмиссии на длине волны 280 нм, что позволило определить темновой ток, фототок и коэффициент умножения структуры.

На рисунке 11 приведены зависимости плотности темнового тока от приложенного обратного смещения до 100 В для нескольких ФЧЭ в отсутствии освещения и при фронтальной засветке структуры излучением с длиной волны 280 нм.

а) б)

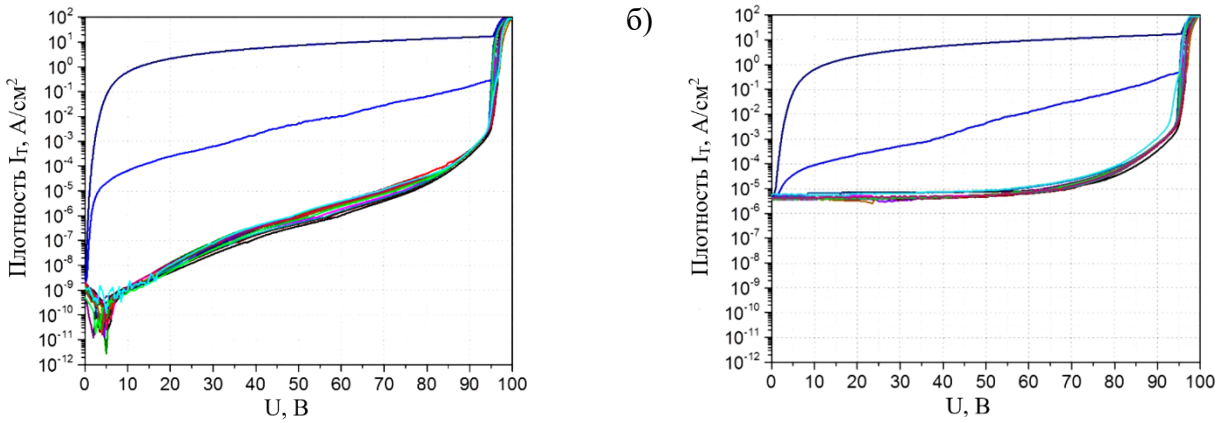


Рисунок 11 – Плотность темнового тока *p-i-n* ЛФД на основе GaN:
а – в отсутствии освещения; б – при излучении с длиной волны 280 нм.

Среднее значение плотности темнового тока изготовленной структуры до наступления лавинного пробоя менее $(6,5\pm1,8)\cdot10^{-7}$ А/см^2. Среднее значение напряжения лавинного пробоя по измерениям на 16 структурах составляет 95,9 В со стандартным разбросом 0,6 В. Также была измерена плотность фототока при ультрафиолетовой засветке с пиком на длине волны 280 нм. Среднее значение плотности фототока составляет $(5,7\pm1,1)\cdot10^{-6}$ А/см^2 при напряжениях смещения до 50 В, после чего зависимость выходит на плато и далее резко возрастает при увеличении обратного смещения. В отсутствие смещении максимум чувствительности достигал значение 142 мА/Вт при длине волны 366 нм. Однако при подаче напряжения величиной 95 В пик спектральной чувствительности достигает 5,485 мА/Вт на длине волны 378 нм. Обеднение структуры и далее лавинный пробой происходит при напряжениях, больше 90 В, и сопровождается значительным пиком чувствительности за счет вклада ударной ионизации носителей при лавинном умножении.

Исходя из полученных характеристик, напряжение прокола для всей партии кристаллов соответствует значению (95,9±0,6) В. Коэффициент лавинного умножения при напряжении прокола достигает значения 36. Дальнейшее увеличение приложенного напряжения позволяет достичь коэффициента умножения – $5\cdot10^4$. Плотность темновых токов соответствует $(6,5\pm1,8)\cdot10^{-7}$ А/см^2 при смещении 48 В и в отсутствии явления микроплазмы, а максимум спектральной чувствительности 5,485 мА/Вт при напряжении 95 В – что является конкурентноспособными значениями для линеек лавинных фотодиодов ИК-диапазона [13].

1.5.2 ЛФД на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$

Известна технология изготовления кристалла массива лавинных фотодиодов на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$, имеющей 4 фоточувствительных элемента [14]. Размер каждого фоточувствительного элемента соответствует 200 мкм х 200 мкм. Массив ЛФД рассчитан на регистрацию рентгеновского излучения через верхний фоточувствительный слой для космической области. В основной своей массе материалами подложек для фотоэлектронных приборов в заданных условиях эксплуатации являются кремний и германий, применение которых требует дополнительных защиту от фонового излучения и охлаждение фоточувствительного кристалла. На основе некоторых работ, таких как [15], [16] и [17], в которых упоминается чувствительность $Al_xGa_{1-x}As$ к рентгеновском излучению и бета-частицам при комнатной температуре и выше, авторы работы [16] рассмотрели данный материал в качестве подложки для создания массива лавинных фотодиодов. Кроме того, широкая запрещенная зона, равная 1,67 эВ, предполагает устойчивость материала к высоким температурам за счет низких термоиндуцированных токов утечки в сравнении другими материалами, имеющими более узкую ширину запрещенной зоны. Также $Al_xGa_{1-x}As$ обладает высокой радиационной стойкостью, что является важной характеристикой для приборов космического применения.

Технология изготовления массива ЛФД на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ следующая. В качестве подложки использовались пластины арсенида галлия диаметром 2 дюйма *n*-типа проводимости. Формирование легированных слоев проводилось МОС-гидридной эпитаксией, или MOVPE (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy). Для создания высоколегированных областей *n*- и *p*- типа проводимости применялись примесь бериллия Be и кремния Si, соответственно. Получаемая структура линейки лавинных фотодиодов состоит из слоя *n*-$Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ толщиной 1 мкм и концентрацией $2 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$, слоя нелегированного $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ толщиной 3 мкм, слоя *p*-$Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ толщиной 0,5 мкм и концентрацией $2 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ и слоя *p*-GaAs толщиной 0,001 мкм и концентрацией $1 \cdot 10^{19}$ $см^{-3}$.

Для выделения фоточувствительных элементов изготовленные пластины подвергались жидкостному меза-травлению в разбавленном растворе ортофосфорной кислоты и перекиси водорода $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ в соотношении 1:1:1 и разбавленном растворе серной кислоты и перекиси водорода $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ в соотношении 1:8:80 в течение 10 с. Формирование омических контактов проводилось осаждением InGe толщиной 0,002 мкм и Au толщиной 0,02 мкм к слою p^+-типа проводимости и Ti толщиной 0,002 мкм и Au толщиной 0,02 мкм к тыльному слою. Контакт к верхнему слою занимает 50 % площади ФЧЭ.

Схематичное отображение архитектуры массива лавинных фотодиодов на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ на примере одного фоточувствительного элемента представлена на рисунке 12, топологии – рисунке 13.

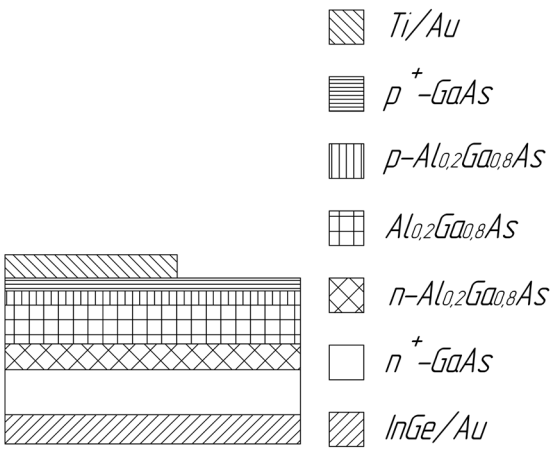


Рисунок 12 – Архитектура фоточувствительного элемента

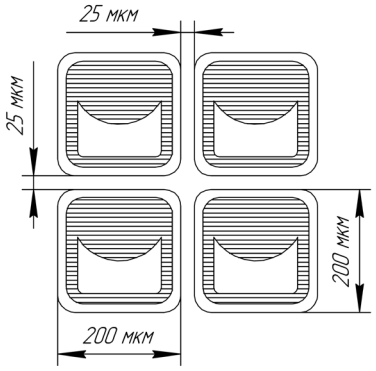
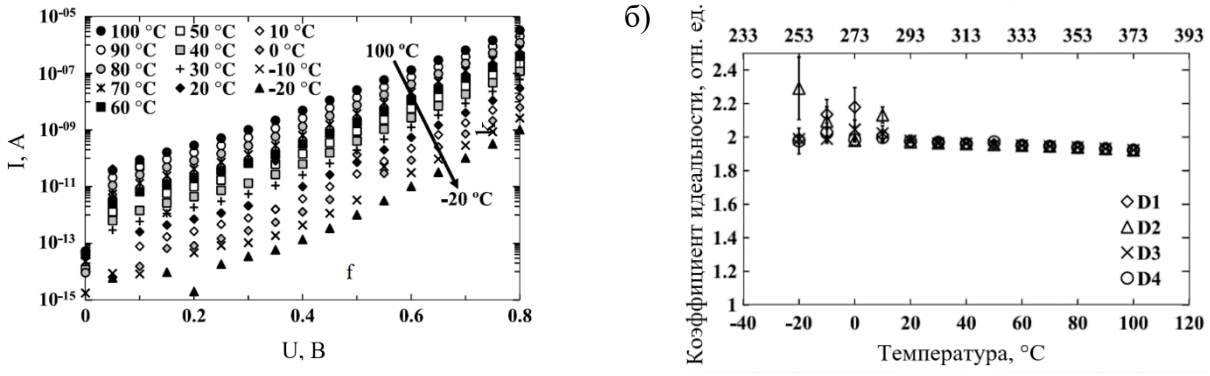


Рисунок 13 – Топология *p-i-n* массива ЛФД на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$

Основным преимуществом данного массива лавинных фотодиодов является стабильность электрофизических характеристик в широком температурном диапазоне от минус 20 °С до 100 °С. Измерения проводились с применением пикоамперметра Keithly 6487.

На рисунке 24 представлены прямая ветвь ВАХ в диапазонах напряжения до 0,8 В и температуры от 100 °С до минус 20 °С, а также температурная зависимость коэффициента идеальности 4 фоточувствительных элементов. В диапазоне рабочих температур от 100 °С до минус 20 °С коэффициент идеальности каждого ФЧЭ равен примерно 2, что позволяет рассматривать рекомбинацию в обедненной области в качестве доминирующего ограничивающего условия.

а) б)



◊ – ФЧЭ № 1; Δ – ФЧЭ № 2; X – ФЧЭ № 3; O – ФЧЭ № 4.

Рисунок 14 – Характеристики в диапазоне температур от 100 °C до минус 20 °C:
а – прямая ветвь ВАХ; б – коэффициент идеальности.

Зависимости величины токов утечки одного ФЧЭ от приложенного обратного напряжения при температурах в диапазоне от 100 °C до минус 20 °C приведено на рисунке 15.

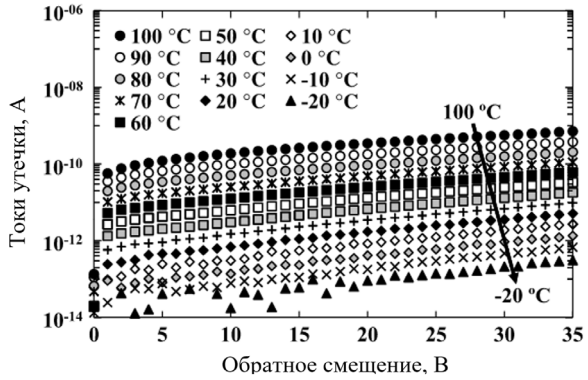


Рисунок 15 – Вольтаическая зависимость токов утечки при рабочих температурах от 100 °C до минус 20 °C одного ФЧЭ

На основе проведенных измерений структуры авторами работы было обнаружено уменьшение тока насыщения в зависимости от температуры. Так, при температуре 100 °C величина тока насыщения для каждого фоточувствительного элемента соответствовала 7,97 пА, 8,05 пА, 8,03 пА и 7,93 пА с погрешностью 0,04 пА, в то время как при температуре минус 20 °C были получены значения 10,11 аА, 94,12 аА, 10,12 аА и 11,80 аА с погрешностью измерений в широком диапазоне (0,04–100,32) аА. Коэффициент идеальности в исследованном температурном диапазоне был примерно одинаков и равен 2 для каждого ФЧЭ.

Кроме того, были получены зависимости ЭОФ при напряжениях в диапазоне (0–30) В с шагом 10 В, представленные на рисунке 16.

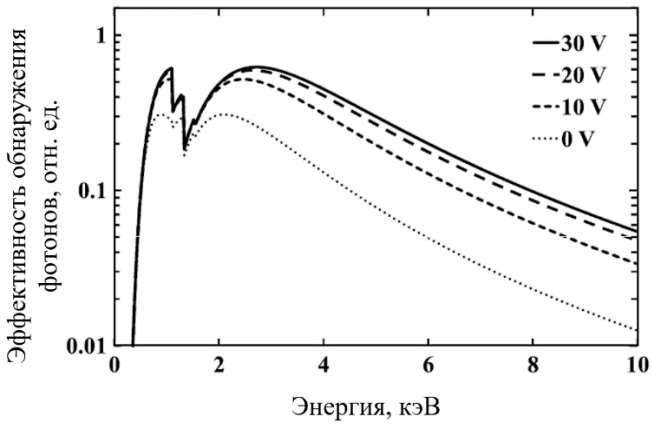


Рисунок 16 – Эффективность обнаружения фотонов в диапазоне напряжений (0–30) В

Исходя из представленных данных в работе, квантовая эффективность одного ФЧЭ при обратном смещении, равном 30 В, составляет 0,21 с энергией 5,9 кэВ и 0,17 с энергией 6,49 кэВ – для области без металлического контакта, и 0,17 с энергией 5,9 кэВ и 0,14 с энергией 6,49 кэВ – для области, покрытых металлическим контактом. Рабочие температуры одного ФЧЭ в качестве детектора со счетом фотонов соответствуют диапазону от 30 °С до минус 20 °С, среднее значение токов утечки равно (0,35±0,4) пА при смещении 35 В. Для сравнения известны $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ p^+-i-n^+ приборы с мезой круглой формы и более высоким уровнем токов утечки – 4,72±1,67 нА [16].

1.5.3 ЛФД на основе $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$

Известна технология изготовления кристалла массива лавинных фотодиодов на основе $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$ с регистрацией излучения с тыльной стороны кристалла [18]. Тройные соединения типа $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при x менее 0,6 могут достигать высокие коэффициенты усиления и при этом в теории могут обеспечить шум-фактор, близкий к 1, что является полезными характеристика данного материала, в частности, при изготовлении многоэлементных массивов лавинных фотодиодов [19].

Технология изготовления массива ЛФД на основе $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$ следующая. На подложке CdZnTe (111) методом жидкофазной эпитаксии были выращены слои p-типа $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (x = 0,22) и концентрацией Hg, равной $1 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. Обработка методом ионной имплантации привело к образованию межузельных атомов Hg, формирующих n^+-область на лицевой стороне пластины глубиной 2 мкм. Дальнейший постимплантационный отжиг привел к заполнению вакансий Hg и созданию скомпенсированной области n-типа проводимости глубиной 3,3 мкм. Концентрация этой области составляет $1{,}3 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Также поверхность пассивировалась теллуридом кадмия

CdTe, а на обратной стороне, через которую осуществляется поглощение падающего рентгеновского излучения, нанесен слой теллурида кадмия-цинка CdZnTe и антиотражающее защитное покрытие.

Схематичное отображение архитектуры массива лавинных фотодиодов на основе $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$ на примере одного фоточувствительного элемента представлена на рисунке 17.

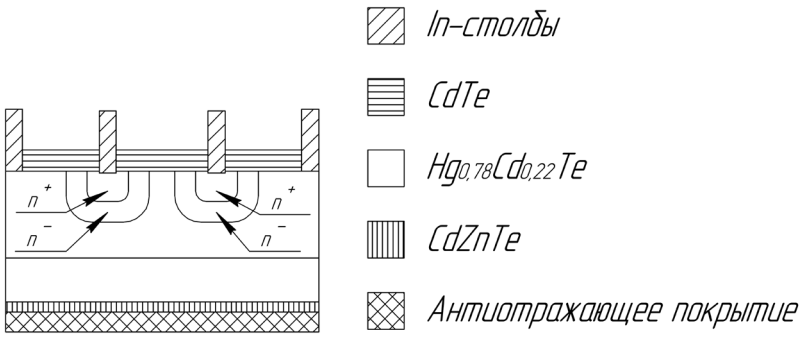


Рисунок 17 – Архитектура фоточувствительного элемента

Стоит отметить, что в данной работе [21] было проведено исследование характеристик опытных образцов линейки лавинных фотодиодов и сравнение их температурных зависимостей со смоделированными. Параметры симуляции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделирования

№ п/п	Параметр, при T = 80 K	Значение
1	2	3
1	N_d в n^+-области, см$^{-3}$	$5 \cdot 10^{16}$
2	N_d в n^--области, см$^{-3}$	$1{,}3 \cdot 10^{15}$
3	N_d в p-области, см$^{-3}$	$1{,}0 \cdot 10^{16}$
4	Толщина n^+-области, мкм	2
5	Толщина n^--области, мкм	3
6	Содержание Cd, x_{Cd}	0,22
7	Время жизни (Шоккли-Рида-Холла), с	$4{,}0 \cdot 10^{-9}$

Процессы рекомбинации Шоккли-Рида-Холла и через центры захвата в процессе туннелирования рассчитывались по следующей формуле (26):

$$R_{SRH(TAT)} - \frac{pn - n_i^2}{\frac{\tau_p}{1+\Gamma_p}\left[n + n_i exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)\right] + \frac{\tau_n}{1+\Gamma_n}\left[p + n_i exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right)\right]}, \quad (26)$$

где n – концентрация электронов;

p – концентрация дырок;

n_i – собственная концентрация носителей;

τ_n – время жизни электронов;

τ_p – время жизни дырок;

E_i – энергия, соответствующая уровню Ферми в собственном полупроводнике;

E_t – энергия, соответствующая положению уровня дефекта в запрещенной зоне;

T – температура;

k – постоянная Больцмана.

Процесс генерации носителей заряда механизмом зона-зона описываются формулой (27):

$$G_{BBT} = A \cdot E^2 \cdot exp\left(\frac{B}{E}\right), \tag{27}$$

где A и B – характеристические параметры;

E – величина электрического поля.

Ионизационная составляющая генерации описывается формулой (30) и формулой (31):

$$G_{impact} = a_n n v_n + a_p p v_p, \tag{28}$$

$$a_{n,p}(E) = a_{n,p} \cdot E^c \cdot exp\left(-\frac{b}{E}\right), \tag{29}$$

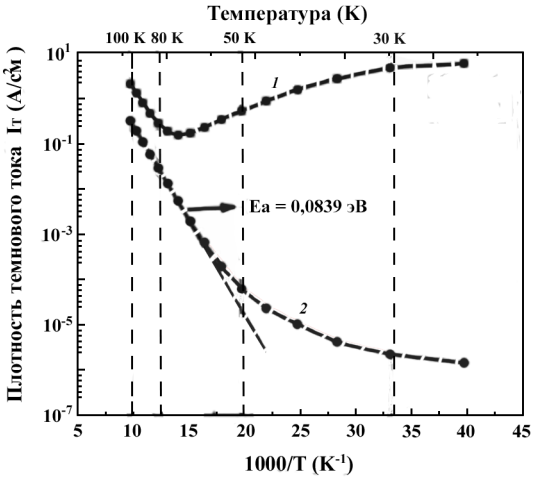
где $a_{n,p}(E)$ – коэффициенты ионизации электронов и дырок, соответственно;

c – коэффициент, равный 0,6.

Также стоит обратить внимание на то, что основной целью работы [21] является не создание конкурентноспособного коммерческого прибора, а определение механизмов лавинного умножения в $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$ и в целом в соединениях типа $Hg_{1-x}Cd_xTe$. По этой причине рассматривать конкретные рабочие параметры кристалла фоточувствительного кристалла, несмотря на их наличие в работе [21], не имеет смысла, зато отдельный интерес вызывает изучение физики лавинного умножения в структурах данного типа. Так, из температурной зависимости плотности темнового тока при смещении 0,1 В и для температурного диапазона (22–200) К, представленной на рисунке 18, было определено, что вакансии Hg являются главными генерационно-рекомбинационными центрами при температурах (55–100) К, а доминирующим

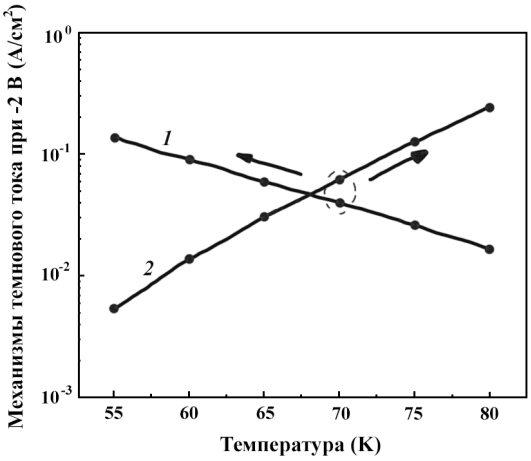
механизмом при температурах ниже 70 К и относительно большом смещении от 2 В является межзонное туннелирование, что, по мнению авторов работы, свойственно всем лавинным структурам на $Hg_{1-x}Cd_xTe$-соединениях.

На рисунке 19 приведена схема, отражающая степень влияния различных механизмов в тройных соединениях $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в зависимости от температуры. Оказалось, что для данного типа соединений критической температурой является 70 К, ниже которой туннелирование зона-зона является доминирующим механизмом. При этом с повышением температуры в диапазоне до 70 К наблюдается быстрый рост темного тока, что связано с тем, что при температурах выше 70 К вклад туннелирования становится меньше за счет расширения запрещенной зоны. При больших температурах основной вклад вносит механизм Шоккли-Рида-Холла и туннелирование.



1 – при напряжении минус 0,1 В; 2 – при напряжении минус 2 В.

Рисунок 18 – Плотность темновых токов при различных температурах



1 – механизм зона-зона; 2 – механизмы Шоккли-Рида-Холла и туннелирование.

Рисунок 19 – Основные механизмы темнового тока в диапазоне температур от 55 К до 80 К при напряжении минус 2 В

Также наблюдалось ощутимое негативное влияние доминации межзонного туннелирования на шумовую характеристику кристалла за счет возникновения двусторонней лавины. В связи с этим авторы работы [21] заключили, что улучшение не только шумовой характеристики, но и снижение уровня темного тока может быть достигнуто корректированием концентраций и толщины области умножения, что является одним из направлений их дальнейшего исследования.

1.5.4 ЛФД на основе Si

1.5.4.1 S8550-02

Известен массив лавинных фотодиодов S8550-02 производителя «Hamamatsu», имеющий 32 фоточувствительных элемента. Каждый фоточувствительный элемент имеет размер 1,6 мм x 1,6 мм. Шаг между элементами равен 2,3 мм. Регистрация падающего излучения реализуется фронтально через верхний фоточувствительный слой. Данная структура предназначена для обнаружения сигнала в коротковолновой области спектра, имеет низкий шум и малую выходную емкость прибора. Кроме того, рассматриваемый массив ЛФД отличается равномерным усилением и малым разбросом оптических перекрестных шумов между фоточувствительными элементами, что определяет ее широкое использование в условиях слабого освещения области видимого спектра и в различных обнаружительных системах в составе сцинтилляционных детекторов. В ряде работ, таких как таких как [20], [21], [22] и [23], S8550-02 применяется в составе двухзеркальных малогабаритных телескопов телескопической решетки Черенкова.

Топология массива ЛФД на основе кремния S8550-02 представлена на рисунке 20. Электрооптические характеристики при температуре 25 °C приведены в таблице 2.

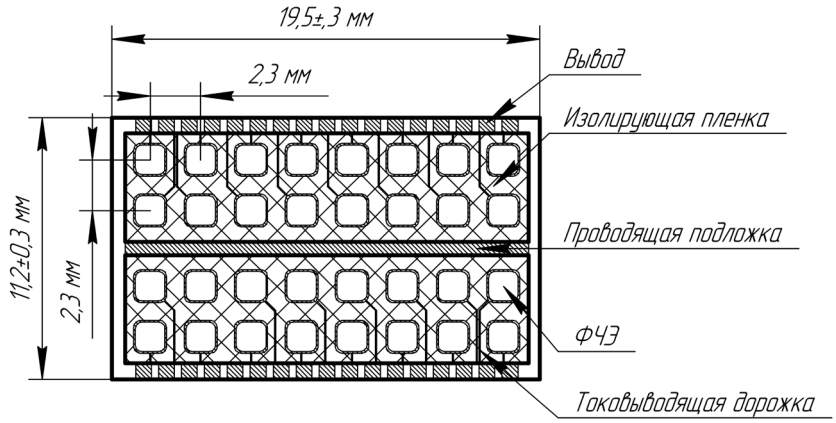


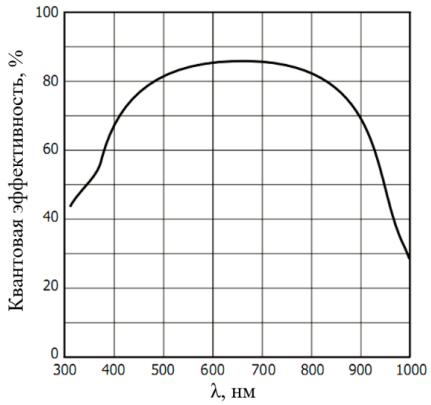
Рисунок 20 – Топология массива ЛФД S8550-02

Таблица 2 – Электрооптические характеристики

№ п/п	Параметр	Условие	Значение		
			мин.	тип.	макс.
1	2	3	4	5	6
1	Коэффициент умножения M	–		50	
2	Темновой ток I_m, нА	$M = 50$	–	1	10
3	Емкость C, пФ	$M = 50$	–	9	–
4	Пик чувствительности, нм	$M = 50$	–	600	–
5	Время нарастания t, нс	–	–	1,5	–
6	Напряжение пробоя $U_{пр}$, В	$I_R = 10$ нА	–	400	500
7	Избыточный коэффициент шума	$\lambda = 420$ нм	–	0,2	–

На рисунке 21 представлены зависимость квантовой эффективности от длины волны и обратная ветвь вольт-амперной характеристики массива ЛФД S8550-02.

а)



б)

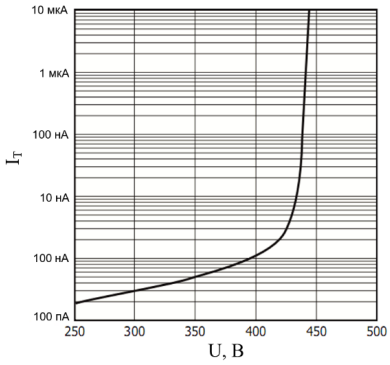


Рисунок 21 – Характеристики массива ЛФД S8550-02:

а – зависимость квантовой эффективности от длины волны; б – обратная ветвь ВАХ.

1.5.4.2 SAH1L12

Известен массив лавинных фотодиодов SAH1L12 производителя «Laser Components», имеющий 12 фоточувствительных элементов двухрядный корпус с 14 контактными выводами и защитным окном. Площадь фоточувствительного элемента соответствует 0,12 мм^2. Регистрация падающего излучения реализуется через верхний фоточувствительный слой. Спектральный диапазон массива ЛФД – (0,8–0,9) мкм. Рассматриваемая структура имеет высокую квантовую эффективность более 88 % на длине волны 0,8 мкм, широкий диапазон рабочих температур, а также малые шумы, в том числе перекрестные. Топология массива ЛФД SAH1L12 представлена на рисунке 22.

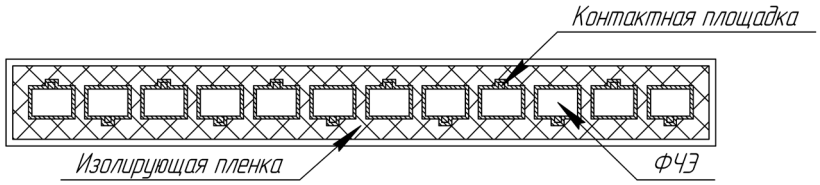


Рисунок 22 – Топология массива ЛФД SAH1L12

Электрооптические характеристики при температуре 25 °С представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Электрооптические характеристики

№ п/п	Параметр	Условие	Значение		
			мин.	тип.	макс.
1	2	3	4	5	6
1	Коэффициент умножения M	–	100		
2	Темновой ток I_m, нА	M = 100, λ = 905 нм	–	4	10
3	Разброс I_m, %	M = 100		±5	±20
4	Емкость C, пФ	M = 100	–	3	–
5	Пик чувствительности, нм	M = 100	–	900	–
6	Чувствительность R_I, А/Вт	M = 100, λ = 905 нм	40	50	–
7	Время нарастания t, пс	M = 100, λ = 905 нм, R_L = 50 Ом	–	1000	–

Окончание таблицы 3.

1	2	3	4	5	6
8	Напряжение пробоя $U_{пр}$, В	I_R = 10 нА	80	150	200
9	Оптические перекрестные шумы, дБ	λ = 905 нм	–	50	–

На рисунке 23 представлены некоторые зависимости массива ЛФД SAH1L12, такие как спектральная чувствительность, квантовая эффективность, а также вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики.

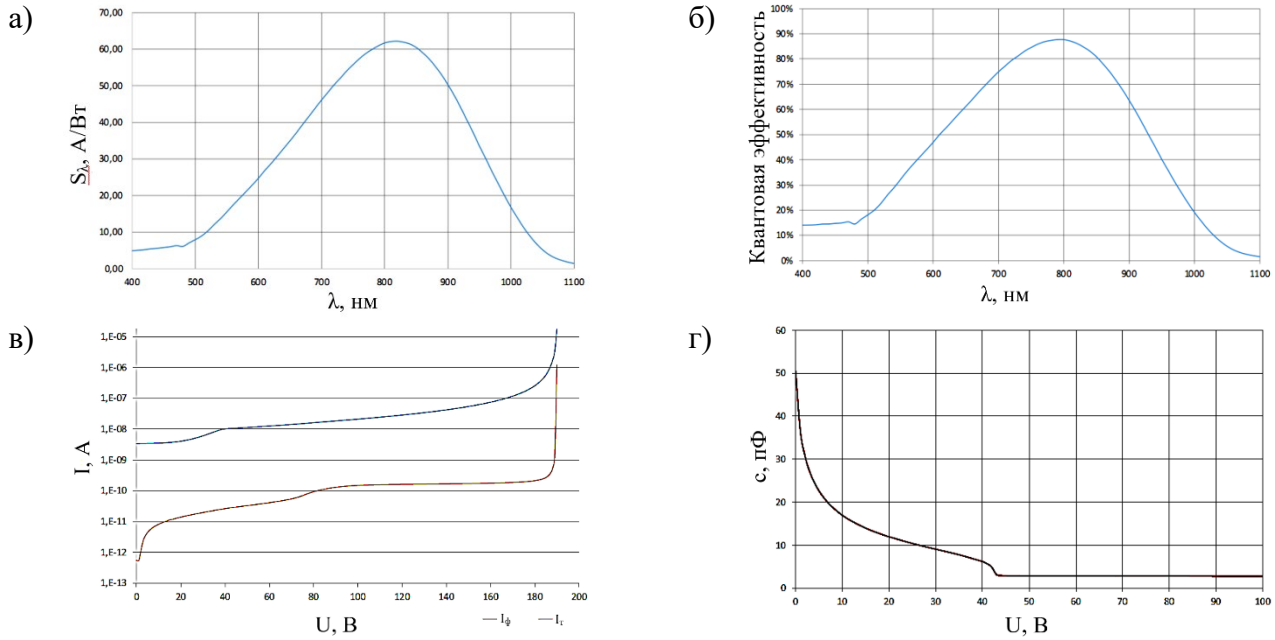


Рисунок 23 – Характеристики массива ЛФД SAH1L12:
а – спектральная чувствительность; б – квантовая эффективность;
в – ВАХ; г – CV-характеристика.

1.6 Выводы по разделу 1

Проведенный аналитический обзор литературы задает перечень задач, последовательное решение которых позволит рациональным образом провести технологические работы по разработке новой технологии изготовления фоточувствительного кристалла, а именно:

1. Определить топологию и вертикальную архитектуру фоточувствительного кристалла.

Для начала важно разработать вертикальную архитектуру и топологию, а также выбрать поверхность фоточувствительного кристалла, непосредственно через которую будет

производиться регистрация падающего излучения длиной волны 0,85 мкм. При этом определение материала полупроводниковой пластины, высоколегированных областей, диэлектрических и металлических слоев должны отвечать технологическим особенностям данного типа твердотельных фотопреобразователей.

2. Составить эскизный технологический маршрут и провести поиск технологических решений.

Далее требуется составить эскизный технологический маршрут изготовления с учетом особенностей и технологических возможностей имеющейся производственной линии, произвести поиск технологических решений, направленных на потенциальное улучшение электрофизических параметров фоточувствительного кристалла, и исследовать влияние их внедрения в цикл изготовления посредством апробации на серийно выпускаемых приборах, характеризуемых устойчивыми производственными коэффициентами.

3. Подобрать операционные режимы технологических процессов и операций.

На данном этапе разработки нужно провести ряд экспериментов по определению оптимальных режимов для входящих в эскизный маршрут изготовления технологических процессов и операций. После чего возможно корректирование эскизного технологического маршрута изготовления фоточувствительного кристалла.

4. Изготовить экспериментальные партии кристаллов линейки ЛФД.

Следующей задачей является непосредственно изготовление экспериментальных партий кристаллов линейки ЛФД и сопутствующее корректирование как последовательности технологических процессов и операций, так и их операционных режимов при необходимости. Кроме того, необходимо установить признаки годности фоточувствительного кристалла для ряда технологических процессов, отслеживание которых повысит эффективность всего цикла изготовления, а также задать методы их контроля.

5. Оценить возможности технологических процессов.

Впоследствии важно оценить настроенность и точность отдельных технологических процессов, потенциальное влияние которых на процент выхода годных кристаллов существенно.

6. Составить эскизную технологическую документацию.

РАЗДЕЛ 2. АРХИТЕКТУРА, ТОПОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

2.1 Определение архитектуры и топологии линейки ЛФД

Разработка технологии изготовления твердотельной полупроводниковой структуры начинается с определения архитектуры и топологии, в данном случае, фоточувствительного кристалла, во многом определяемых назначением и условиями эксплуатации конечного изделия. Помимо удовлетворения выдвинутых к разрабатываемой линейке лавинных фотодиодов требований важно учитывать доступность материалов, легирующих примесей и химических реактивов, а также имеющиеся техническую и технологическую базы производственной линии. Это позволит заложить основу не только для изготовления экспериментальных партий разрабатываемой структуры, обладающих заданными параметрами, но и в дальнейшем для введения изделия в устойчивое серийное производство с конкурентноспособным процентом выхода годных.

Существует два варианта создания фоточувствительных кристаллов, определяемых стороной структуры, через которую происходит регистрация падающего излучения, – фронтальная и обратная засветка. Выбор между ними зависит от полупроводника, используемого в качестве подложки, типа прибора, условий эксплуатации и ограничений, связанных как с используемым оборудованием, так и с особенностями задействованных технологических процессов.

Разрабатываемая структура рассчитана на регистрацию оптического излучения с длиной волны 0,85 мкм. Наиболее эффективное поглощение излучения данной длины волны в кремнии происходит на глубине порядка 50 мкм [24]. Создание фоточувствительного кристалла с обратной засветкой, обеспечивающего поглощение излучения на столь малой глубине возможно только с применением утонения полупроводниковой пластины до толщины (70–80) мкм. Это достигается либо химико-механическим абразивным полированием, либо локальным вытравливанием полупроводника в плотной плазме с рабочим газом SF_6 непосредственно под фоточувствительной областью ФЧЭ [25]. Одновременно с этим, такое изготовление фоточувствительного кристалла предполагает проведение процессов фотолитографии с двухсторонним совмещением топологических рисунком на обеих сторонах пластины, что требует крайне высокую точность размещения двух используемых фотошаблонов и полупроводниковой пластины. В обоих случаях пластины становятся более хрупкими, что значительно повышает сложность проведения последующих технологических процессов и

операций и ведет к снижению процента выхода годных кристаллов. По этой причине предпочтение было отдано варианту линейки ЛФД, предполагающему фронтальную засветку фоточувствительных областей.

Архитектура разрабатываемой структуры должна включать полупроводниковую пластину в качестве подложки, карман и стоп-области, активную область, диэлектрические пленки в качестве пассивирующего, изолирующего и просветляющего покрытий и металлические контакты к фоточувствительным площадкам и тыльному контактному слою.

В качестве материала подложки были выбраны пластины эпитаксиального кремния p/p^+ диаметром 76 мм марки 50КДБ/380КДБ0,01(100) производства АО «ЭПИЭЛ». Толщина эпитаксиального слоя составляет 50 мкм, величина его удельного сопротивления – более 1 кОм·см. Данный выбор обусловлен широкой номенклатурой кремниевых приборов, изготавливаемых на интересуемой производственной линии, необходимостью согласования и унификации разрабатываемой технологии изготовления с реализуемыми и распространенностью применения эпитаксиального кремния в промышленной твердотельной фотоэлектронике для регистрации излучения ИК-диапазона.

Формирование высоколегированных областей в полупроводниковой пластине возможно диффузионным легированием и ионной имплантацией. При этом область легирования в первом случае обычно задается предварительно сформированной диэлектрической маской, например, SiO_2, во втором случае – маской фоторезиста. Диффузионное легирование предполагает загонку примеси в приповерхностную область полупроводниковой пластины из источника и последующую ее разгонку вглубь при высоких температурах. При ионной имплантации атомы легирующей примеси бомбардируют поверхность пластины, после чего проводится высокотемпературный термический отжиг, позволяющий разогнать атомы на требуемую глубину пластины. Для формирования высоколегированных областей желательно применение ионной имплантации, позволяющей в купе с процессами фотолитографии и термической разгонки проводить прецизионное локальное легирование различных концентраций в полупроводниковой пластине. В качестве легирующих примесей предпочтительно использование бора и фосфора, широко распространенных для получения областей *p*- и *n*-типа проводимости в кремнии, соответственно [26].

Часто применяемыми диэлектрическими пленками в производстве полупроводниковых изделий фотоэлектроники являются диоксид кремния SiO_2 и нитрид кремния Si_3N_4, выполняющие несколько функций и используемые в качестве пассивирующего и/или просветляющего покрытий. Методы получения данных пленок различны и выбираются с учетом выполняемой функции и согласованности с применяемыми технологическими процессами и операциями в рамках разрабатываемой технологии изготовления. Поскольку легирование

полупроводниковой пластины примесями для формирования областей *n*- и *p*-типа проводимости было принято проводить методом ионной имплантации, неразрывно связанного с проведением высокотемпературной термической обработки для диффузии примеси в объем полупроводника и отжига постимплантационных радиационных дефектов, то возможно объединение разгонки имплантированных областей с формированием просветляющей или пассивирующей пленки фоточувствительного элемента в одном технологическом процессе [27]. Для этого разгонка проводится в последовательности среды сухого и смеси кислорода с парами воды, что позволяет вырастить на поверхности полупроводниковой пластины устойчивую пленку диоксида кремния SiO_2 требуемой стехиометрии, выполняющую одновременно несколько функций. Во-первых, наличие тонкой диэлектрической пленки толщиной в пределах (0,05–0,10) мкм перед процессом ионной имплантации позволит защитить приповерхностный слой полупроводника от нежелательного воздействия разогнанных ионов [28] и, одновременно с этим, обеспечить прохождение ионов примеси через тонкий слой диэлектрика непосредственно к поверхности полупроводниковой пластины. Во-вторых, в процессе термической разгонки это позволит исключить возможность летучести имплантированной примеси с поверхности пластины, а именно обратной диффузии, и снижения ее фактической концентрации в приповерхностном объеме полупроводника. Для разгонки фосфора вклад эффекта обратной диффузии не столь значителен, как в случае разгонки бора. По этой причине при разгонке бора желательно дополнительное применение в качестве пассивирующего покрытия диэлектрика нитрид кремния Si_3N_4, что обосновано наилучшими диэлектрическими свойствами и предотвращение диффузии примеси в слой диэлектрика в процессе длительных разгонок бора.

Помимо этого, на этапе создания архитектуры и топологии важно учесть многоэлементность структуры, а именно вероятность взаимосвязи соседних фоточувствительных элементов и утекание токов по периферии кристалла. Для этого применяются известные технологические приемы, используемые в производстве полупроводниковых матричных фотоприемных устройств на основе кремния. Так, во избежание электрической взаимосвязи фоточувствительных элементов зачастую применяется дополнительная изолирующая диэлектрическая пленка, ограничивающая утечку токов по поверхности пластины. Предотвращение взаимосвязи ФЧЭ в объеме структуры и утекания токов по периферии кристалла достигается за счет формирования высоколегированных стоп-областей или планарных охранных элементов, располагаемых на периферии кристалла, как показано в [29] и [30], или между ФЧЭ, как показано в [31], и ограничивающих распространение электрического поля в рабочем режиме.

Впрочем, создание стоп-областей в фоточувствительных структурах на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости, имеющих пленки SiO_2, не всегда является

достаточным для улучшение фотоэлектрических параметров. Это связано с наличием встроенного положительного заряда в пленках диэлектрика [26]. Одинаковый тип носителей заряда, содержащихся как на поверхности и в объеме полупроводника, так и в диэлектрической пленке, значительно повышает вероятность возникновения инверсионного канала *n*-типа проводимости в приповерхностной области полупроводниковой пластины, электрически связывающего рядом расположенные фоточувствительные элементы. Кроме того, несмотря на вышеупомянутую необходимость наличия пленки нитрида кремния для предотвращения обратной диффузии бора при разгонке имплантированной примеси, Si_3N_4, также как и SiO_2, имеет встроенный положительный заряд.

Альтернативным технологическим приемом в данном случае является дополнительная пассивация пленки диоксида кремния диэлектриком, характеризуемым встроенным отрицательным зарядом, а именно оксидом алюминия Al_2O_3. Обоснование выбора оксида алюминия приведено в подразделе 2.2. Тем не менее, необходимо апробирование структур как с диэлектрической пленкой SiO_2, так и с дополнительным пассивирующим слоем Al_2O_3.

Для формирования контактов к ФЧЭ и тыльному контактному слою известно множество однослойных и многослойных структур. В разрезе разрабатываемой структуры предпочтительно применение золота в качестве основного контактного материала, что определяется необходимостью дальнейшей приварки золотых проволочных проводников к контактным площадкам кристалла, а также его высокой надежностью и стойкостью [3223]. Доступным методом нанесения пленок золота является резистивный метод. Однако золото обладает низкой адгезионной способностью к большинству используемых в серийном производстве диэлектрических покрытий, в том числе к термически выращенным пленкам SiO_2. В связи с этим необходимо наличие дополнительных слоев, обладающих высокой адгезией как к золоту, так и к диэлектрическим пленкам и полупроводникам, присутствующим в структуре. В качестве адгезионного материала к диэлектрику обычно используются активно окисляющиеся металлы, образующие прочную химическую связь с кислородосодержащим слоем кристалла, в данном случае термическим SiO_2. На основе имеющейся технической базы производственной линии доступными адгезионными подслоями золота к диэлектрику являются формируемые процессом магнетронного напыления хром, титан и молибден, которые могут быть нанесены в комбинации с золотом в одном цикле без промежуточной выгрузки из рабочей камеры.

Однако для создания металлического контакта к обратной стороне фоточувствительного кристалла необходимо использование тонкого слоя хрома толщиной не более 0,005 мкм для предотвращения паразитного эффекта поглощения падающего излучения на адгезионном подслое, а напротив его отражения и повторной генерации носителей заряда в рабочей области фоточувствительного кристалла. Итак, в качестве металлических контактов была выбрана одна

из наиболее распространенных в изготовлении полупроводниковых изделий фотоэлектроники композиций – слой золота с подслоем хрома. Для верхнего контакта толщины золота и хрома соответствуют 0,5 мкм и 0,02 мкм, для нижнего контакта – 0,5 мкм и 0,005 мкм, соответственно. Формирование контактных слоев при этом проводится последовательными магнетронным и резистивным методами.

Исходя из вышеизложенного, архитектура разрабатываемой структуры должна включать полупроводниковую пластину эпитаксиального кремния p/p^+-типа проводимости в качестве подложки, карман и стоп-области p-типа проводимости, активную область n^+-типа проводимости, диэлектрические пленки диоксида и нитрида кремния в качестве пассивирующей, изолирующей и просветляющей пленок и двуслойную металлизацию хром-золото к фоточувствительным площадкам и контактному слою с тыльной стороны фоточувствительной структуры. Топология фоточувствительного кристалла содержит 12 планарно расположенных фоточувствительных элементов с площадью каждого 0,12 мм^2.

Полученные вертикальная архитектура и топология структуры линейки лавинных фотодиодов были определены в двух вариациях, различаемыми наличием дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3. Схематичное отображение архитектуры и топологии представлено на рисунке 24.

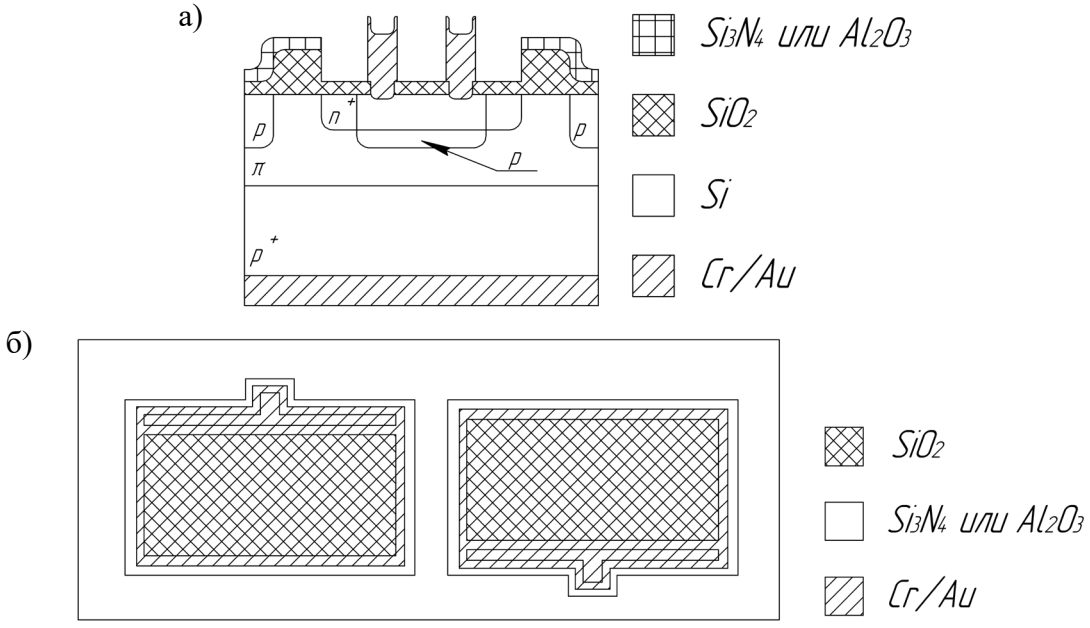


Рисунок 24 – Линейка ЛФД на основе эпитаксиального кремния:
а – вертикальная архитектура; б – топология.

2.2 Пленки Al_2O_3 для пассивации SiO_2

При изготовлении многоэлементных полупроводниковых приборов на пластинах кремния *p*-типа проводимости и применения пленок SiO_2 в качестве изолирующих и просветляющих покрытий высока вероятность возникновения электрической взаимосвязи между планарно расположенными фоточувствительными элементами структуры за счет образования канала инверсного типа проводимости. При этом величина этой электрической взаимосвязи напрямую влияет на годность изготовленного изделия. На практике для изоляция фоточувствительных элементов прибегают к созданию стоп-областей противоположного типа проводимости высокой концентрации, ограничивающих распространение электрического поля и, как следствие, уменьшающие коэффициент взаимосвязи отдельных ФЧЭ. Однако данный технологический прием не всегда является достаточным.

Как упоминалось выше, пленки оксида алюминия обладают встроенным отрицательным зарядом, что делает их наряду с другими пленками, такими как диоксиды гафния и циркония HfO_2 и ZrO_2, перспективными для применения в качестве покрытий, пассивирующих пленку оксида кремния и стабилизирующих встроенный положительный заряд в ней, таким образом улучшая зарядовые свойства на границе раздела диэлектрика с кремнием. Это особенно важно в случае применения в качестве подложки фоточувствительной структуры кремния *p*-типа проводимости.

Известны различные методы формирования пленок Al_2O_3. К их числу относятся атомно-слоевое осаждение, или ADL (Atomic Layer Deposition), ионно-лучевое испарение мишени Al_2O_3, или IBS (Ion-Beam Sputtering), осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы $C_{15}H_{21}AlO_6$, и многие другие. Подробное описание упомянутых методов и характеристик получаемых пленок оксида алюминия представлено в работах [33], [34], [35], соответственно. Однако доступным методом получения таких пленок на имеющейся производственной линии является высокочастотное катодное распыление мишени Al_2O_3. В связи с чем возникла заинтересованность в исследовании электрофизических свойств получаемых данным методом пленок оксида алюминия и возможности их применения для стабилизации зарядовых свойств на границе раздела кремния *p*-типа проводимости и диоксида кремния.

Изучение электрофизических свойств пленок Al_2O_3 проводилось в два этапа. На первом этапе была сформулирована методика эксперимента, а также изготовлены и исследованы образцы с однослойными диэлектрическими пленками в виде МДП-структур. Второй этап заключался в апробации полученных результатов и исследовании характеристик

многоэлементного *p-i-n* фотодиода с однослойной пленкой SiO_2 и с дополнительной пассивирующей пленкой Al_2O_3.

2.1.1 Изготовление образцов

Для изготовления образцов были использованы пластины кремния *p*-типа проводимости диаметром 60 мм и ориентацией (111). Условно пластины разделялись на относительно низкоомные, удельное сопротивление которых составляло 4,5 Ом·см, и высокоомные – с удельным сопротивлением, равным 5 кОм·см. Пластины проходили химическую обработку в аммиачно-перекисном растворе для удаления загрязнений и удаления собственного окисла на поверхности, после чего следовало термическое окисление для формирования пленок SiO_2 различных толщин или формирование пленок Al_2O_3 методом высокочастотного катодного распыления. Перед осаждением пленок оксида алюминия камера откачивалась до достижения давления, соответствующему $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ бар, а между мишенью материала и подложкодержателем на катод подавалась мощность 300 Вт для формирования тлеющего разряда. Длительность осаждения для получения пленки оксида алюминия толщиной 0,14 мкм составляла 15 мин.

Контроль характеристик полученных диэлектрических пленок проводился посредством измерений толщины и показателя преломления с использованием контактного профилометра Dektak XT и оптического эллипсометра ЛЭФ-3М-1. При этом показатель преломления пленок SiO_2 лежал в диапазоне (1,45–1,46), пленок Al_2O_3 – (0,13–0,14), что полностью соответствует литературным данным, приведенным в [36] и [37].

В качестве металлического контакта изготовленных образцов выступал слой хрома толщиной 0,05 мкм, сформированный методом магнетронного напыления и выделенный фотолитографическим способом с диаметром контактной площадки, равным 1 мм. Напыление проводилось на установке Leybold Heraeus L-560.

В таблице 4 приведены составы изготовленных образцов.

Таблица 4 – Образцы

Образец	Удельное сопротивление пластины	Толщина пленки SiO_2	Толщина пленки Al_2O_3
1	2	3	4
№ 1	4,5 Ом·см	0,10 мкм	–

Окончание таблицы 4.

1	2	3	4
№ 2	4,5 Ом·см	0,36 мкм	–
№ 3	4,5 Ом·см	–	0,14 мкм
№ 4	4,5 Ом·см	0,10 мкм	0,14 мкм
№ 5	4,5 Ом·см	0,36 мкм	0,14 мкм
№ 6	5,0 кОм·см	0,10 мкм	–
№ 7	5,0 кОм·см	0,36 мкм	–
№ 8	5,0 кОм·см	–	0,14 мкм
№ 9	5,0 кОм·см	0,10 мкм	0,14 мкм
№ 10	5,0 кОм·см	0,36 мкм	0,14 мкм

Термическое окисление пластин проводилось в однозонной диффузионной печи СДОМ-3/100, нанесение пленок оксида алюминия – на установке Leybold Heraeus Z-400 с использованием высокочастотного источника энергии, предназначенной для напыления диэлектрических пленок методом ВЧ-катодного распыления соответствующей мишени.

На рисунке 25 приведена схема диффузионной печи, на рисунке 26 – схема установки.

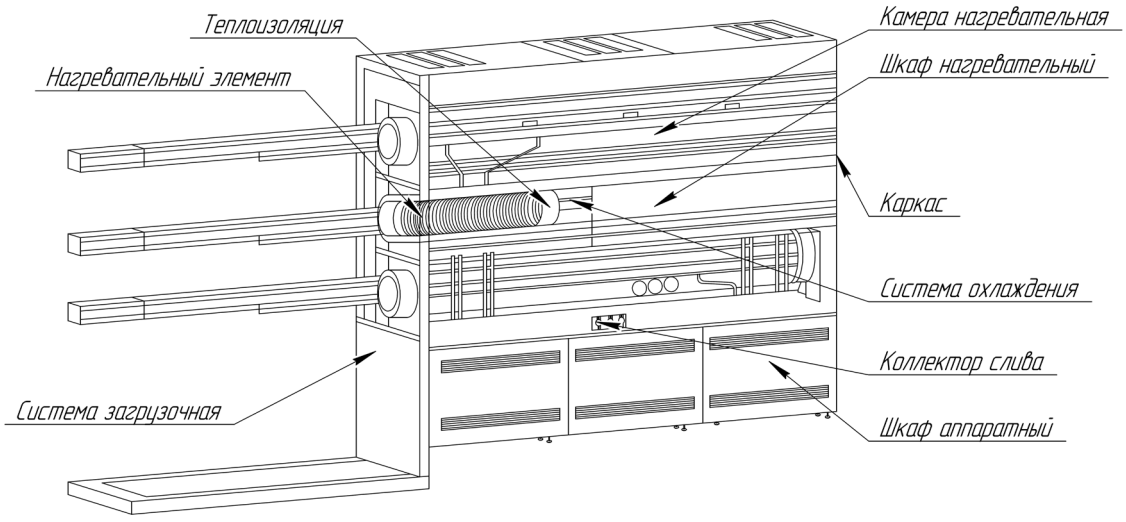


Рисунок 25 – Схема однозонной диффузионной печи СДОМ-3/100

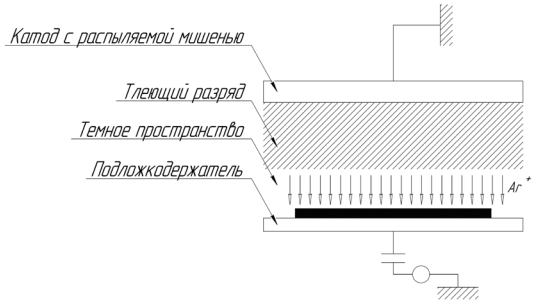
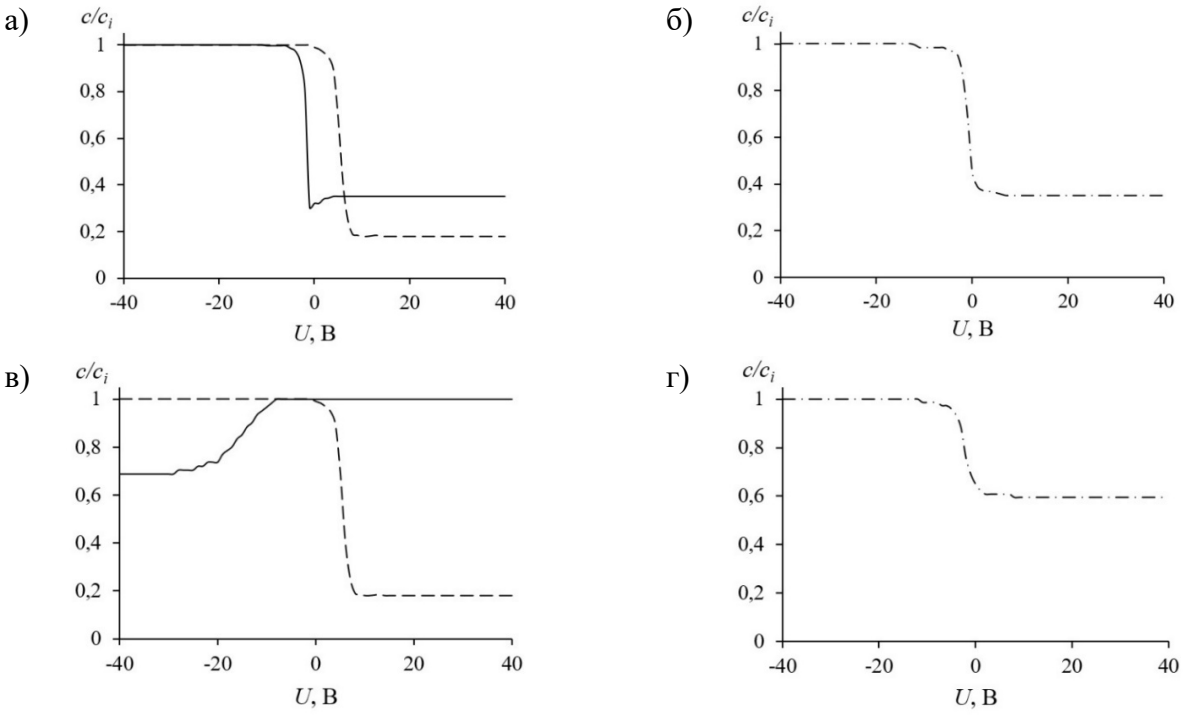


Рисунок 26 – Схема установки Leybold Heraeus Z-400

2.1.2 Исследование образцов

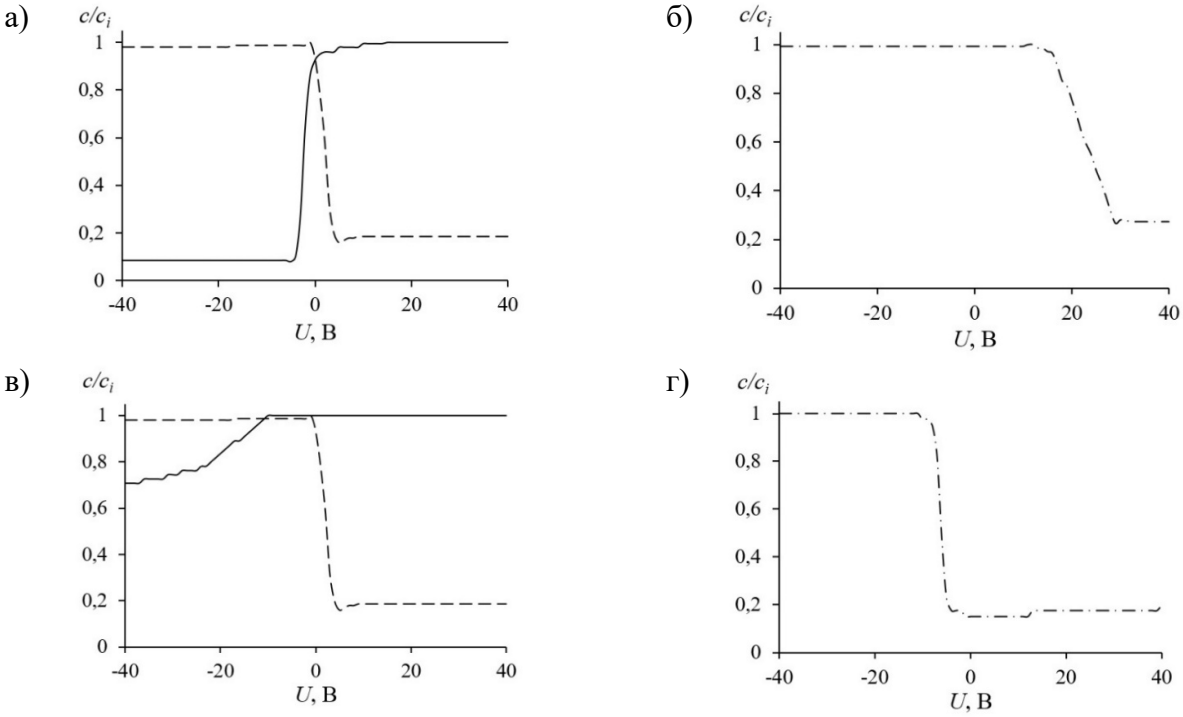
Изучение электрофизических параметров образцов с диэлектрическими пленками проводилось посредством измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик на измерителе 4277ALCZ фирмы Hewlett Packard. Диапазон напряжений составлял от минус 40 В до 40 В, а частота измерений – 10 кГц.

Полученные нормированные высокочастотные CV-характеристики для всех образцов представлены на рисунке 27 и рисунке 28.



Сплошная линия – граница SiO_2/*p*-Si, пунктирная линия – границы Al_2O_3/*p*-Si.

Рисунок 27 – Нормированные высокочастотные CV-характеристики образцов № 1–5: а – образцы № 1 и № 3; б – образец № 4; в – образцы № 2 и № 3; г – образец № 5.



Сплошная линия – граница SiO_2/p-Si, пунктирная линия – границы Al_2O_3/p-Si.

Рисунок 28 – Нормированные высокочастотные CV-характеристики образцов № 6–10:
а – образцы № 6 и № 8; б – образец № 9; в – образцы № 7 и № 8; г – образец № 10.

На основе нормированных CV-характеристик возможно определить напряжение плоских зон U_{FB} и рассчитать эффективную плотность поверхностного заряда Q_{SS} по следующей формуле (30) [38]:

$$Q_{ss} = c_i \frac{(\varphi_{ms} - U_{FB})}{e \cdot A}, \quad (30)$$

где c_i – емкость пленки;

φ_{ms} – разница работ выхода материалов хром и кремний;

U_{FB} – напряжение плоских зон;

e – заряд электрона;

A – площадь электрода.

По справочным данным в [39] и [40] работы выхода хрома и кремния одинаковые.

Рассчитанные электрофизические параметры однослойных диэлектрических пленок в соответствии с формулой (30) приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Электрофизические параметры диэлектрических пленок

Образец	Напряжение плоских зон U_{FB}, В	Эффективная плотность поверхностных состояний Q_{SS}, см$^{-2}$
1	2	3
№ 1	–1,8	$4{,}3\cdot10^{11}$
№ 2	–12,3	$6{,}5\cdot10^{11}$
№ 3	4,2	$-1{,}8\cdot10^{12}$
№ 6	–4,0	$8{,}6\cdot10^{11}$
№ 7	–19,8	$1{,}0\cdot10^{12}$
№ 8	5,0	$-2{,}1\cdot10^{12}$

Измеренные высокочастотные CV-характеристики на рисунке 27 показывают, что на образце № 1, изготовленном на подложке низкоомного кремния, с однослойной пленкой диоксида кремния толщиной 0,10 мкм образование канала инверсного типа проводимости не наблюдается. При этом режим обогащения достигается в области отрицательных напряжений, что свидетельствует о дырочном типе проводимости поверхности кремниевой пластине. Это справедливо и для образцов, изготовленных на подложках с таким же удельным сопротивлением – № 3 с однослойной пленкой оксида алюминия толщиной 0,14 мкм и № 4 с двухслойной пленкой SiO_2 (0,10 мкм) и Al_2O_3 (0,14 мкм). Однако на образце № 2 однослойной пленкой диоксида кремния толщиной 0,36 мкм режим обогащения достигается в области положительных смещений, что свидетельствует об электронном типе проводимости поверхности кремниевой пластины и, как следствие, образовании инверсионного канала в приповерхностной области. Предотвращение образования канала инверсного типа проводимости наблюдается на образце № 5 с двухслойной пленкой SiO_2 (0,36 мкм) и Al_2O_3 (0,14 мкм), из чего можно сделать вывод о компенсации встроенного положительного заряда в пленке диоксида кремния встроенным отрицательным зарядом пленки оксида алюминия.

На образцах, изготовленных на подложке высокоомного кремния, картина иная. Образование инверсного слоя видно на всех образцах с однослойной пленкой SiO_2 (№ 6 и № 7). При этом данный слой имеет большую толщину на образце с пленкой диоксида кремния толщиной 0,36 мкм, что определяется большей величиной напряжения спада CV-характеристики. Однако, судя по вольт-фарадным характеристикам, на образцах № 8 с однослойной пленкой Al_2O_3 толщиной 0,14 мкм, № 9 с двухслойными пленками SiO_2 (0,10 мкм) и Al_2O_3 (0,14 мкм) и № 10 с двухслойными пленками SiO_2 (0,36 мкм) и Al_2O_3 (0,14 мкм) канал инверсного типа проводимости отсутствует.

2.1.3 Применимость в технологиях изготовления фотодиодных структур

Для апробации полученных результатов и изучения применимости дополнительной пассивации термических пленок SiO_2 пленкой Al_2O_3, полученной методом ВЧ-катодного распыления, в технологиях изготовления фотодиодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости были изготовлены и исследованы многоэлементные *p-i-n* фотодиоды.

Данные многоэлементные *p-i-n* фотодиоды изготавливаются на пластинах кремния с удельным сопротивлением 5 кОм·см, ориентацией (111) и диаметром 60 мм. Топология фотодиода содержит 8 фоточувствительных площадок, расположенных в четырех квадрантах, при этом 4 внешние и 4 внутренние площадки вписаны в концентрические окружности диаметром 4 мм и 2 мм, соответственно. Площадь фоточувствительных площадок равны 18 мм^2 – внешней ФЧП, и 0,6 мм^2 – внутренней ФЧП. Ширина зазора между ФЧП составляет 200 мкм. Также топология фотодиода имеет охранный элемент в виде планарного n^+-*p* перехода. В качестве пассивирующей периферию кристалла и изолирующей фоточувствительные площадки пленок применяется термически осажденный SiO_2 [41]. На рисунке 29 представлен топологический рисунок фотодиода в соответствии с [42].

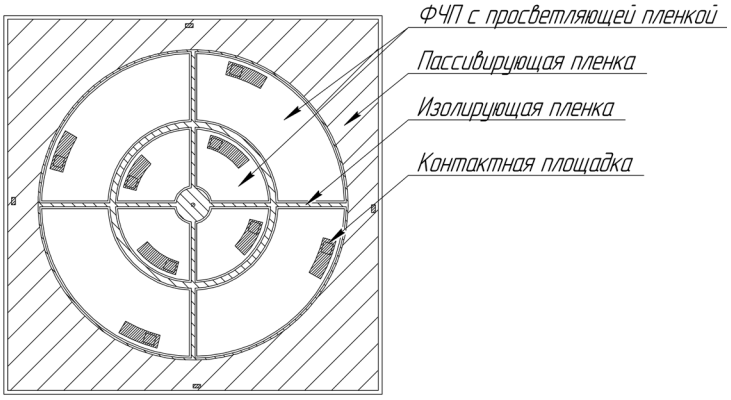


Рисунок 29 – Топология многоэлементного *p-i-n* фотодиода

Стандартная технология изготовления кристалла данного многоэлементного *p-i-n* фотодиода включает следующие основные этапы:

1. термическое окисление;

2. ионно-диффузионное легирование фосфором для создания высоколегированных областей фоточувствительных площадок и охранного кольца;

3. ионно-диффузионное легирование фосфором в обратную сторону пластины для формирования геттерирующего слоя;

4. удаление геттерирующего слоя;

5. ионно-диффузионное легирование бором для создания тыльного контактного слоя p^+-типа проводимости;

6. формирование двухслойных металлических контактов к фоточувствительным площадкам, охранному элементу и тыльному контактному слою p^+-типа проводимости.

По описанной технологии были изготовлены две партии фоточувствительных кристаллов. Другие две партии кристаллов фотодиода были изготовлены по измененной технологии, включающей формирование пассивирующей пленки оксида алюминия толщиной 0,14 мкм непосредственно поверх пленки термического SiO_2 над периферийной областью кристалла, зазорами между внешними и внутренними фоточувствительными площадками и охранным элементом. Таким образом достигалась дополнительная пассивация как пассивирующей термической пленки, так и изолирующей. Вертикальные архитектуры фотодиодов, изготовленных по стандартной и измененной технологии, на примере двух фоточувствительных площадок представлены на рисунке 30.

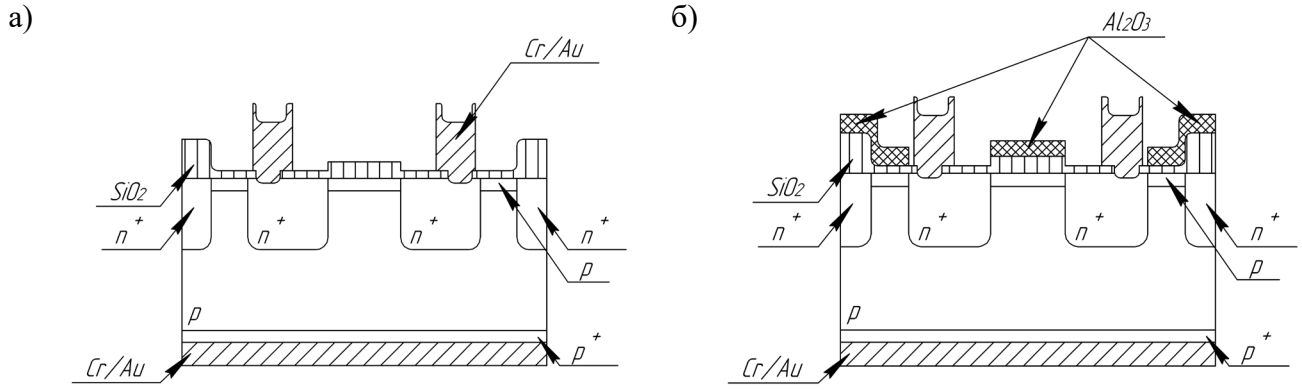


Рисунок 30 – Вертикальная архитектура многоэлементного *p-i-n* фотодиода:
а – изготовленного по стандартной технологии; б – изготовленного по измененной технологии.

На изготовленных кристаллах многоэлементного *p-i-n* фотодиода зондовым методом на измерительной системе Karl Suss PM-5 были измерены темновые токи внешних и внутренних фоточувствительных площадок и охранного элемента. Рабочее напряжение рассматриваемого фотодиода соответствует 200 В. Помимо этого, проведено измерение сопротивление изоляции между фоточувствительными площадками $R_{из}$, величина которого должна быть не менее 100 МОм в соответствии с требованием, выдвигаемым к данному фотодиоду. Типовые значения измеренных параметров приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Типовые значения

Технология изготовления	Параметр				
	$I_т$ (внешние ФЧП), нА	$I_т$ (внутренние ФЧП), нА	$I_т$ (охранное кольцо), нА	$R_{из}$, МОм	Процент выхода годных, %
1	2	3	4	5	6
Стандартная технология	60–90	8–10	700–1000	95–110	30
Измененная технология	30–75	3–8	200–750	100–130	48

Результаты, отраженные в таблице 6, показывают, что пассивация оксидом алюминия привела к снижению типовых диапазоном темновых токов изготовленных фотодиодов. При этом при сравнении с фотодиодами, изготовленными по стандартной технологии, наблюдается, что нижняя граница типового диапазона темновых токов внешних фоточувствительных площадок уменьшилась в 2 раза, внутренних – в 2,6 раз, а диапазон значений охранного кольца – в 3,5 раза.

Кроме того, диапазон значений $R_{из}$ кристаллов, изготовленных по измененной технологии, в полной мере соответствует требованию, выдвигаемому данному многоэлементному *p-i-n* фотодиоду, что в совокупности с улучшениями темновых токов привело к повышению процента выхода годных кристаллов на 18 %. Полученные результаты были представлены в [43].

2.3 Быстрый термический отжиг

Состояние границы раздела SiO_2/Si для многоэлементных фоточувствительных кристаллов, изготовленных на основе кремния *p*-типа проводимости, влияет не только на образование инверсного канала, электрически связывающего планарно расположенные фоточувствительные элементы, но и на электрофизические параметры всей структуры. В частности, на уровень обратного темнового тока, что является важной характеристикой для фотодиодных структур, в том числе разрабатываемой линейки ЛФД.

Известными технологическими приемами для улучшения контактных свойств являются термическая обработка, позволяющая запечатать структурные дефекты на поверхности полупроводниковой пластины и, таким образом, уменьшить величину плотности поверхностных состояний, и создание высоколегированной области под контактом. В изготовлении полупроводниковых структур подлегирование зачастую применяется для создания омического

контакта к тыльной стороне кристалла. Осуществление подлегирования приконтактной области для лицевой стороны кристалла требует дополнительного маскирования готовой структуры, что ведет к необходимости проведения нескольких технологических процессов и операций, а также высокотемпературной обработки для активации имплантированной примеси на глубину залегания других легированных областей в объеме пластины. В связи с этим необходим поиск иного решения, улучшающего контактные свойства фотодиодных структур.

Поверхностные состояния на границе раздела оксида кремния и кремния *p*-типа проводимости вносят вклад в обратный темновой ток фотодиодов по большей части за счет встроенного положительного заряда пленки SiO_2 и оборванных кремниевых связей. Компенсация этого встроенного заряда может уменьшить плотность поверхностных состояний. Стабилизацию оборванных Si-связей можно достичь посредством их насыщения, например, водородом [44]. При этом образование связей между кремнием и водородом не требует инициирования высокотемпературной обработкой, что является технологическим преимуществом. В связи с этим необходимо изучить воздействие импульсного термического отжига в среде водорода на обратный темновой ток фотодиодов на основе кремния *p*-типа проводимости.

Кроме того, быстрый термический отжиг может оказать благотворное влияние на свойства омического контакта диодов на основе кремния, а именно – уменьшить удельное контактное сопротивление. Технологическая сложность формирования омических контактов в кремниевых диодных структурах в первую очередь связана с состоянием границы раздела полупроводника и металлизации.

Негативное влияние на состояние границы Si/Me оказывает как собственный окисел, образующийся на поверхности пластины кремния, так и сложные металлические фазы, сопротивления которых обычно выше сопротивления входящих в состав многослойных структур металлов. Собственный окисел обычно удаляется посредством проведения плазмохимической обработки (ПХО) непосредственно перед осаждением металлических слоев в рабочей камере. Предотвратить образование металлических фаз практически невозможно. Это может быть связано с особенностями формирования металлических слоев на поверхности структуры или с последующими технологическими операциями, например приваркой выводов к контактным площадкам, сопровождаемой локальным высокотемпературным нагревом [45]. Однако силициды переходных металлов обладают низким сопротивлением, что показано в [46] и [47]. К таким металлам относятся титан, никель, палладий и хром, широко применяемые в полупроводниковой промышленности в качестве адгезионных подслоев к золоту. Дополнительное термическое воздействие на диоды с нанесенными контактными слоями, в состав которых входит один из перечисленных переходных металлов, может качественно

улучшить контактные свойства и, как следствие, снизить удельное контактное сопротивление. В качестве такого термического воздействия может быть применен БТО.

Таким образом, необходимо исследовать влияние импульсного термического отжига в среде водорода на параметры как диодных, так и фотодиодных структур на основе кремния *p*-типа проводимости и оценить применимость и универсальность процесса в технологиях их изготовления.

2.3.1 Применимость в технологиях изготовления диодных структур

2.3.1.1 Изготовление образцов

Для изучения влияния БТО на удельное контактное сопротивление диодных структур был применен LTLM-метод (Transmission Line Method) с линейной геометрией контактов к полупроводнику. LTLM-метод является одним из наиболее распространенных и используется для измерения малых сопротивлений с учетом токов растекания в объеме полупроводника непосредственно в приконтактной области [48]. Суть метода заключается в определении удельного контактного сопротивления посредством зондовых измерений полного сопротивления между соседними прямоугольными контактными площадками, расположенными на различном расстоянии друг от друга. При этом длина контактной площадки должна быть значительно меньше ее ширины [49]. Также известна модификация данного метода – CTLM-метод с круговой геометрией контактов к полупроводнику, описание которого приведено в работах [50] и [51].

В качестве подложек образцов были использованы пластины кремния *n*-типа проводимости диаметром 60 мм. Создание приповерхностной высоколегированной области *p*-типа проводимости осуществлялось ионной имплантацией примеси бора с энергией ускоренных ионов 100 кэВ и дозой облучения $6{,}0 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$. Далее следовало формирование металлической структуры для возможности измерения сопротивлений упомянутым LTLM-методом. Для этого на поверхность пластин последовательно осаждались пленки титана и золота магнетронным и резистивным методами толщинами 0,02 мкм и 0,5 мкм, соответственно. Контроль толщин слоев металлизации осуществлялся на контактном профилометре Bruker Dektak 3030. Выделение площадок проводилось фотолитографическим методом, позволяющим получить 6 одинаковых контактных площадок размером 100 мкм х 1000 мкм, расположенных на расстояниях друг от

друга от 10 мкм до 550 мкм, как показано на рисунке 31 в таблице 7, где нижний индекс соответствует номерам близлежащих площадок.

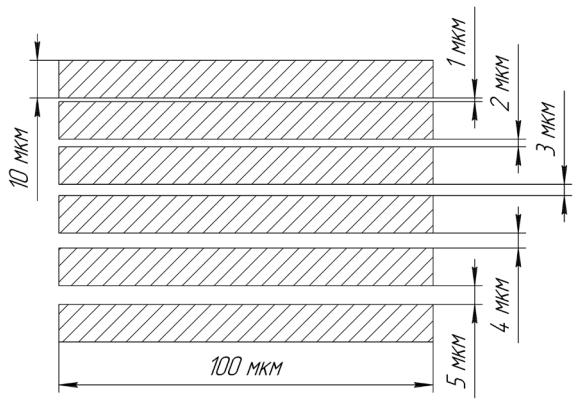


Рисунок 31 – Топология образца для LTLM-метода

Таблица 7 – Расстояния между контактными площадками

№ п/п	Контактные площадки	Расстояние, мкм	№ п/п	Контактные площадки	Расстояние, мкм
1	2	3	4	5	6
1	L_{12}	10	9	L_{26}	440
2	L_{13}	130	10	L_{34}	30
3	L_{14}	230	11	L_{35}	170
4	L_{15}	400	12	L_{36}	320
5	L_{16}	550	13	L_{45}	40
6	L_{23}	20	14	L_{46}	190
7	L_{24}	150	15	L_{56}	50
8	L_{25}	290	–	–	–

Также в качестве образцов были изготовлены 4 партии ограничительных диодов p^+-n с малой площадью контакта к области p^+-типа проводимости, равной 0,002 мм^2. Полупроводниковым материалом которых является пластина эпитаксиального кремния марки 50КЭФ150/380КЭС0,01 с диаметром 60 мм и ориентацией (100). Топология ограничительного диода представлена на рисунке 32 в соответствии с [52].

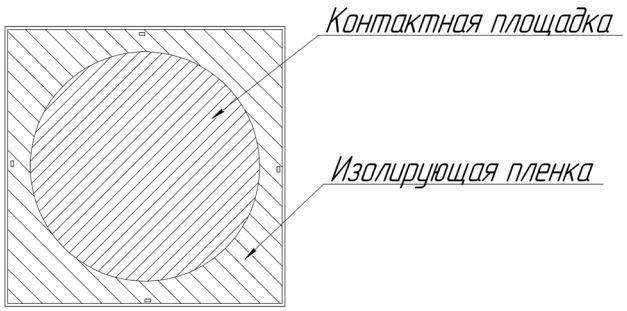


Рисунок 32 – Топология ограничительного диода p^+-n

Стандартное изготовление ограничительных диодов включает следующие основные технологические этапы:

1. термическое окисление для создания пассивирующей пленки;

2. ионно-диффузионное легирование фосфором для формирования стоп-области n^+-типа проводимости;

3. ионно-диффузионное легирование фосфором в обратную сторону пластины для формирования приконтактного слоя n^+-типа проводимости;

4. ионно-диффузионное легирование бором для формирования области p^+-типа проводимости;

5. формирование металлических контактов к эмиттеру диода и тыльному контактному слою n^+-типа проводимости.

Вертикальная архитектура получаемой диодной структуры представлена на рисунке 33.

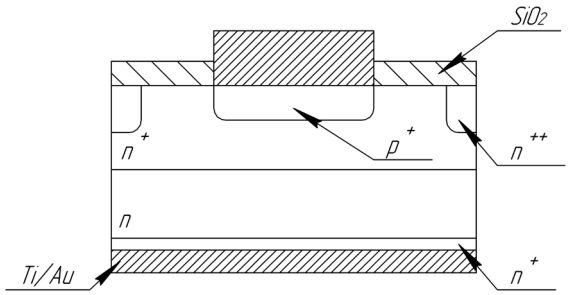


Рисунок 33 – Вертикальная архитектура ограничительного диода p^+-n

Изготовленные образцы и две партии ограничительных диодов подвергались быстрому термическому отжигу в вакуумной печи оплавления RSO-650-200 NPO, имеющей 18 инфракрасных ламп мощностью 18 кВт, поддерживающих широкий диапазон температур от 50 °C до 650 °C. Установка обеспечивает высокую скорость нагрева более 75 °C/c.

Температура БТО должна быть значительно ниже температур плавления материалов, входящих в состав двухслойной металлизации. Температура плавления титана равна 1668 °C,

температура плавления золота – 1337 °С по данным в работах [53], [54] и [55]. Таким образом, на образцах для измерения LTLM-методом быстрый термический отжиг проводился в следующих режимах:

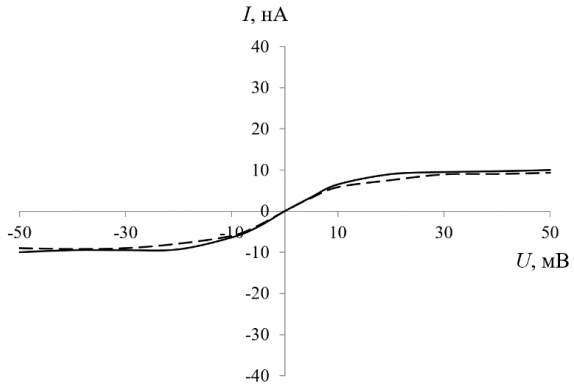
- при температуре 300 °С в течение 30 с;
- при температуре 320 °С в течение 30 с;
- при температуре 340 °С в течение 10 с;
- при температуре 340 °С в течение 20 с;
- при температуре 340 °С в течение 30 с;
- при температуре 360 °С в течение 10 с.

Режим проведения БТО на двух партиях ограничительного диода определялся после расчета минимального удельного контактного сопротивления LTLM-методом и выбора оптимального.

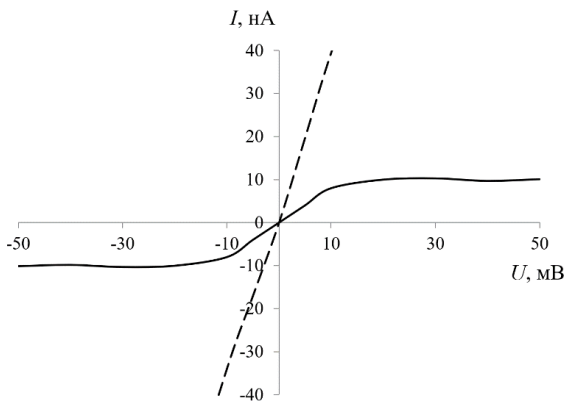
2.3.1.2 Исследование образцов

Исследование образцов для LTLM-метода заключалось в измерение ВАХ посредством зондовых измерений с использованием измерителя 4277ALCZ Hewlett Packard в диапазоне напряжений от минус 50 В до 50 В до и после проведения импульсной термической обработки. Перед проведением БТО вольт-амперная характеристика всех образцов была нелинейна даже при малых напряжениях. Термическая обработка при температурах 300 °С и 320 °С не привела к выпрямлению ВАХ образцов. Линейность и симметричность ВАХ достигались после проведения БТО при температурах, начиная с 340 °С. Однако при температуре 360 °С визуально наблюдались зачатки отслоения пленки золота от адгезионного подслоя титана. Вероятно, это связано с большой разницей их тепловых коэффициентов линейного расширения (ТКРЛ) в 1,5 раза: ТКРЛ золота лежит в диапазоне $(13{,}3 \div 14{,}5) \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$, ТКРЛ титана – в пределах $(7{,}23 \div 8{,}82) \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$ по данным в работах [54] и [55]. Типичный вид ВАХ приведен на рисунке 34.

а)



б)



Сплошная линия – после формирования металлизации;

пунктирная линия – после проведения БТО.

Рисунок 34 – Типичный вид ВАХ образцов:

а – нелинейная; б – линейная.

Для определения величины удельного контактного сопротивления образцов с прямой ВАХ необходимо измерить сопротивления между всеми контактными площадками образца и построить зависимость от расстояния между ними. Угол наклона получаемой зависимости равен R_s/A, где R_s – сопротивление приконтактной области полупроводника, A – длина контактной площадки. Линейная аппроксимация полученной зависимости позволит определить величину удельного контактного сопротивления по следующим формулам (31) и (32):

$$R_T = 2R_C + R_S\left(\frac{L}{Z}\right), \tag{31}$$

$$\rho_C = \frac{R_C^2 \cdot Z^2}{R_S}, \tag{32}$$

где R_C – сопротивление контакта;

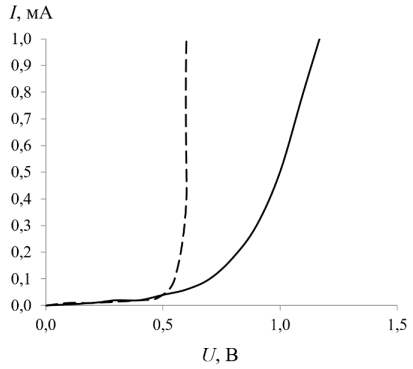
Z – ширина контактной площадки.

В результате были рассчитаны следующие средние значения удельного контактного сопротивления образцов, имеющие линейные и симметричные ВАХ:

1. БТО при температуре 340 °С в течение 10 с: $9 \cdot 10^{-3}$ Ом·см^2;
2. БТО при температуре 340 °С в течение 20 с: $7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см^2;
3. БТО при температуре 340 °С в течение 30 с: $7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см^2;

По полученным результатам оказывается, что минимальная величина удельного контактного сопротивления достигается на образцах в случае проведения импульсного термического отжига в режиме 2.

В данном режиме были обработаны две партии ограничительных диодов, после чего на всех изготовленных кристаллах зондовым методом были измерены прямые ветви вольт-амперной характеристики. Диапазон напряжений измерений соответствовал рабочему – от 0 В до 1,2 В. Типичный вид прямой ветви ВАХ партий диодов, изготовленных по стандартной и измененной технологиям, представлен на рисунке 35.



Сплошная линия – изготовление по стандартной технологии;
пунктирная линия – изготовление по измененной технологии

Рисунок 35 – Типичный вид прямой ветви ВАХ ограничительного диода

В соответствии с требованиями для рассматриваемого диода последовательное сопротивление должно быть не более 0,8 кОм. Типовой диапазон последовательного сопротивления ограничительных диодов, изготовленных по стандартной технологии, соответствовал диапазону (1,2–1,3) кОм, в то время как аналогичный параметр диодов, изготовленных по измененной технологии, соответствовал диапазону (0,6–0,7) кОм. Процент выхода годных диодов по стандартной технологии равен 75 %, по измененной – 90 %. Таким образом, проведение быстрого термического отжига в заданном режиме позволило повысить процент выхода годных на 15 %. Полученные результаты были представлены в [56].

2.3.2 Применимость в технологиях изготовления фотодиодных структур

2.3.2.1 Изготовление образцов

В качестве исследуемой структуры выступал описанный в подразделе 2.1.3 многоэлементный *p-i-n* фотодиод. Всего было изготовлено две партии фотодиодов,

отличающиеся маршрутом изготовления. Вторая партия фотодиодов включала быстрый термический отжиг в среде водорода непосредственно после вскрытия контактных окон и перед формированием двухслойной металлизации. Температура импульсного термического отжига должна быть значительно ниже температур плавления материалов, входящих в состав двухслойной металлизации, и достаточной для образования кремний-водородных связей. Температура плавления хрома равна 1877 °С, температура плавления золота – 1337 °С [54]. Таким образом были выбраны следующие параметры для разных режимов быстрого термического отжига:

— 340 °С в течение 20 с;
— 400 °С в течение 20 с;
— 450 °С в течение 5 с;
— 470 °С в течение 5 с;
— 500 °С в течение 5 с.

2.3.2.2 Исследование образцов

На изготовленных кристаллах многоэлементного *p-i-n* фотодиода зондовым методом на измерительной системе PM-5 Karl Suss были измерены темновые токи внешних и внутренних фоточувствительных площадок, а также охранного элемента. Рабочее напряжение фотодиода равно 200 В.

Результаты измерений показали, что фоточувствительные кристаллы, прошедшие импульсный термический отжиг при температурах 340 °С и 400 °С, по уровню темновых токов не отличались от фоточувствительных кристаллов из первой партии фотодиодов. Уменьшение темновых токов наблюдалось на всех изготовленных кристаллах, дополнительно термически обработанных при температурах выше в диапазоне (450–500) °С. При этом наиболее эффективное влияние быстрого термического отжига достигалось при температуре 450 °С.

В таблице 8 приведено сравнение типовых значений темновых токов внешних и внутренних фоточувствительных площадок, охранного элемента и процента выхода годных фотодиодов, изготовленных по стандартной технологии, и фотодиодов, изготовленных по измененному маршруту, включающему БТО при температуре 450 °С в течение 5 с.

Таблица 8 – Типовые значения

Технология изготовления	Параметр			
	$I_т$ (внешние ФЧП), нА	$I_т$ (внутренние ФЧП), нА	$I_т$ (охранное кольцо), нА	Процент выхода годных, %
1	2	3	4	5
Стандартная технология	60–90	8–10	700–1000	30
Измененная технология	40–75	5–8	250–800	45

Полученные результаты показывают, что быстрый термический отжиг привел к снижению нижней границы диапазона темновых токов внешних фоточувствительных площадок в 1,5 раза, внутренних фоточувствительных площадок – в 1,6 раза в сравнении с аналогичными параметрам изготовленных по стандартной технологии фотодиодов. При этом удалось достигнуть повышения процента выхода годных кристаллов на 15 %. Полученные результаты были представлены в [57].

2.4 Выводы по разделу 2

В результате проведенных в данном разделе технологических работ было получено следующее:

1. В связи с технологической сложностью изготовления фоточувствительных кристаллов с утонением полупроводниковой подложки, что необходимо в случае реализации структуры с обратной засветкой, выбраны и определены топология и архитектура фоточувствительного элемента с фронтальной засветкой в двух вариациях, различаемых наличием дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3.

2. В рамках поиска технологических решений изучено влияние низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на электрофизические параметры как диодных, так и фотодиодных структур.

3. Показано и апробировано на примере серийно выпускаемого ограничительного диода p^+-n на основе кремния с малой площадью контакта, что БТО в среде H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с позволяет снизить удельное контактное сопротивление диодных структур вследствие инициации образования низкотемпературных силицидов титана и повысить процент выхода годных кристаллов.

4. Показано и апробировано на примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p-i-n* фотодиода на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости, что БТО в среде H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с позволяет снизить уровень темновых токов фотодиодных структур вследствие насыщения оборванных Si-связей водородом и повысить процент выхода годных кристаллов.

5. В рамках поиска технологических решений изучены свойства пленки Al_2O_3, полученной методом ВЧ-катодного распыления, и ее потенциал для стабилизации зарядовых свойств на границе раздела SiO_2/*p*-Si и предотвращения образования инверсного канала в приповерхностной области эпитаксиальной подложки.

6. Показано и апробировано на примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p-i-n* фотодиода на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости, что пленка Al_2O_3, сформированная методом ВЧ-катодного распыления, толщиной 0,14 мкм стабилизирует встроенный положительный заряд пленки SiO_2 толщиной 0,18 мкм на границе раздела с высокоомным кремнием *p*-типа проводимости, таким образом предотвращая образование канала инверсного типа проводимости, ухудшающего уровень темновых токов и сопротивление изоляции планарно расположенных фоточувствительных элементов.

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Маршрут изготовления определяет последовательность технологических процессов и операций, позволяющий сформировать на полупроводниковой пластине требуемую фоточувствительную структуру. В соответствии с основами, заложенными в подразделе 2.1, необходимо выстроить эскизный маршрут изготовления таким образом, чтобы были учтены все особенности применяемых технологических процессов и операций.

В общем виде технологический маршрут изготовления полупроводниковых фоточувствительных структур должен содержать:

— операции химической обработки пластин как перед, так и после технологических процессов;

— процессы фотолитографии, позволяющие сформировать необходимую топологию кристалла;

— процессы ионной имплантации, позволяющие легировать приповерхностную область полупроводниковой пластины для получения областей *n*- и *p*-типа проводимости;

— процессы термической обработки имплантированной примеси для разгонки примеси необходимой концентрации на требуемую глубину;

— процессы получения диэлектрических пленок;

— процессы нанесения металлических пленок для формирования контактов к ФЧЭ и тыльному контактному слою.

Поскольку на данном этапе определены две вариации вертикальной архитектуры фоточувствительного кристалла, отличающиеся наличием дополнительной диэлектрический пленки Al_2O_3 для стабилизации зарядовых свойств на границе раздела Si/SiO_2, необходимо составление двух технологических маршрутов изготовления. Дальнейшее сравнение как электрофизических характеристик изготовленных по каждому технологическому маршруту партий фоточувствительных кристаллов, так и технологическая оценка их применимости на заданной производственной линии позволят определить оптимальный маршрут.

Схематичное отображение изменения полупроводниковой пластины в процессе технологического маршрута изготовления фоточувствительного кристалла линейки лавинных фотодиодов представлено на рисунке 36 и с дополнительной пассивацией пленкой Al_2O_3 рисунке 37.

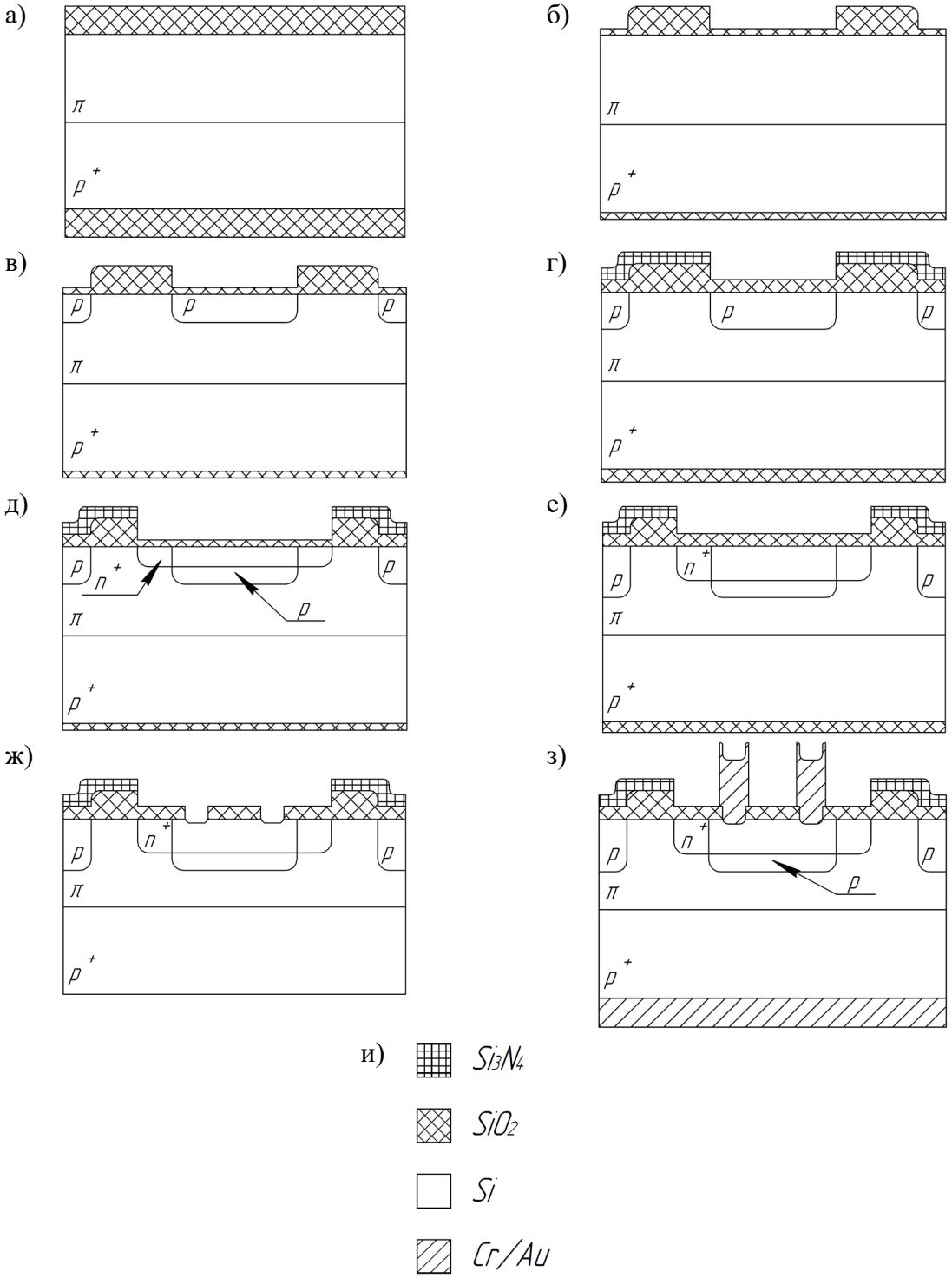


Рисунок 36 – Эскиз технологического маршрута изготовления:
а – сухое окисление 0,18 мкм; б – фотолитография для формирования областей *p*-типа проводимости; в – создание кармана и стоп-областей *p*-типа методом ионной имплантации; г – термическое осаждение пленки Si_3N_4 и длительная разгонка имплантированной примеси; д – фотолитография для формирования области *n*-типа проводимости и ионная имплантация примеси фосфора; е – разгонка имплантированной примеси; ж – вскрытие контактных окон в диэлектрической пленке; з – создание контактов к ФЧЭ и тыльному контактному слою; и – расшифровка слоев.

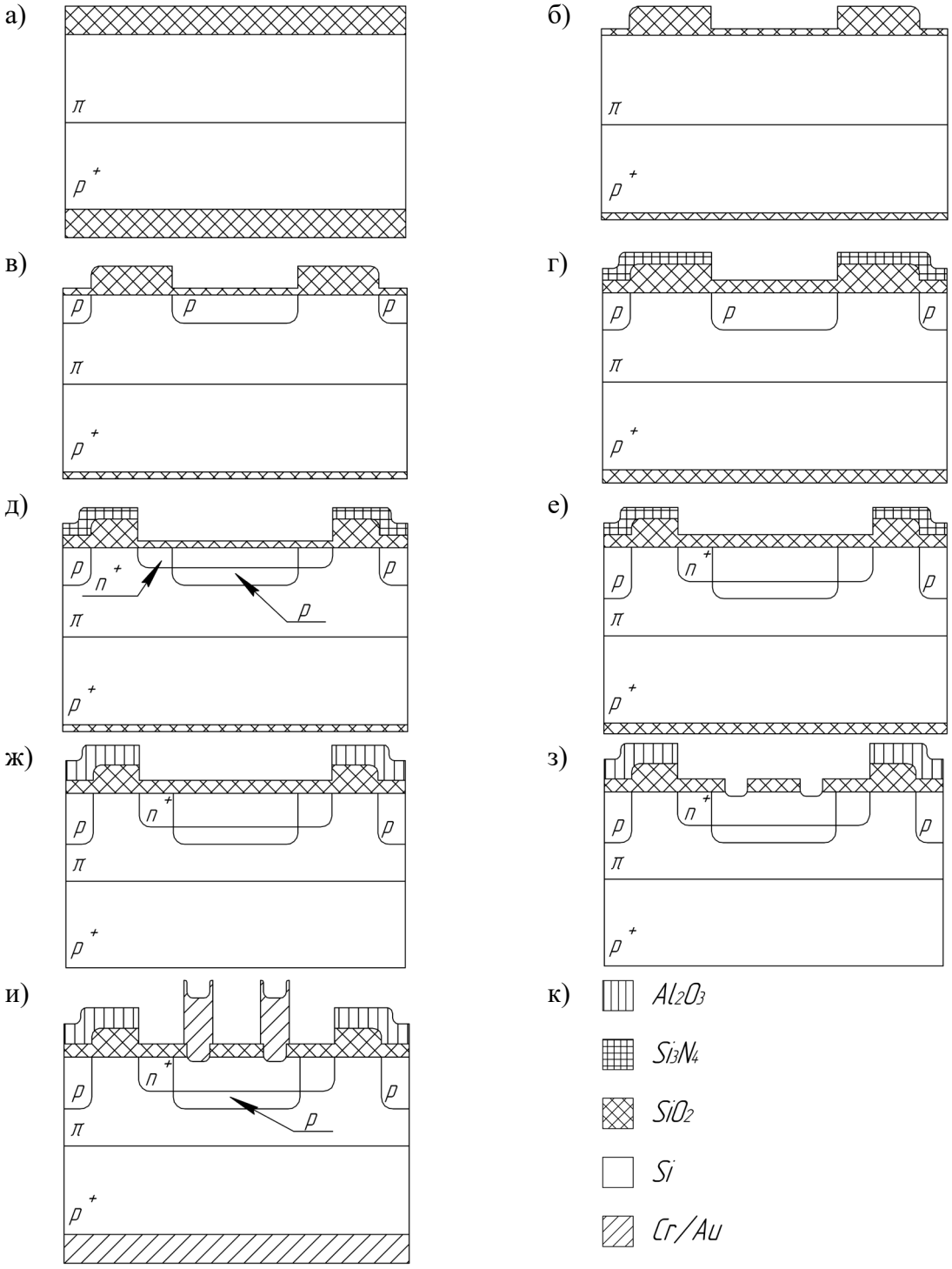


Рисунок 37 – Эскиз технологического маршрута изготовления с пассивацией Al_2O_3:
а – сухое окисление 0,18 мкм; б – фотолитография для формирования областей *p*-типа проводимости; в – создание кармана и стоп-областей *p*-типа методом ионной имплантации; г – термическое осаждение пленки Si_3N_4 и длительная разгонка имплантированной примеси; д – фотолитография для формирования области *n*-типа проводимости и ионная имплантация примеси фосфора; е – разгонка имплантированной примеси; ж – ВЧ-катодное распыление Al_2O_3 над изолирующим SiO_2; з – вскрытие контактных окон в диэлектрической пленке; и – создание контактов к ФЧЭ и тыльному контактному слою; к – расшифровка слоев.

Таким образом, изготовление фоточувствительной структуры начинается с термического выращивания методом сухого окисления пленки SiO_2 толщиной 0,18 мкм на эпитаксиальной пластине кремния *p*-типа проводимости с предварительно удаленным сэндвич-слоем на обратной стороне. Далее необходимо фотолитографическим способом создать окна с диэлектрической пленкой толщиной 0,005 мкм для ионного легирования примеси бора в качестве кармана и стоп-областей *p*-типа проводимости через тонкий пассивирующий слой SiO_2. Непосредственно перед проведением разгонки имплантированной примеси бора и формирования областей *p*-типа проводимости требуется нанести диэлектрическую пленку Si_3N_4 толщиной 0,10 мкм методом термического осаждения из газовой фазы. Это позволит предупредить эффект обратной диффузии бора в процессе длительной высокотемпературной разгонки.

Для формирования активной области n^+-типа проводимости нужно также фотолитографическим способом вскрыть заданные области в обеих диэлектрических пленках SiO_2 и Si_3N_4, загнать легирующую примесь фосфора ионной имплантацией и далее загнать примесь на требуемую глубину в процессе термодиффузионного процесса. Во время термодиффузионной разгонки примеси фосфора на поверхности структуры создается слой SiO_2, выполняющий функцию просветляющей пленки. Кроме того, на данном этапе в обратную сторону полупроводниковой пластины методом ионной имплантации загоняется примесь аргона для геттерирования дефектов структуры.

Для структуры с дополнительной пленкой Al_2O_3 пассивация заряда на границе раздела изолирующего диэлектрика и эпитаксиального слоя кремния требует полного удаления пассивирующей пленки Si_3N_4 плазмохимическим травлением и осуществляется формированием пленки Al_2O_3 методом ВЧ-катодного распыления с выделением фотолитографическим способом до просветляющей пленки SiO_2.

Завершается изготовления фоточувствительной структуры формированием контактных окон к активной области n^+-типа проводимости посредством вскрытия областей в просветляющей пленке диоксида кремния фотолитографическим способом, импульсным термическим отжигом в среде H_2 для снижения уровня темновых токов и, наконец, созданием металлизации в виде двухслойных металлических контактов как к фоточувствительным элементам, так и к контактному слою на тыльной стороне кристалла методом резистивного напыления пленки золота с подслоем хрома, нанесенного магнетронным методом, а также дисковой резкой полупроводниковой пластины на отдельные фоточувствительные кристаллы с защитой лицевой стороны слоем фоторезиста.

Таким образом, эскизный технологический маршрут изготовления кристалла линейки лавинных фотодиодов как с диэлектрической пленкой SiO_2 (за исключением пунктов 23–27), так

и с дополнительной пассивирующей пленкой Al_2O_3 содержит следующую последовательность технологических процессов и операций:

1. защита лицевой стороны пластины пленкой химико-стойкого лака (ХСЛ);
2. удаление с обратной стороны пластины сэндвич-слоя толщиной порядка 20 мкм жидкостным травлением;
3. удаление пленки ХСЛ;
4. химическая обработка;
5. термические окисление пластины в среде сухого кислорода до толщины диоксида кремния, равной 0,18 мкм;
6. фотолитография для утонения толщины пленки SiO_2 в окнах;
7. травление пленки SiO_2 до толщины 0,005 мкм в окнах маски фоторезиста;
8. ионная имплантация примеси бора в лицевую сторону пластины;
9. удаление маски фоторезиста;
10. химическая обработка;
11. термическое осаждение пленки Si_3N_4 толщиной 0,10 мкм;
12. разгонка имплантированной примеси бора;
13. химическая обработка;
14. фотолитография для вскрытия окон в пассивирующей пленке;
15. плазмохимическое травление пассивирующей пленки Si_3N_4 через маску фоторезиста с обеих сторон пластины;
16. жидкостное травление пленки SiO_2 до Si через маску фоторезиста с обеих сторон пластины;
17. удаление маски фоторезиста
18. ионная имплантация примеси фосфора в лицевую сторону пластины;
19. ионная имплантация примеси аргона в обратную сторону пластин;
20. удаление маски фоторезиста;
21. химическая обработка;
22. разгонка имплантированной примеси фосфора;
23. плазмохимическое травление пассивирующей пленки Si_3N_4 с лицевой стороны пластины;
24. ВЧ-катодное распыление мишени Al_2O_3 толщиной 0,14 мкм;
25. фотолитография для вытравливания пленки Al_2O_3 до просветляющей пленки SiO_2;
26. ионное травление пленки Al_2O_3 с предварительной плазмохимической очисткой;
27. удаление маски фоторезиста;
28. фотолитография для вскрытия окон в просветляющей пленке SiO_2;

29. жидкостное травление просветляющей пленки SiO_2 до Si;
30. удаление маски фоторезиста;
31. быстрый термический отжиг пластины в среде H_2;
32. напыление металлизации Cr (0,02 мкм)/Au (0,5 мкм) на лицевую сторону пластины;
33. фотолитография для выделения металлизации Cr/Au;
34. жидкостное травление слоев Au и Cr через маску фоторезиста;
35. удаление маски фоторезиста;
36. напыление металлизации Cr (0,005 мкм)/Au (0,5 мкм) на обратную сторону пластины;
37. нанесение фоторезиста для дисковой резки пластины на кристаллы;
38. дисковая резка пластины на кристаллы;
39. удаление маски фоторезиста.

Оптимальные параметры режимов технологических процессов формирования диэлектрической пленки Al_2O_3 и быстрого термического отжига были определены ранее в подразделах 2.2 и 2.3. Ионно-лучевое травление пленки Al_2O_3 толщиной 0,14 мкм до просветляющей пленки SiO_2 через маску фоторезиста осуществляется в течение 20 мин [58]. Однако непосредственно перед изготовлением экспериментальных партий фоточувствительных кристаллов по сформированному эскизному технологическому маршруту необходимо определить параметры режимов проведения других нетиповых технологических процессов, таких как химическая обработка, фотолитография, травление выделяемых слоев и термические обработки.

3.1 Режимы технологических процессов и операций

3.1.1 Химическая обработка

Химическая обработка пластин применяется на всех этапах маршрута изготовления полупроводниковых структур. Данная технологическая операция предназначена для удаления с поверхности полупроводниковой пластины как физически, так и химически связанных с ней загрязнений [59]. К основным видам загрязнений относятся следующие: механические в виде микрочастиц пыли, волокон, полупроводниковой крошки и отдельных атомов различных элементов; органические в виде сплошных пленок и коагулированных частиц; ионные, представляющие собой катионы, анионы и фрагменты молекул.

Существует разнообразие многостадийных способов химической и химико-механической очисток поверхности полупроводника. Кроме того, известны методы ультра- и мегазвуковой обработки полупроводниковых пластин. В обоих случаях очищение поверхности достигается посредством возбуждения в моющем растворе колебаний ультразвуковой или мегазвуковой частоты. Описание устройства для мегазвуковой очистки полупроводниковых пластин приведен в [60]. Известна установка для очистки полупроводниковых подложек и фотошаблонов LSC-4000 производства Nano-master, позволяющая настроить многоступенчатую химико-механическую обработку пластины и имеющая в своем арсенале набор различных обработок, среди которых щеточная очистка, ультразвуковая очистка деионизованной водой, химическую очистку перекисью водорода, серной кислотой и другими химическими реактивами, центробежную и инфракрасную сушки, а также сушка в среде азота. Однако с учетом наблюдаемой тенденции к уменьшению как трудо-, так и ресурсоемкости маршрута изготовления изделий микроэлектроники в целом, желательно применение более оптимального метода химической обработки.

Наиболее распространенными методами химической обработки полупроводниковой пластины являются отмывка в аммиачно-перекисном растворе [24] и в смеси КАРО [25], а также их комбинация [26].

Аммиачно-перекисный раствор представляет собой раствор перекиси водорода и щелочной добавки гидроксида аммония в соотношении H_2O_2:NH_4OH:H_2O = 4:1:1. В щелочной среде перекись водорода под влиянием каталитического действия ОН-ионов быстро разлагается. В результате образуется атомарный кислород, окисляющий органические загрязнения и создающий хорошо растворимые в воде перекиси, перкислоты и надкислоты, что и определяет легкое удаление с поверхности пластины продуктов реакции [6127]. Для ускорения прохождения реакции аммиачно-перекисный раствор предварительно нагревается до температуры (80±5) °С. Эффективное удаление загрязнений достигается погружением пластины в раствор на 10 мин, после чего концентрация раствора с погруженной пластиной уменьшается посредством вытеснения деионизованной водой.

Смесь КАРО представляет собой перекись водорода и серную кислоту, взятые в соотношении H_2O_2:H_2SO_4 = 3:1. Несмотря на то, что в кислой среде H_2O_2 разлагается менее активно, чем в щелочной среде, однако наблюдается хорошее растворение многих металлов, входящих в I-IV группы периодической системы химических элементов Менделеева. Химическая обработка в смеси КАРО в обязательном порядке требует постобработки полупроводниковой пластины в деионизованной воде [62].

В рамках эскизного маршрута изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД на основе эпитаксиального кремния подходят обе химические обработки. Однако

химическая обработка в аммиачно-перекисном растворе предпочтительнее, поскольку имеет меньшую травящую способность к диоксиду кремния в сравнении со смесью КАРО, а рабочее место и технологическая оснастка позволяют проводить групповую обработку пластин заданного диаметра в количестве до 24 шт. Описание процесса химической обработки полупроводниковых пластин в количестве 6 шт. в аммиачно-перекисном растворе представлено на рисунке 38.

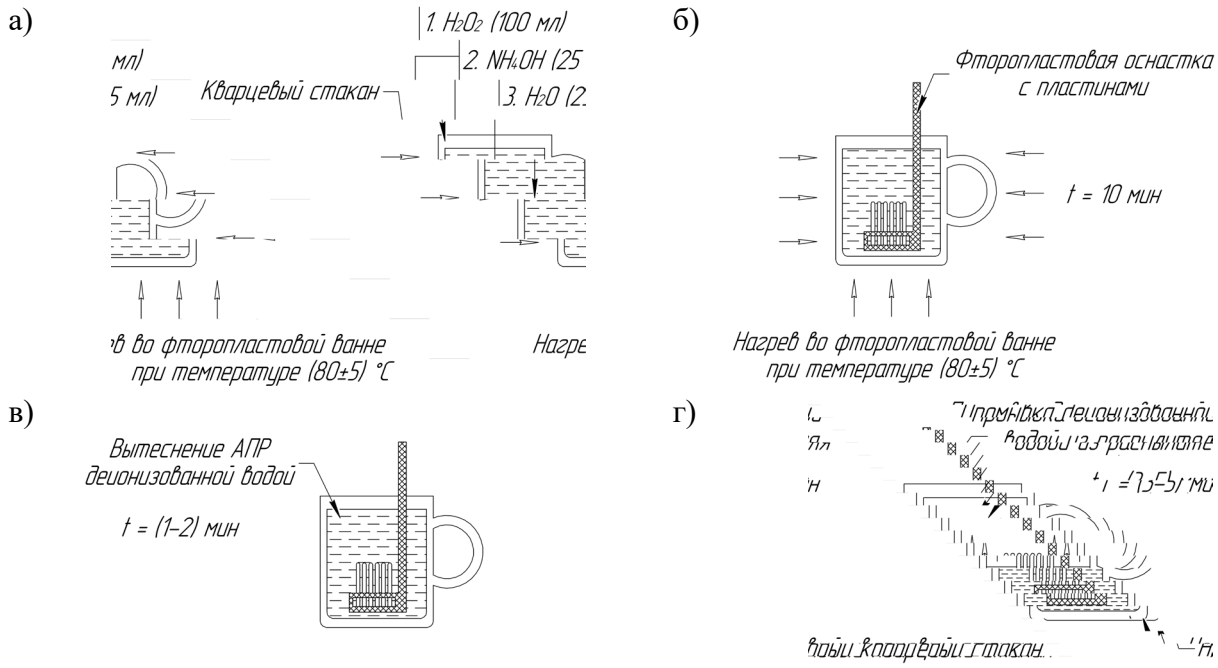
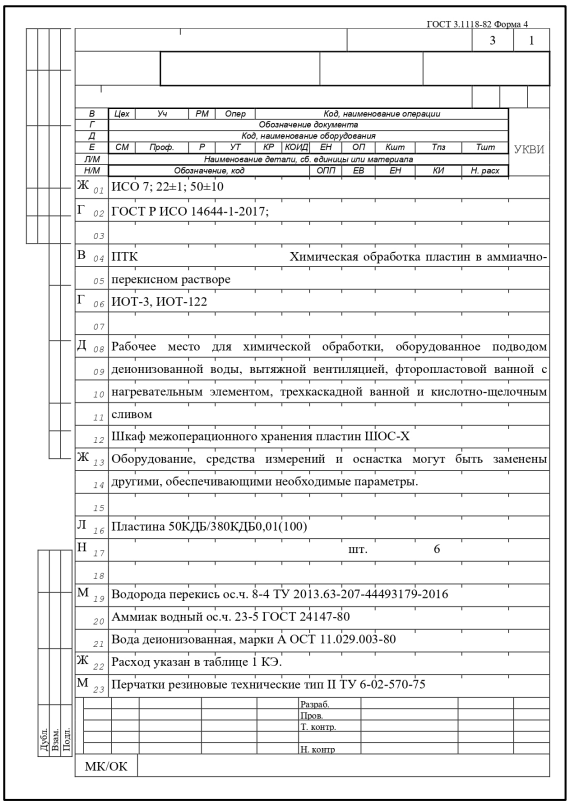


Рисунок 38 – Химическая обработка пластин в аммиачно-перекисном растворе:
а – подготовка; б – обработка в растворе; в – вытеснение раствора деионизованной водой;
г – промывка деионизованной водой; д – промывка в трехкаскадной ванне.

Разработанные операционные карты (ОК) для выбранных видов химической обработки, таких как химическая обработка в аммиачно-перекисном растворе, обработка пластин в деионизованной воде, обработка пластин в серной кислоте, а также сушка пластин для передачи на следующую технологическую операцию, приведены на рисунках 39–42. Подробнее операционные карты в составе технологической документации рассматриваются в подразделе 3.5.

а)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 4

3 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
ЛМ	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

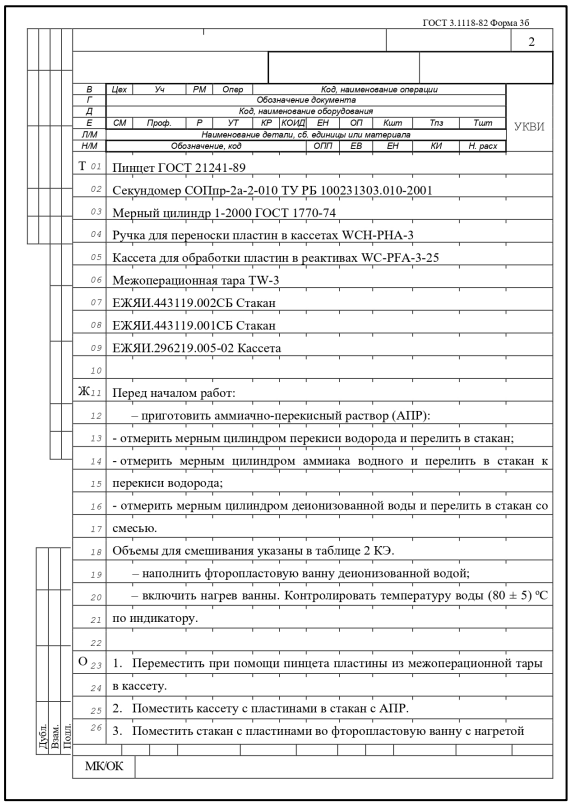
Ж	01	ИСО 7; 22±1; 50±10
Г	02	ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017;
	03	
В	04	ПТК Химическая обработка пластин в аммиачно-
	05	перекисном растворе
Г	06	ИОТ-3, ИОТ-122
	07	
Д	08	Рабочее место для химической обработки, оборудованное подводом
	09	деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной с
	10	нагревательным элементом, трехкаскадной ванной и кислотно-щелочным
	11	сливом
	12	Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х
Ж	13	Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
	14	другими, обеспечивающими необходимые параметры.
	15	
Л	16	Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н	17	шт. 6
	18	
М	19	Водорода перекись ос.ч. 8-4 ТУ 2013.63-207-44493179-2016
	20	Аммиак водный ос.ч. 23-5 ГОСТ 24147-80
	21	Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80
Ж	22	Расход указан в таблице 1 КЭ.
М	23	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6-02-570-75

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

2

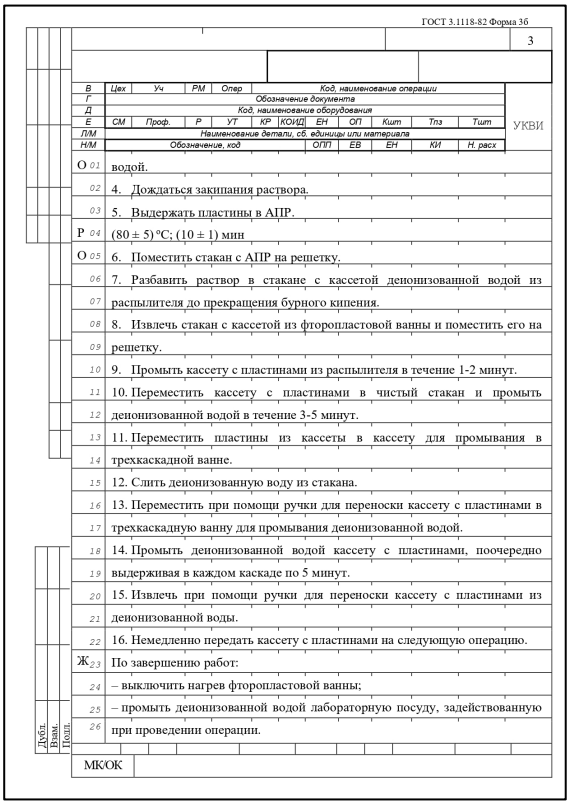
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
ЛМ	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Т	01	Пипет ГОСТ 21241-89
	02	Секундомер СОПпр-2а-2-010 ТУ РБ 100231303.010-2001
	03	Мерный цилиндр 1-2000 ГОСТ 1770-74
	04	Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3
	05	Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25
	06	Межоперационная тара TW-3
	07	ЕЖЯИ.443119.002СБ Стакан
	08	ЕЖЯИ.443119.001СБ Стакан
	09	ЕЖЯИ.296219.005-02 Кассета
	10	
Ж	11	Перед началом работ:
	12	– приготовить аммиачно-перекисный раствор (АПР):
	13	- отмерить мерным цилиндром перекиси водорода и перелить в стакан;
	14	- отмерить мерным цилиндром аммиака водного и перелить в стакан к
	15	перекиси водорода;
	16	- отмерить мерным цилиндром деионизованной воды и перелить в стакан со
	17	смесью.
	18	Объемы для смешивания указаны в таблице 2 КЭ.
	19	– наполнить фторопластовую ванну деионизованной водой;
	20	– включить нагрев ванны. Контролировать температуру воды (80 ± 5) ºС
	21	по индикатору.
	22	
О	23	1. Переместить при помощи пинцета пластины из межоперационной тары
	24	в кассету.
	25	2. Поместить кассету с пластинами в стакан с АПР.
	26	3. Поместить стакан с пластинами во фторопластовую ванну с нагретой

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

в)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

3

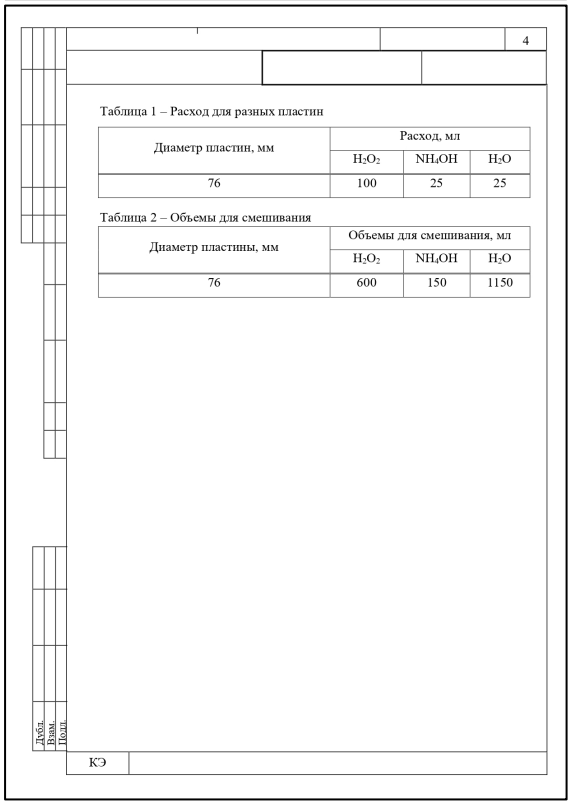
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
ЛМ	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

О	01	водой.
	02	4. Дождаться закипания раствора.
	03	5. Выдержать пластины в АПР.
Р	04	(80 ± 5) °С; (10 ± 1) мин
О	05	6. Поместить стакан с АПР на решетку.
	06	7. Разбавить раствор в стакане с кассетой деионизованной водой из
	07	распылителя до прекращения бурного кипения.
	08	8. Извлечь стакан с кассетой из фторопластовой ванны и поместить его на
	09	решетку.
	10	9. Промыть кассету с пластинами из распылителя в течение 1-2 минут.
	11	10. Переместить кассету с пластинами в чистый стакан и промыть
	12	деионизованной водой в течение 3-5 минут.
	13	11. Переместить пластины из кассеты в кассету для промывания в
	14	трехкаскадной ванне.
	15	12. Слить деионизованную воду из стакана.
	16	13. Переместить при помощи ручки для переноски кассету с пластинами в
	17	трехкаскадную ванну для промывания деионизованной водой.
	18	14. Промыть деионизованной водой кассету с пластинами, поочередно
	19	выдерживая в каждом каскаде по 5 минут.
	20	15. Извлечь при помощи ручки для переноски кассету с пластинами из
	21	деионизованной воды.
	22	16. Немедленно передать кассету с пластинами на следующую операцию.
Ж	23	По завершению работ:
	24	– выключить нагрев фторопластовой ванны;
	25	– промыть деионизованной водой лабораторную посуду, задействованную
	26	при проведении операции.

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

г)



4

Таблица 1 – Расход для разных пластин

Диаметр пластин, мм	Расход, мл		
	H_2O_2	NH_4OH	H_2O
76	100	25	25

Таблица 2 – Объемы для смешивания

Диаметр пластины, мм	Объемы для смешивания, мл		
	H_2O_2	NH_4OH	H_2O
76	600	150	1150

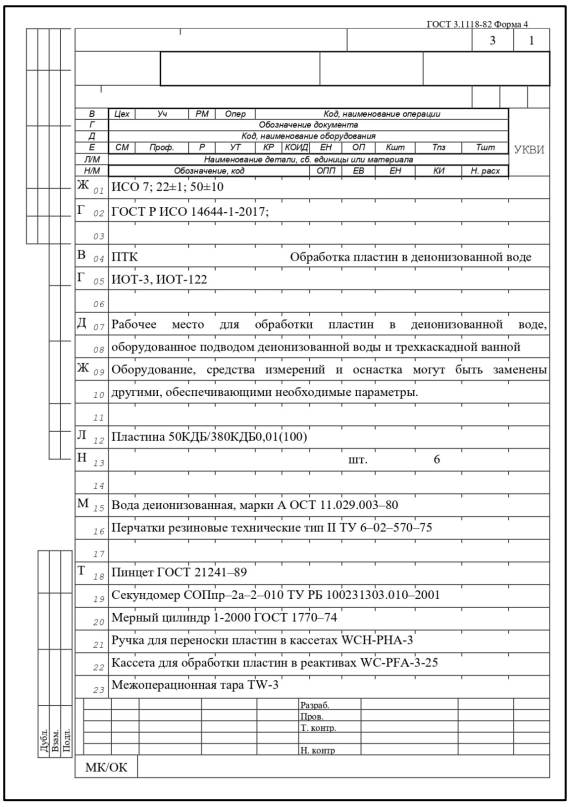
Дубл. Взам. Подл.

КЭ

Рисунок 39 – ОК Химическая обработка пластин в аммиачно-перекисном растворе:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

а)



б)

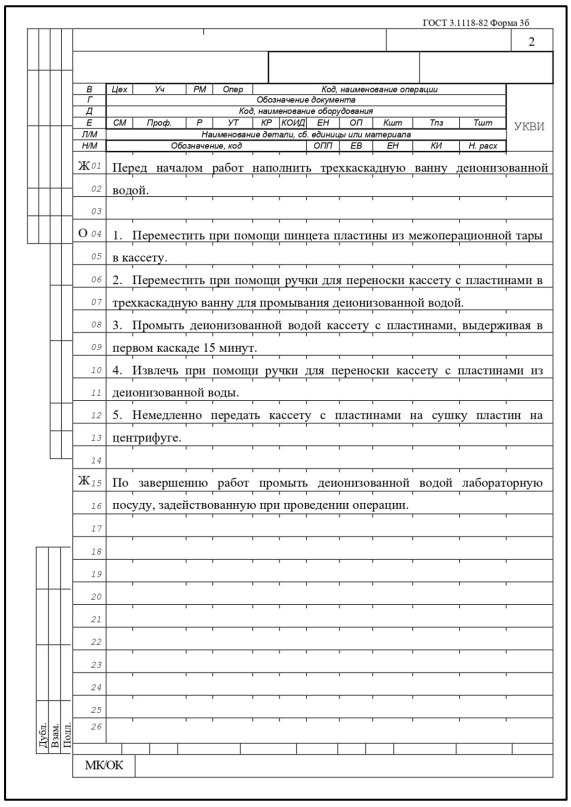
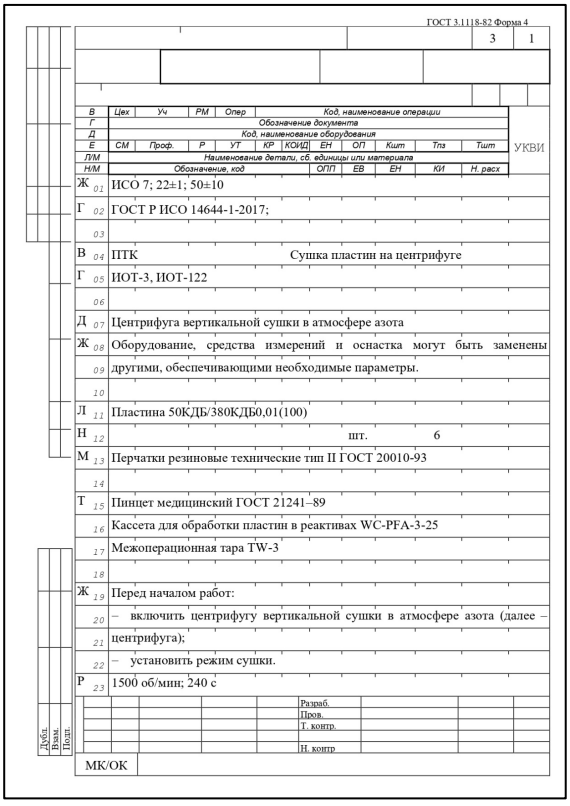


Рисунок 40 – ОК Обработка пластин в деионизованной воде: а – стр. 1; б – стр. 2.

а)



б)

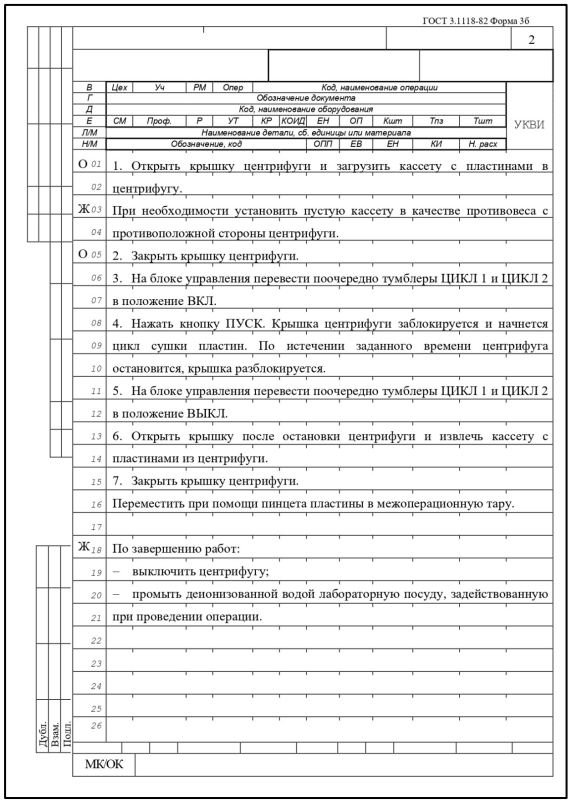


Рисунок 41 – ОК Сушка пластин на центрифуге: а – стр. 1; б – стр. 2.

а) б)

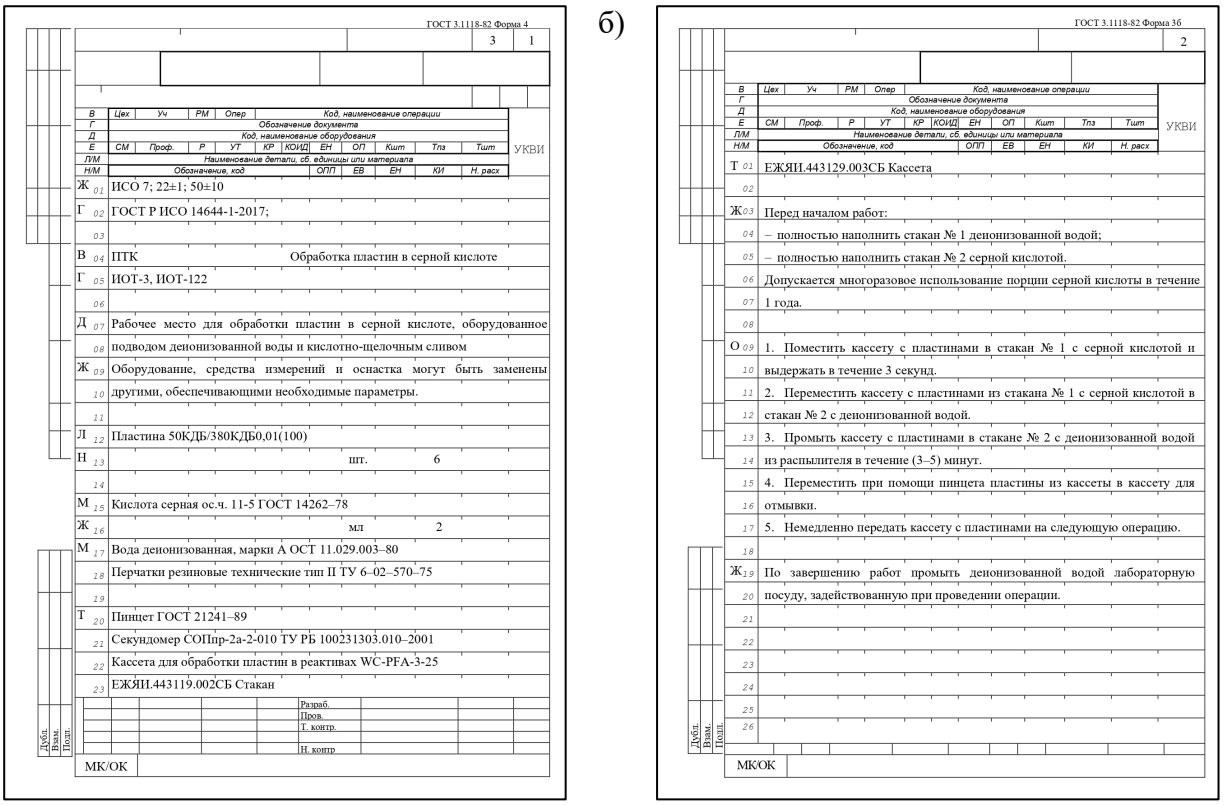


Рисунок 42 – ОК Обработка пластин в серной кислоте: а – стр. 1; б – стр. 2.

3.1.2 Фотолитография

Создание фоточувствительного кристалла по планарной технологии невозможно в отсутствии технологических процессов, позволяющих сформировать заданную топологию. Наиболее распространенным за счет применимости практически на всех этапах маршрута изготовления и настроенности самого процесса является фотолитография.

Фотолитографию проводят в следующей последовательности операций. На полупроводниковую подложку наносится тонкий слой светочувствительного и стойкого к агрессивным средам вещества – фоторезиста, после чего следует сушка фоторезиста посредством термической обработки при температуре не выше 100 ºС. Далее слой фоторезиста подвергается воздействию излучения, чаще всего, ультрафиолетового. При этом между источником излучения и фоторезистом располагается фотошаблон, имеющий соответствующие требуемому изображению прозрачные и непрозрачные участки, а непосредственное его наложение на подложку осуществляется при совмещении. В процессе экспонирования засвеченные области слоя фоторезиста становятся либо растворимыми в случае использования марки позитивного фоторезиста, либо наоборот полимеризованными – в случае использования марки негативного

фоторезиста. Для полного разрушения растворимых или неполимеризованных областей подложка со слоем фоторезиста обрабатывается в соответствующем для каждого типа фоторезиста проявителе. Завершающим этапом является термическая обработка в режиме задубливания, характеризуемая более высокой температурой в сравнении с режимом сушки фоторезиста, вследствие чего формируется устойчивая фоторезистная маска с топологией, повторяющей изображение на фотошаблоне [63].

Технологический процесс фотолитографии включает следующие операции [64]–[66]:

1. отжиг пластины:

проводится при температурах (100–120) ºС для удаления остатков влаги после химической обработки пластин, допускается замена на УФ-сушку.

2. нанесение слоя фоторезиста:

проводится центрифугированием, в ходе которого в центр пластины наносится необходимая доза фоторезиста, после чего некоторое время фоторезист растекается по площади пластины, далее следует вращение пластины, при котором под действием центробежной силы фоторезист равномерно распределяется по всей пластине.

3. термическая обработка слоя фоторезиста:

проводится при температурах (85–95) ºС и необходимо для подсушивания нанесенного слоя фоторезиста для понижения его текучести.

4. совмещение и экспонирование слоя фоторезиста через фотошаблон;

5. термическая обработка проэкспонированного слоя фоторезиста (только в случае применения марки негативного фоторезиста);

6. проявление слоя фоторезиста:

проводится либо погружением пластины в раствор проявителя, либо центрифугированием.

7. термическая обработка маски фоторезиста (только в случае применения марки позитивного фоторезиста):

проводится при температурах (100–120) ºС для задубливания проявленной маски фоторезиста за счет испарения растворимых соединений в ней и повышения устойчивости.

После формирования маски позитивного фоторезиста возможно выделение топологии требуемого слоя как различными методами сухого травления, так и жидкостным методом в зависимости от физико-химических свойств используемой марки фоторезиста и особенностей удаляемого материала. Далее необходимо удалить маску фоторезиста в специальном растворителе – снимателе фоторезиста. Такой метод фотолитографии называется прямым. Известными технологическими решениями для повышения качества прямой фотолитографии являются формирование двухслойной маски из позитивного и негативного фоторезистов [67] и двухслойной маски из слоя фоторезиста и металла, например молибдена [68].

Существует обратный процесс фотолитографии – взрывная фотолитография, или lift-off фотолитография. В данном способе формирование маски фоторезиста предполагается непосредственно перед нанесением выделяемого слоя и завершается погружением пластины в снимать фоторезиста, который растворяет фоторезист и таким образом удаляет слой поверх него. Взрывная литография применяется в основном для выделения осажденной металлизации из-за отрицательного угла наклона сформированной маски негативного фоторезиста, за счет чего достигается предотвращение образования «усов» металлизации по краям топологического рисунка, высота которых может достигать нескольких микрон.

В разрабатываемой технологии изготовления линейки ЛФД на основе эпитаксиального кремния в соответствии с эскизным маршрутом изготовления предполагается применение фотолитографии для выделения пассивирующей и изолирующей диэлектрических пленок, защитной пленки перед ионной имплантацией, создания высоколегированных областей, для вскрытия контактных окон в диэлектрических пленках до полупроводника и для выделения металлизации. Прямая фотолитография в данных случаях предпочтительнее, поскольку марки позитивного фоторезиста проще в работе и не накладывают требования на технологические процессы формирования выделяемых слоев структуры.

Для применяемых процессов прямой фотолитографии были разработаны и изготовлены светлопольные фотошаблоны, эскизы которых представлены на рисунке 43 и рисунке 44.

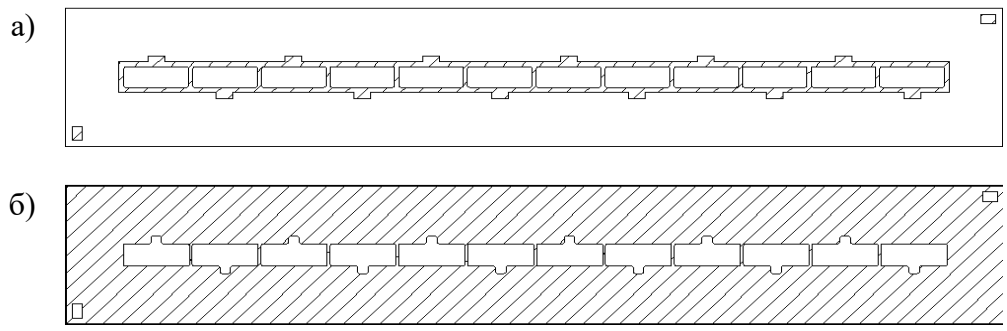
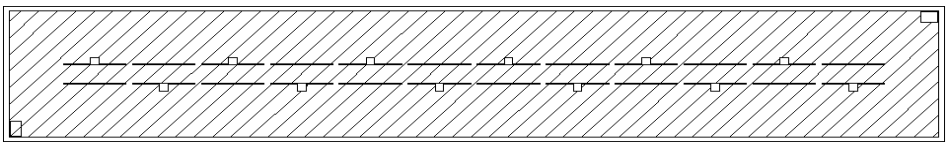


Рисунок 43 – Эскизы фотошаблонов для формирования фоточувствительной структуры:
а – формирование кармана и стоп-областей *p*-типа проводимости (фотошаблон № 01);
б – создание активной области n^+-типа проводимости (фотошаблон № 02).

а)



б)

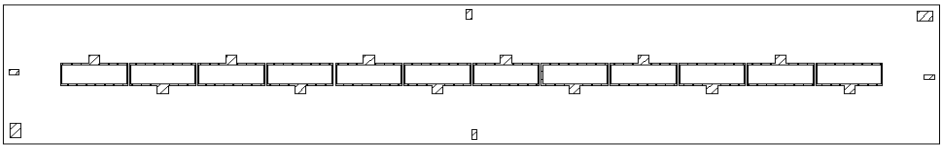


Рисунок 44 – Эскизы фотошаблонов для формирования контактов:
а – вскрытие контактных окон (фотошаблон № 03);
б – создание контактных площадок (фотошаблон № 04).

При определении параметров режима проведения фотолитографии необязательно, но желательно получение технологического процесса, оптимального для всех аналогичных процессов в рамках одного маршрута изготовления и в части применяемых марок фоторезистов и сопутствующих им химических реактивов, и в части используемого технологического оборудования.

Среди марок позитивного фоторезиста были выбраны марка ФП-9120-1, изготавливаемого по ТУ 2378–015–29135749–2015, и марка ФП-3520, изготавливаемого по ТУ 20.59.12–017–18567185–2017, производителя ЗАО «ФРАСТ-М», широко используемые в полупроводниковой промышленности за счет универсальности их применения для g- и h-линий.

В таблице 9 и таблице 10 приведены основных характеристики данных марок позитивных фоторезистов.

Таблица 9 – Характеристики фоторезиста марки ФП-9120-1

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1	Внешний вид	Прозрачная жидкость желто-красного цвета без осадка
2	Внешний вид пленки фоторезиста	Прозрачная, блестящая, без разрывов
3	Толщина пленки фоторезиста, мкм	1,1÷1,3
4	Устойчивость пленки фоторезиста к проявителю, мин, не менее	30
5	Относительная скорость фильтрации фоторезиста, отн. ед., не более	1,05

Окончание таблицы 9.

1	2	3
6	Проявитель рекомендуемый	УПФ-1Б, MF-26A или 0,6 %-ный водный раствор KOH
7	Уровень фильтрации фоторезиста, мкм	0,1
8	Термостойкость пленки фоторезиста, ºС	130
9	Светочувствительность, мДж/см^2	40
10	Содержание микропримесей металлов, %, не более	10^{-4}
11	Снимать рекомендуемый	СПР-01Ф или N-диметилформамид

Таблица 10 – Характеристики фоторезиста марки ФП-3520

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1	Внешний вид	Жидкость желто-коричневого цвета
2	Внешний вид пленки фоторезиста	Блестящая без разрывов
3	Уровень фильтрации фоторезиста, мкм	0,2
4	Разрешающая способность, мкм	0,5
5	Толщина пленки фоторезиста, мкм	2,0±3%
6	Устойчивость пленки фоторезиста к проявителю, мин, более	45
7	Светочувствительность спектральная, нм	310÷440
8	Проявитель буферный рекомендуемый	УПФ-1Б или MF-26A
9	Общее содержание микропримесей металлов, ppm, менее	1
10	Снимать рекомендуемый	СПР-01Ф или N-диметилформамид

Как было упомянуто выше, технологический процесс фотолитографии содержит следующую последовательность операций: нанесение слоя фоторезиста, сушка слоя фоторезиста, совмещение и экспонирование слоя фоторезиста, проявление маски фоторезиста, задубливание маски фоторезиста и удаление маски фоторезиста. Кроме того, перед проведением фотолитографии требуются химическая обработка пластины для удаления загрязнений с ее

поверхности и отжиг пластины при температуре 120 ºС в течение не менее 15 мин для испарения остатков влаги, значительно влияющих на адгезию слоя фоторезиста к пластине. Для некоторых марок фоторезистов, характеризуемых слабой адгезионной способностью к слоям полупроводника или диэлектрическим слоям, также необходима предварительная обработка пластины в парах универсального адгезива фоторезиста – гексаметилдисилазан $C_6H_{19}NSi_2$, или ГМДС.

Для нанесения слоя фоторезиста и проявления маски фоторезиста была выбрана центрифуга SPIN-400A производства «Midas System» с автоматическим дозированием. Центрифуга позволяет задать дозу, время растекания, а также ускорение, скорость и время раскручивания подложки для операции нанесения фоторезиста и задать ускорение, скорость и время – для операции проявления маски фоторезиста. Определение проявителя фоторезиста проводилось в соответствии с рекомендациями производителя. Таким образом для проявления фоторезиста марки ФП-9120-1 был выбран 0,6 %-ный раствор KOH, фоторезиста марки ФП-3520 – MF-26A.

Термообработка фоторезиста как в режиме сушки, так и для задубливания сформированной маски возможно в сушильном шкафе и на нагревательной плите. Выбор способа термической обработки влияет на нагрев в части характера испарения растворимых соединений в фоторезисте. В первом случае нагрев происходит со всех сторон слоя фоторезиста равномерно, в то время как во втором случае нагрев фоторезиста осуществляется снизу от пластины. В соответствии с указанием производителя, термически обрабатывать фоторезист марки ФП-9120-1 решено в сушильном шкафу SNOL 120/300, фоторезист марки ФП-3520 – на нагревательной плите HotPlate.

Оборудование для совмещения и экспонирования фоторезиста определялось составом имеющейся производственной линии, в связи с чем были опробованы установки для контактной фотолитографии ЭМ-576А производства ООО «Сорэнж» и MDA-400M-6 производства «Midas System».

Изготовленные подложки с масками фоторезистов подвергались технологическим процессам удаления полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев для оценки их применимости на разных этапах маршрута фоточувствительного кристалла. В качестве снимателя масок обеих марок фоторезиста был выбран рекомендуемый СПР-01Ф.

Операция удаления фоторезиста представляет собой следующую последовательность. Предварительно необходимо нагреть два кварцевых стакана объемом 1 л, наполненных СПР-01Ф, до температуры (100±5) ºС на электроплитке. Последовательное выдерживание фторопластовой кассеты с пластинами в течение 10 мин в каждом стакане позволяет достичь полного удаления задубленной маски фоторезиста с поверхности пластин. Степень удаления

маски фоторезиста контролируется по рабочей поверхности первой пластины в кассете, при этом допускается повторное выдерживание в СПР-01Ф при неполном снятии. Подготовленных порций СПР-01Ф общим объемом 2 л хватает на удаление фоторезиста с поверхностей 42 пластин диаметром 76 мм. Однако вследствие насыщения растворителя, сопровождаемого изменением цвета от прозрачного до малинового, длительность обработки необходимо увеличивать.

На рисунке 45 представлен внешний вид оборудования, а в таблице 11 и таблице 12 – вариации параметров режимов всех операций с применением обеих марок фоторезиста, выбранные на основе рекомендаций производителя фоторезиста и с учетом технологических особенностей используемого оборудования.

а) б) в)

г) д)

Рисунок 45 – Оборудование для фотолитографии:
а – центрифуга для нанесения/проявления фоторезиста или сушки SPIN-4000A;
б – шкаф сушильный SNOL 120/300; в – плита нагревательная HotPlate;
г – установка совмещения и экспонирования ЭМ-576А;
д – установка совмещения и экспонирования MDA-400M-6.

Таблица 11 – Параметры режимов фотолитографии с применением фоторезиста марки ФП-9120-1

№ п/п	Параметр	Значение		
1	2	3	4	5
Режим		№ 1	№ 2	№ 3
Нанесение слоя фоторезиста Оборудование: центрифуга для нанесения/проявления фоторезиста или сушки SPIN-4000A				
1	Доза, с	2 (0 rpm)	3 (0 rpm)	3 (0 rpm)
2	Растекание, с	5	5	7

Окончание таблицы 11.

1	2	3	4	5
3	Раскручивание, с	от 15 rpm до 3000 rpm (ускорение за 1 с)		
Сушка слоя фоторезиста Оборудование: сушильный шкаф SNOL 120/300				
4	Температура, ºС	90		
5	Длительность, мин	20		
Совмещение и экспонирование Оборудование: установка совмещения и экспонирования ЭМ-576А				
6	Длительность, с	6,0	7,0	7,5
Проявление маски фоторезиста Оборудование: центрифуга для нанесения/проявления фоторезиста или сушки SPIN-4000A				
7	Скорость, rpm	2000		
8	Длительность, с	15	20	20
Задубливание маски фоторезиста Оборудование: сушильный шкаф SNOL 120/300				
9	Температура, ºС	120		
10	Длительность, мин	30		
Удаление маски фоторезиста				
10	Температура, ºС	100		
11	Длительность, мин	5		

Таблица 12 – Параметры режимов фотолитографии с применением фоторезиста марки ФП-3520

№ п/п	Параметр	Значение		
1	2	3	4	5
Режим		№ 4	№ 5	№ 6
Нанесение слоя фоторезиста Оборудование: центрифуга для нанесения/проявления фоторезиста или сушки SPIN-4000A				
1	Доза, с	4 (500 rpm)	4 (500 rpm)	5 (500 rpm)
2	Растекание, с	15	20	20
3	Раскручивание, с	от 20 rpm до 2000 rpm (ускорение за 1 с)		

Окончание таблицы 12.

1	2	3	4	5
Сушка слоя фоторезиста Оборудование: плита нагревательная HotPlate				
4	Температура, ºС	95		
5	Длительность, мин	5		
Совмещение и экспонирование Оборудование: установка совмещения и экспонирования MDA-400M-6				
6	Длительность, с	5,0	4,0	4,5
Проявление маски фоторезиста Оборудование: центрифуга для нанесения/проявления фоторезиста или сушки SPIN-4000A				
7	Скорость, rpm	2000		
8	Длительность, с	15	15	20
Задубливание маски фоторезиста Оборудование: плита нагревательная HotPlate				
9	Температура, ºС	110		
10	Длительность, мин	5		
Удаление маски фоторезиста				
10	Температура, ºС	100		
11	Длительность, мин	5		

В качестве подложек для проведения экспериментальных процессов фотолитографии использовались пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм с предварительно выращенным термическим окислом толщиной 0,2 мкм. В зависимости от выделяемого слоя перед проведением фотолитографии на подложках формировались слои нитрида кремния, или оксида алюминия, или двухслойной металлизации заданных архитектурой фоточувствительного кристалла толщин. Всего было подготовлено 12 пластин кремния. Экспонирование слоев фоторезиста проводилось через тестовые фотошаблоны с отличной от требуемой топологии рисунками, но схожими размерами элементами. Контроль качества получаемых масок фоторезиста и контроль поверхности подложек после их удаления осуществлялся визуально с использованием оптических микроскопов МБС и Olympus DSX1000.

Пленка фоторезиста марки ФП-9120-1, наносимая в режиме № 1, имела разноцветные радиальные полосы, что связано с неравномерностью пленки по поверхности подложки. В режиме № 2 наблюдались области непроэкспонированного или недопроявленного фоторезиста,

выраженные в наличии тонкой пленки фоторезиста в открытых областях маски фоторезиста после ее проявления. Помимо этого, на подложке наблюдались зачатки отслоения металлизации, образование которых связано с ее недостаточной термической обработкой перед осаждением двухслойной пленки Cr/Au. Режим № 3 позволил получить равномерную маску фоторезиста с ровными краям окон в фоторезиста марки ФП-9120-1.

При нанесении фоторезиста марки ФП-3520 в режиме № 4 слой фоторезиста не полностью покрывал поверхность подложки, что связано с недостаточной дозой вследствие большей вязкости в сравнении с маркой фоторезиста ФП-9120-1. Однако полученная в данном режиме маска фоторезиста обладала необходимой равномерностью в центре пластины и полностью вскрытыми окнами. В режиме № 5 маска фоторезиста имела непроэкспонированные или недопроявленные области фоторезиста в окнах. Кроме того, наблюдались наплывы слоев фоторезиста в виде радиальных границ рядом с границами топологического элемента и неоднородные включения. Неоднородность слоя фоторезиста была предупреждена дополнительной фильтрацией и отстаиванием фоторезиста в течение длительного времени в заводской упаковке. Увеличение длительностей экспонирования и проявления в режиме № 6 позволило получить пленки фоторезиста требуемого качества. На рисунке 46 показаны некоторые наблюдаемые дефекты на примере подложки с травленными слоями Cr/Au.

а) б) в)

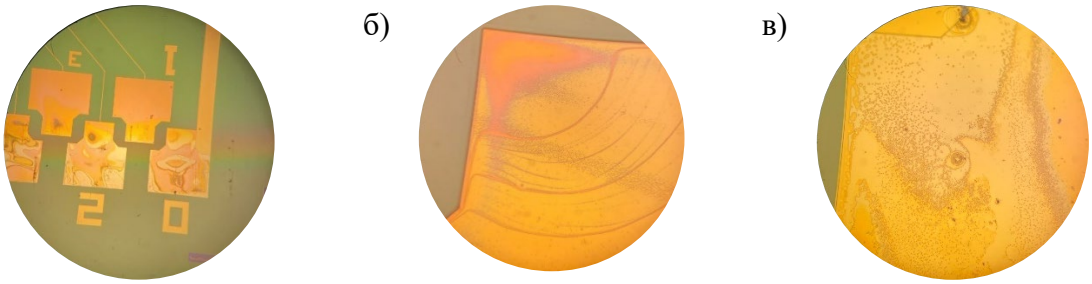


Рисунок 46 – Дефекты маски фоторезиста:
а – участки непроэкспонированного или недопроявленного фоторезиста в окнах маски;
б – наплывы фоторезиста вблизи края топологического элемента;
в – зачатки отслоения металлизации и неоднородные включения в слое фоторезиста.

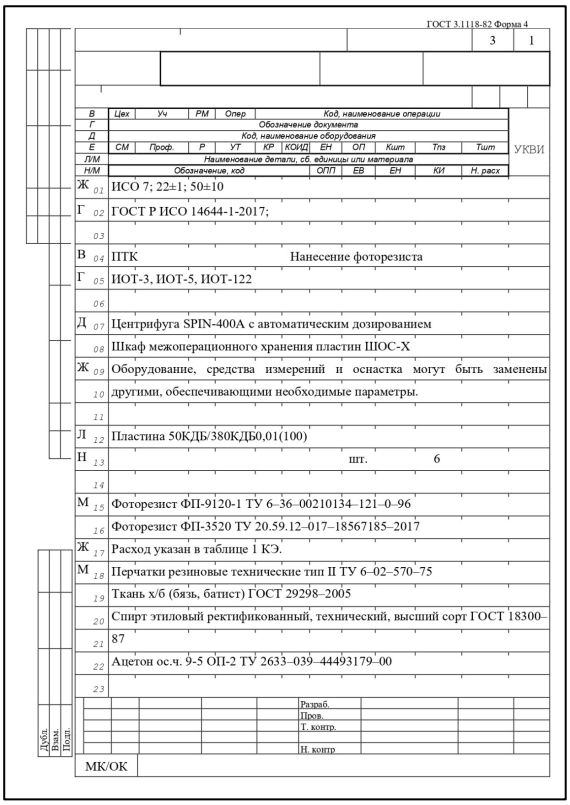
По итогам проведенных экспериментальных процессов фотолитографии для каждой марки фоторезиста были определены оптимальные параметры режимов, позволяющие получить равномерные маски с заданными топологическими рисунками. Такими режимами являются № 2 при использовании фоторезиста марки ФП-9120-1 и № 6 при использовании фоторезиста марки ФП-3520.

Проведение последующих технологических процессов удаления полупроводниковых, диэлектрических или металлических слоев подтвердили применимость обеих марок фоторезиста

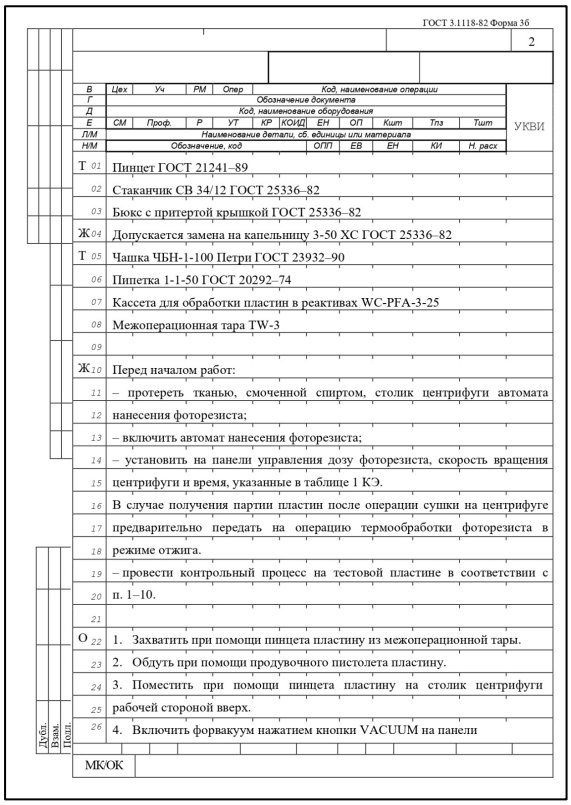
в выбранных режимах на соответствующем оборудовании в рамках маршрута изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД. Также в данных режимах были проведены 5 процессов фотолитографии на аналогичных подложках монокристаллического кремния с использованием каждой марки фоторезиста для определения устойчивости технологического процесса, чему посвящен подраздел 4.4.

Разработанные операционные карты для технологического процесса фотолитографии приведены на рисунках 47–53.

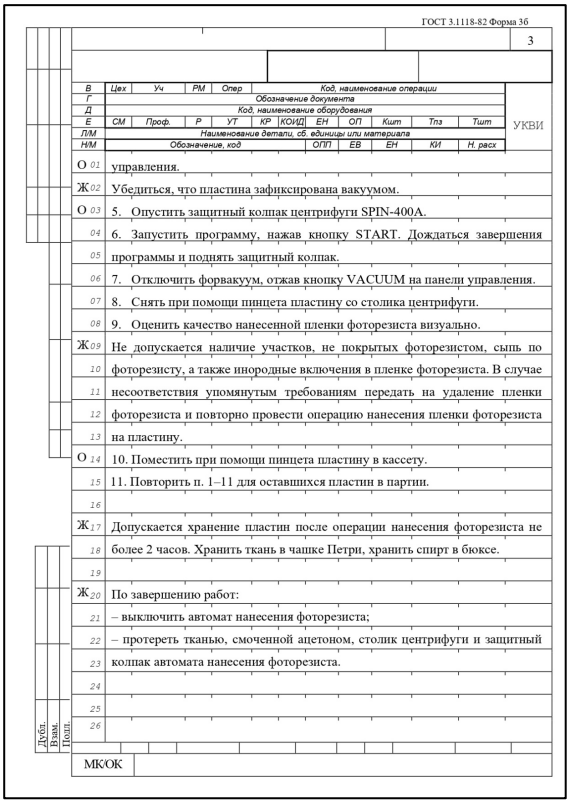
а)



б)



в)



г)

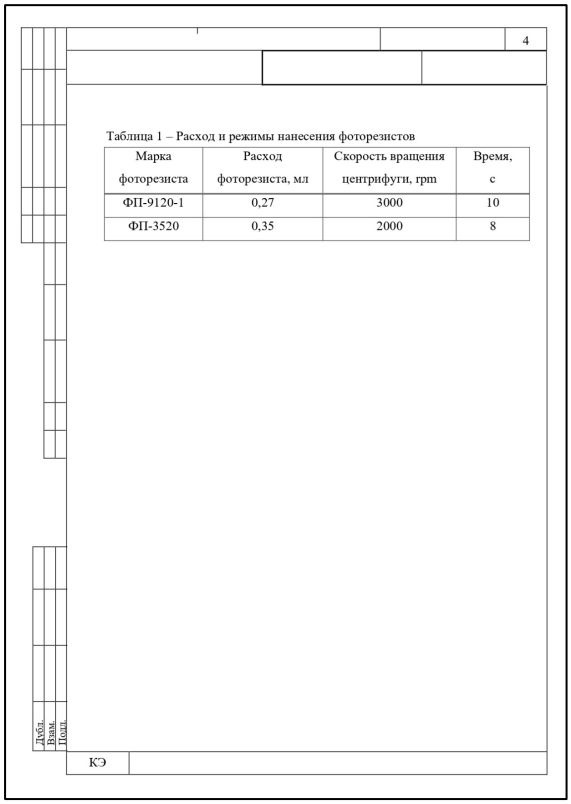
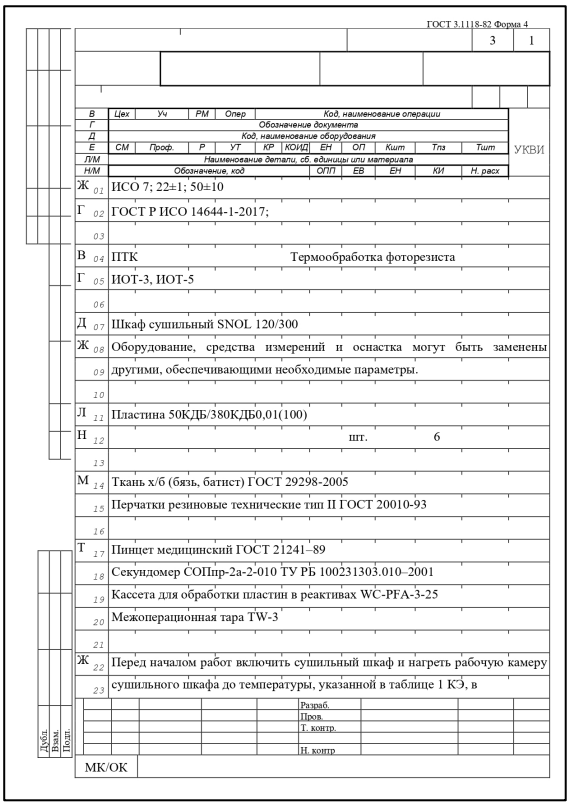


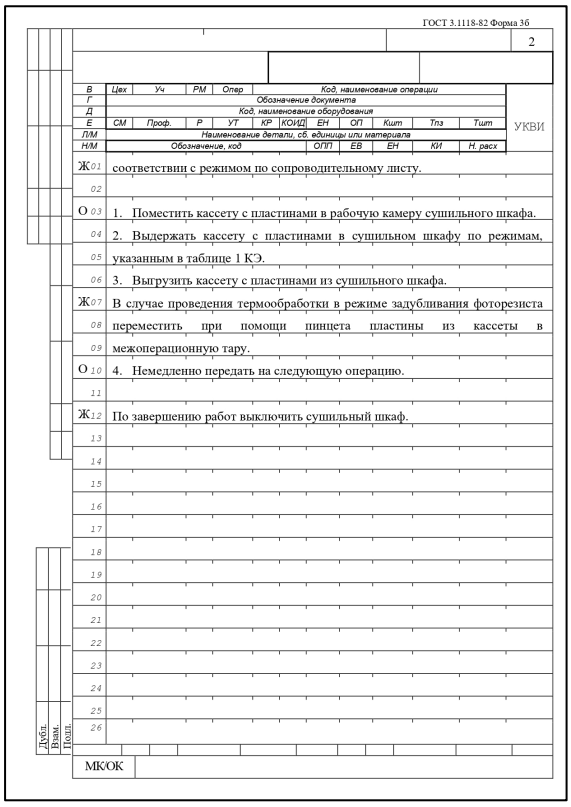
Рисунок 47 – ОК Нанесение фоторезиста:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

а)



б)



в)

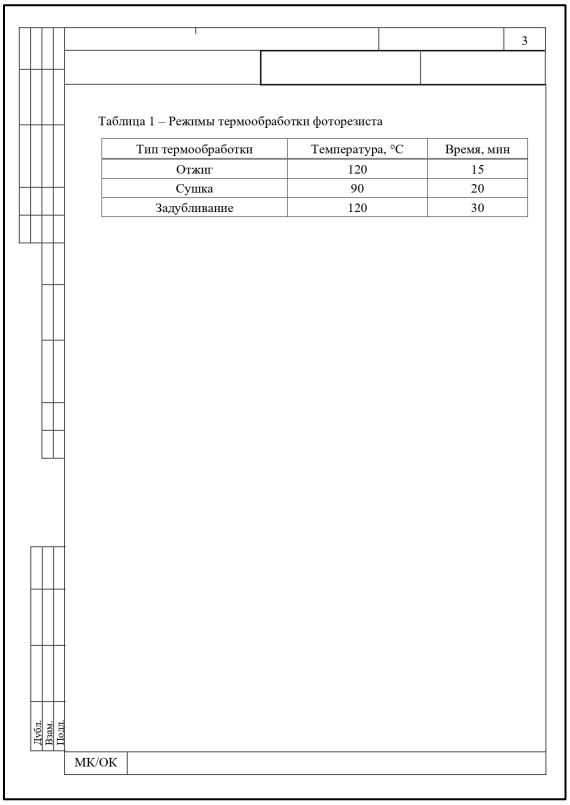
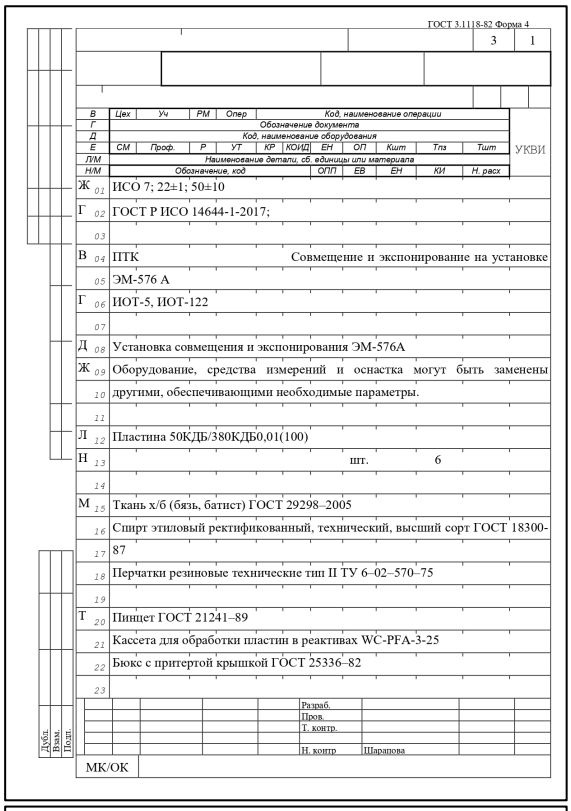


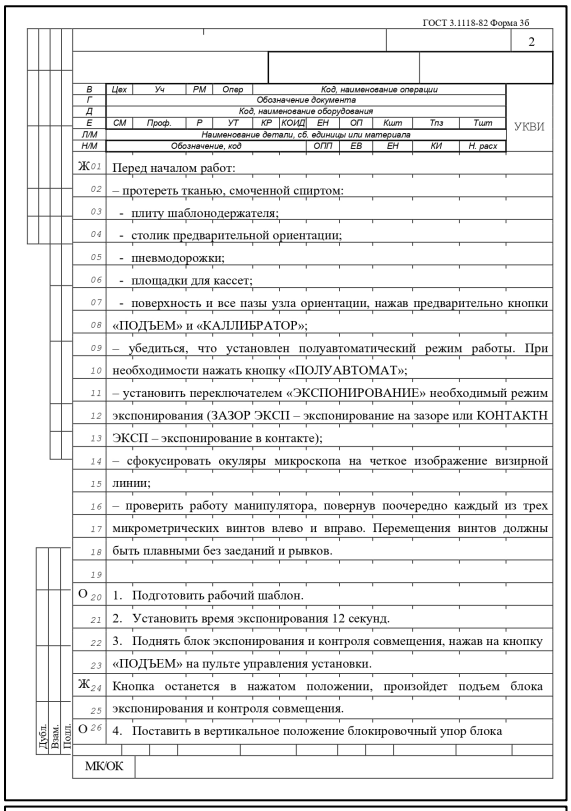
Рисунок 48 – ОК Термообработка фоторезиста:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3.

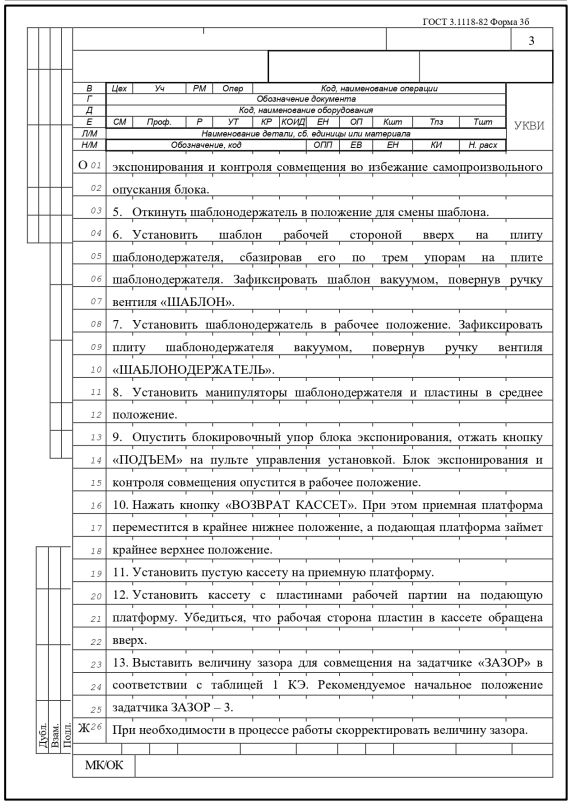
а)



б)



в)



г)

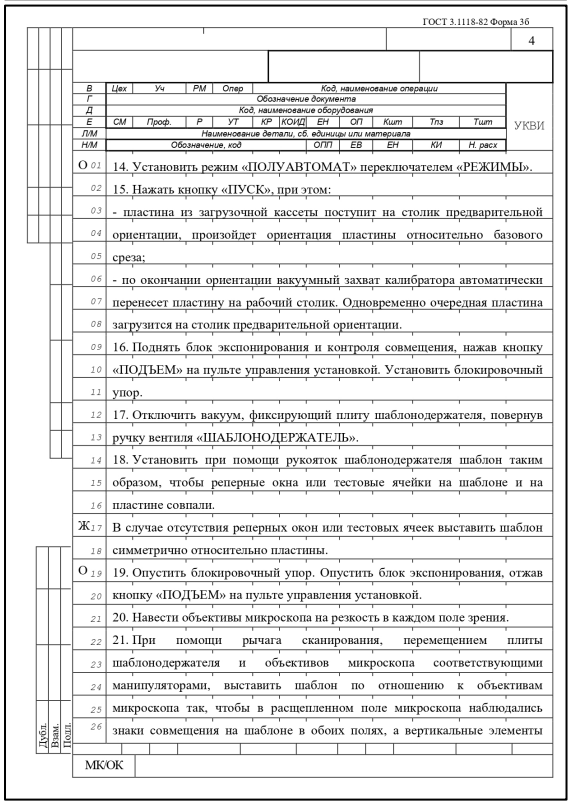
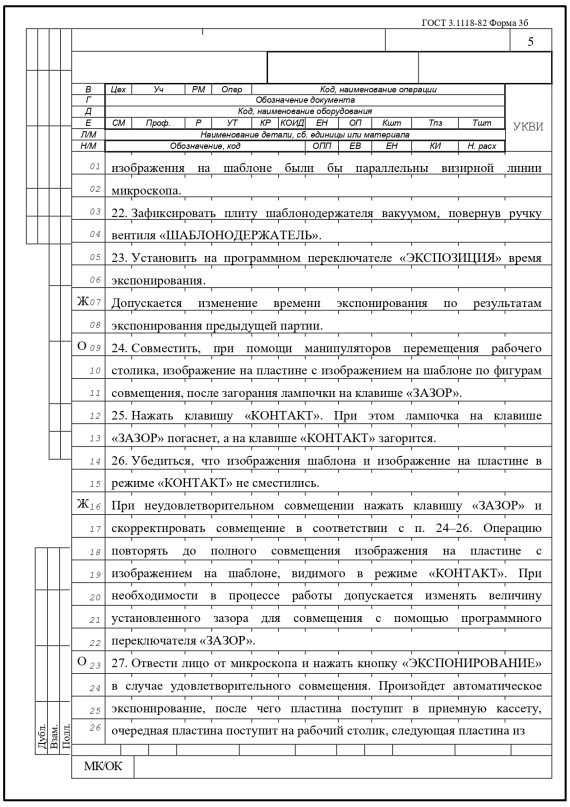


Рисунок 49 – ОК Совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А (1):

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

а)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

5

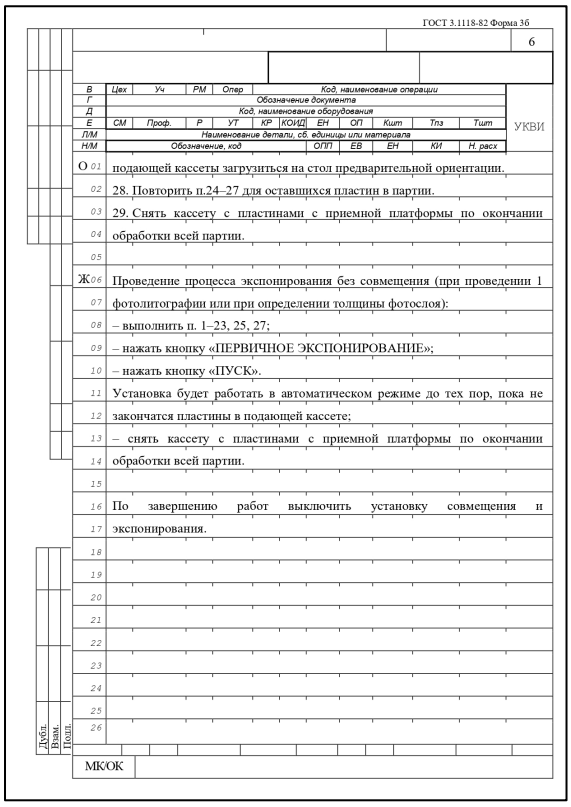
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

	01	изображения на шаблоне были бы параллельны визирной линии
	02	микроскопа.
	03	22. Зафиксировать плиту шаблонодержателя вакуумом, повернув ручку
	04	вентиля «ШАБЛОНОДЕРЖАТЕЛЬ».
	05	23. Установить на программном переключателе «ЭКСПОЗИЦИЯ» время
	06	экспонирования.
Ж	07	Допускается изменение времени экспонирования по результатам
	08	экспонирования предыдущей партии.
О	09	24. Совместить, при помощи манипуляторов перемещения рабочего
	10	столика, изображение на пластине с изображением на шаблоне по фигурам
	11	совмещения, после загорания лампочки на клавише «ЗАЗОР».
	12	25. Нажать клавишу «КОНТАКТ». При этом лампочка на клавише
	13	«ЗАЗОР» погаснет, а на клавише «КОНТАКТ» загорится.
	14	26. Убедиться, что изображения шаблона и изображение на пластине в
	15	режиме «КОНТАКТ» не сместились.
Ж	16	При неудовлетворительном совмещении нажать клавишу «ЗАЗОР» и
	17	скорректировать совмещение в соответствии с п. 24–26. Операцию
	18	повторять до полного совмещения изображения на пластине с
	19	изображением на шаблоне, видимого в режиме «КОНТАКТ». При
	20	необходимости в процессе работы допускается изменять величину
	21	установленного зазора для совмещения с помощью программного
	22	переключателя «ЗАЗОР».
О	23	27. Отвести лицо от микроскопа и нажать кнопку «ЭКСПОНИРОВАНИЕ»
	24	в случае удовлетворительного совмещения. Произойдет автоматическое
	25	экспонирование, после чего пластина поступит в приемную кассету,
	26	очередная пластина поступит на рабочий столик, следующая пластина из

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

6

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

О	01	подающей кассеты загрузиться на стол предварительной ориентации.
	02	28. Повторить п.24–27 для оставшихся пластин в партии.
	03	29. Снять кассету с пластинами с приемной платформы по окончании
	04	обработки всей партии.
	05	
Ж	06	Проведение процесса экспонирования без совмещения (при проведении 1
	07	фотолитографии или при определении толщины фотослоя):
	08	– выполнить п. 1–23, 25, 27;
	09	– нажать кнопку «ПЕРВИЧНОЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ»;
	10	– нажать кнопку «ПУСК».
	11	Установка будет работать в автоматическом режиме до тех пор, пока не
	12	закончатся пластины в подающей кассете;
	13	– снять кассету с пластинами с приемной платформы по окончании
	14	обработки всей партии.
	15	
	16	По завершению работ выключить установку совмещения и
	17	экспонирования.
	18	
	19	
	20	
	21	
	22	
	23	
	24	
	25	
	26	

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

в)

7

Таблица 1 – Величина зазора в зависимости от положения датчика «ЗАЗОР»

Положение задатчика «ЗАЗОР»	Ориентировочная величина зазора между шаблоном и пластиной, мкм
1	5
2	10
3	15
4	25
5	50

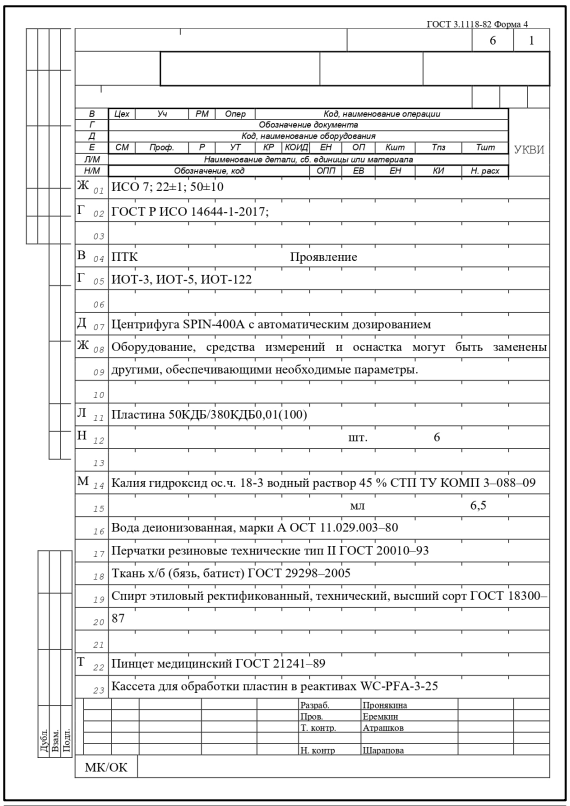
Дубл. Взам. Подл.

КЭ

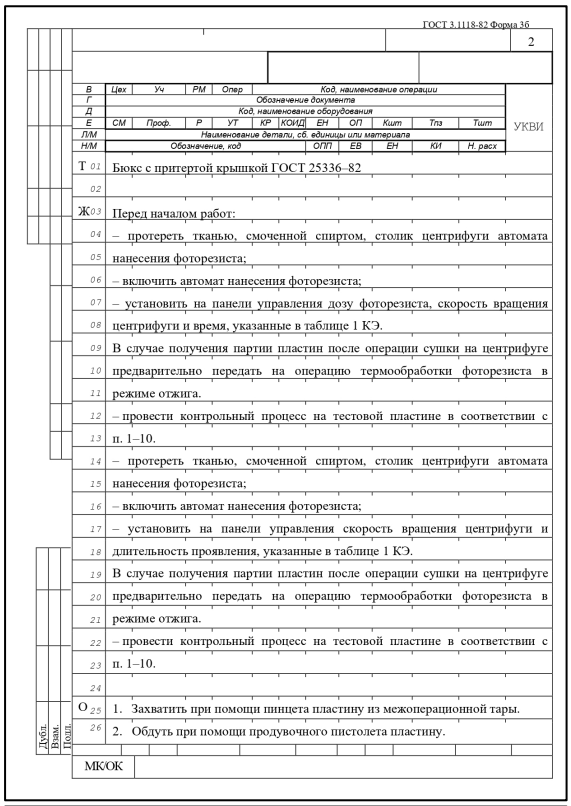
Рисунок 50 – ОК Совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А (2):

а – стр. 5; б – стр. 6; в – стр. 7.

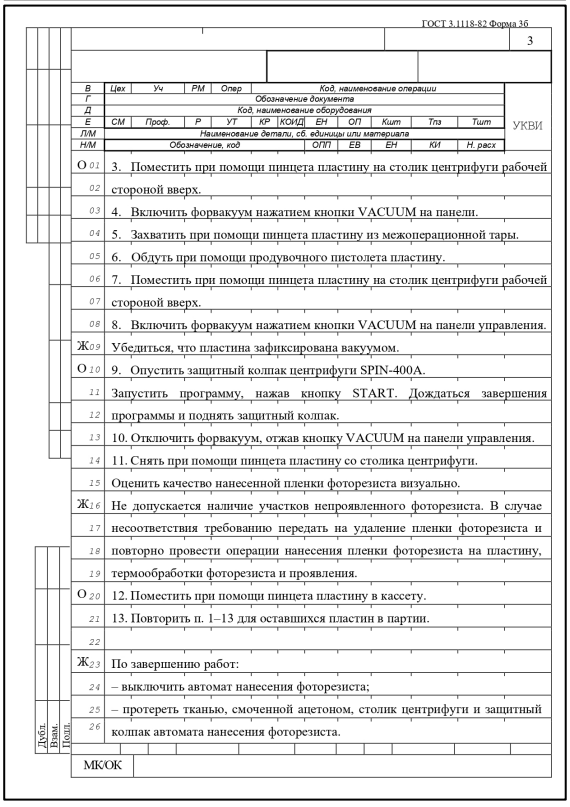
а)



б)



в)



г)

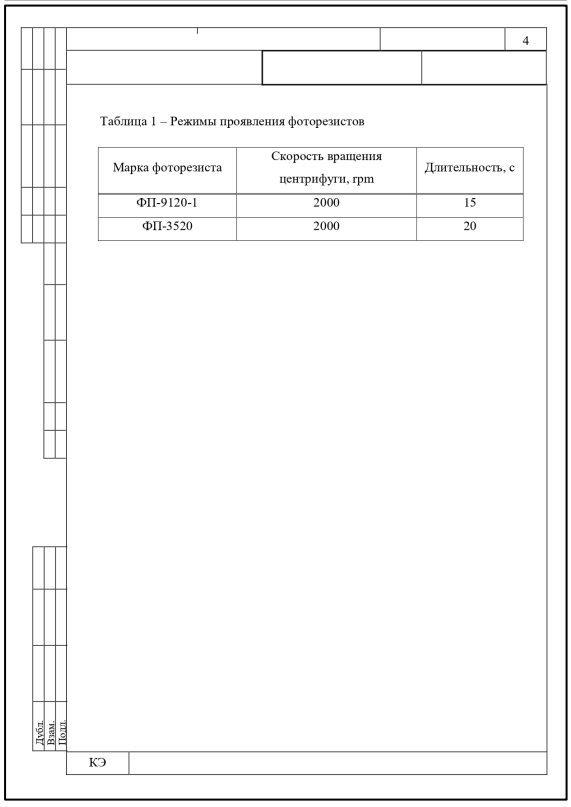
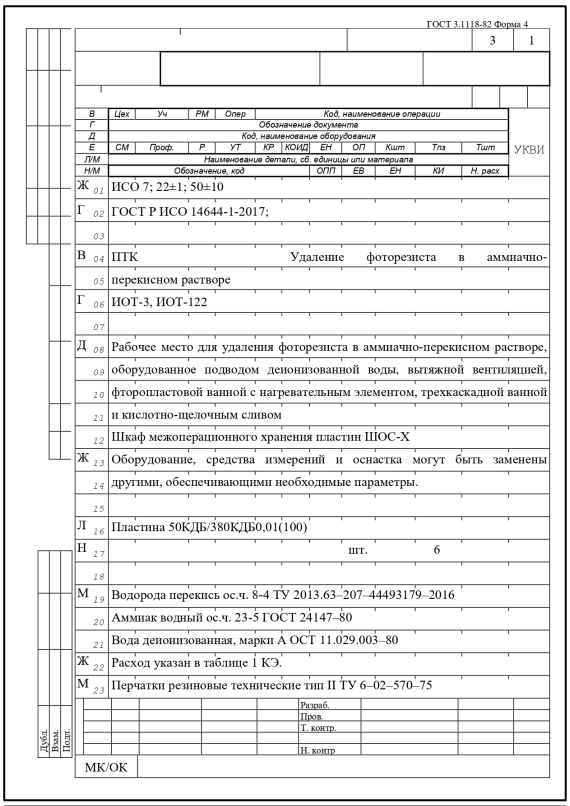


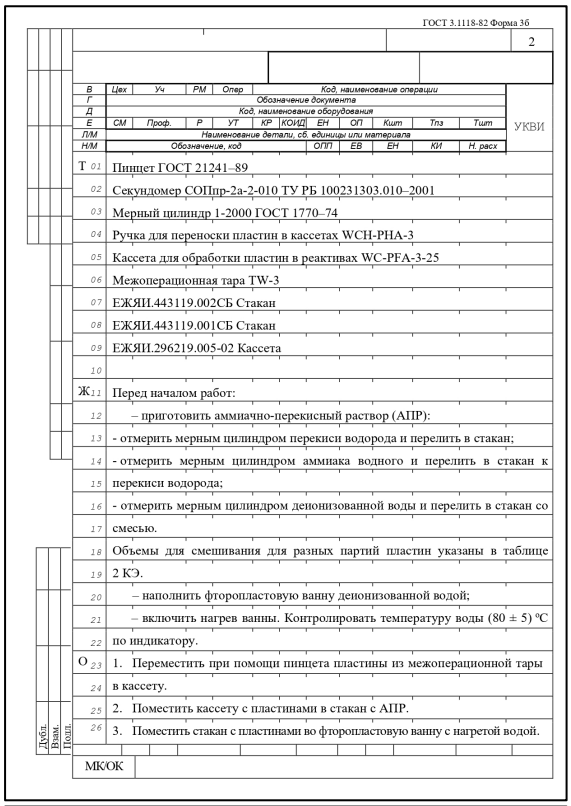
Рисунок 51 – ОК Проявление фоторезиста:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

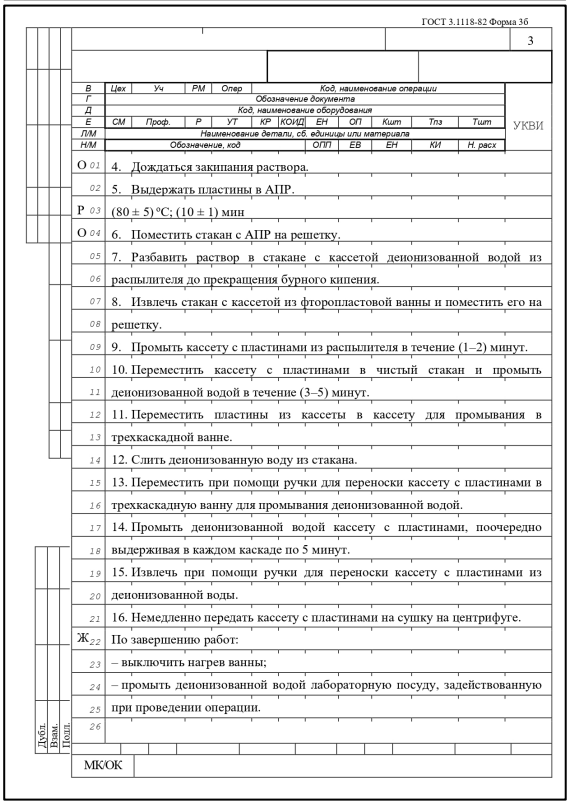
а)



б)



в)



г)

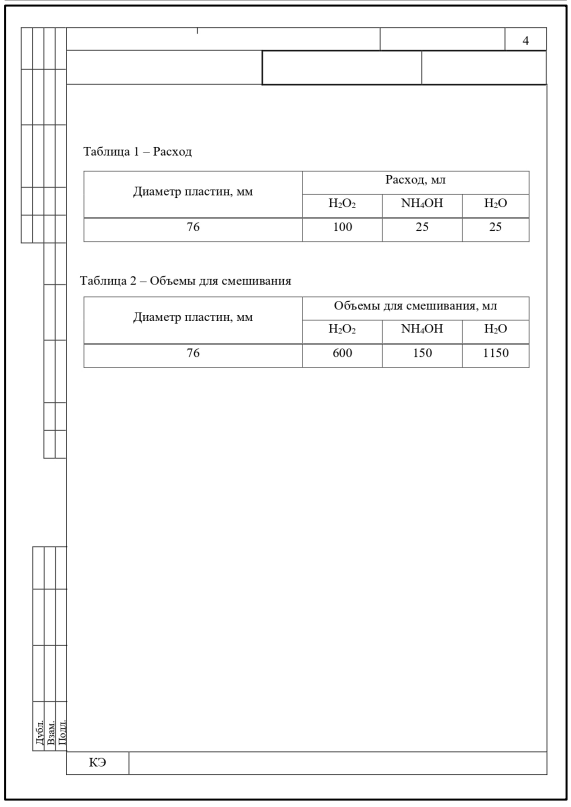
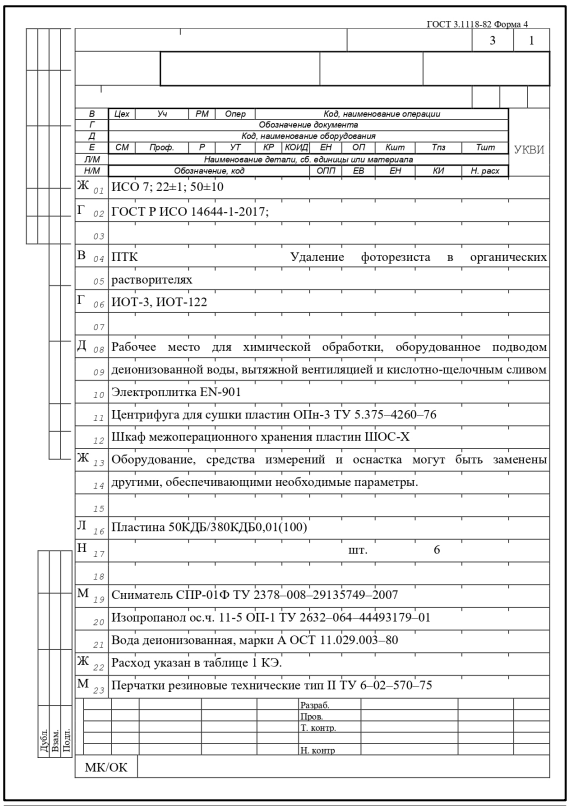


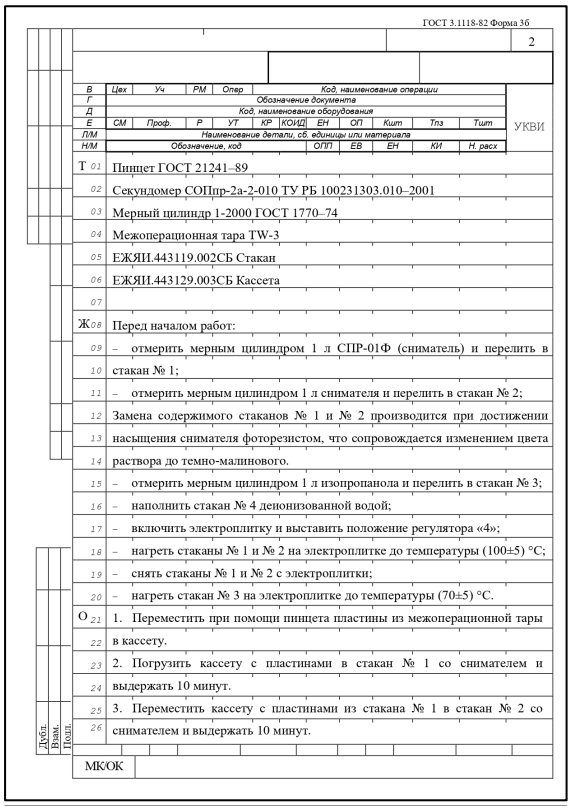
Рисунок 52 – ОК Удаление фоторезиста в аммиачно-перекисном растворе:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

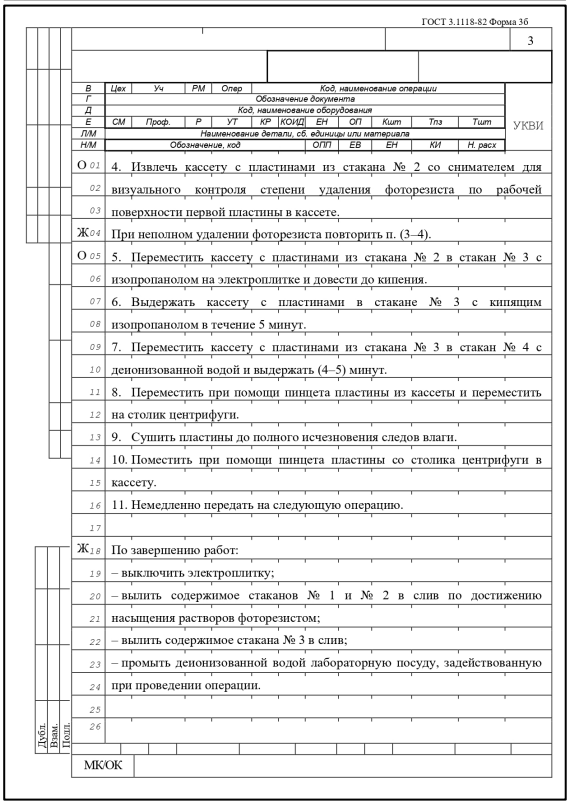
а)



б)



в)



г)

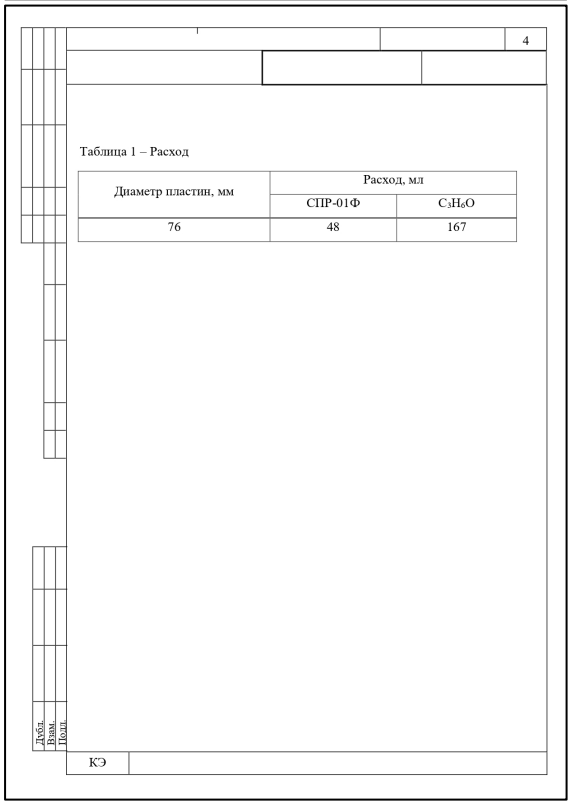


Рисунок 53 – ОК Удаление фоторезиста в органических растворителях:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

3.1.3 Жидкостное травление

Жидкостное травление применяется для удаления полупроводникового, диэлектрического или металлического слоя на поверхности пластины. При этом возможно как выборочное травление через маскирующие пленки, так и равномерное стравливание в их отсутствии. Маскирующими пленками могут быть маски фоторезиста или пленки, к которым используемый химический раствор имеет значительно меньшую травящую способность. Однако в обоих случаях важно учитывать боковое подтравливание слоя и размытие получаемой топологии, которые наблюдаются в обоих случаях. В общем виде процесс жидкостного травления разделяется на этапы, включающие диффузию порции травящего раствора к поверхности полупроводниковой пластины, ее адсорбцию поверхностью, химическую реакцию между ними, десорбцию и диффузию от поверхности продуктов реакции.

В соответствии с эскизным маршрутом изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД жидкостное травление необходимо для следующих полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев:

— сэндвич-слой на обратной стороне эпитаксиальной пластины;
— слой диоксида кремния через маску фоторезиста;
— слой хрома через маску фоторезиста;
— слой золота через маску фоторезиста.

Жидкостное травление сэндвич-слоя эпитаксиальной пластины требуется проводить в травителе с высокой травящей способностью, поскольку необходимо удаление толщины порядка 20 мкм. С этой целью справляется раствор азотной, уксусной и фтористоводородной кислот, представленные в [69] и [70], взятых в соотношении HNO_3:CH_3COOH:HF = 40:1:1 [71]. Также известно использование травителей в составе той же смеси кислот, взятых в соотношениях 3:1:3 [72], 8:5:5 и 14:3:3 [73]. Применяются азотная кислота, изготовленная по ГОСТ 4461–77, уксусная кислота, изготовленная по ГОСТ 61–75, и фтористоводородная кислота, изготовленная по ТУ 2612–0087–56853252–2010.

Поскольку необходимо удаление только сэндвич-слоя эпитаксиальной пластины важно предварительно защитить, в данном случае, лицевую сторону пластины от воздействия травителя химико-стойкими лаками, например ХВ-784. ХВ-784 имеет высокую стойкость к агрессивным кислотным и щелочным средам до температуры 60 ºС. В используемом растворе кислот пленка ХВ-784 выдерживает до 15 мин, что более чем достаточно, поскольку время травления слоя кремния толщиной 20 мкм составляет 1 мин. Нанесение химико-стойкой пленки на лицевую сторону пластины требует высыхания длительностью не менее 8 ч или 40 мин с применением

ИК-ламп и выражается в отсутствии липкости пленки. Доза ХВ-784 для покрытия всей поверхности пластины диаметром 76 мм растеканием равна 15 мл. По завершению травления пленка с поверхности пластины удаляется физически с помощью пинцета, а ее остатки растворяются при химической обработке в аммиачно-перекисном растворе.

Снижение селективности и повышение изотропности раствора кислот с высокой травящей способностью возможно при динамическом травлении, за счет чего обеспечивается ламинарный поток раствора и достигается постоянное поступление порции свежего травителя к поверхности полупроводниковой пластины и отвод прореагировавшей порции травителя с меньшей травящей способностью. Для этого полупроводниковая пластина помещается во вращающийся фторопластовый стакан с травящим раствором. Перемешивание порций непрореагирующего и прореагирующего травителя достигается наклоном фторопластового стакана под углом (30–45) º, вращение которого вокруг своей оси приводит к перекатыванию одиночной фторопластовой кассеты с пластиной по внутренней поверхности стакана. Схема установки для химико-динамического полирования приведена на рисунке 54.

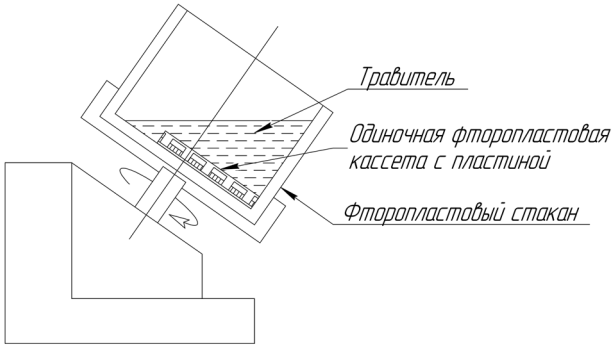


Рисунок 54 – Схема установки для химико-динамического полирования пластины

Чтобы определить наиболее оптимальный угол наклона стакана, обеспечивающий равномерное травление поверхности пластины, были проведены экспериментальные процессы жидкостного травления на пластинах монокристаллического кремния толщиной 650^{-30} мкм диаметром 76 мм с измерением толщины пластины в пяти точках (точка 1 – центр и точки 2–5 – на расстоянии 1 см от края пластины) после травления с использованием микрометра. Время травления составляло 1 мин, за это время в используемом растворе кислот стравливается примерно 20 мкм кремния. Скорость вращения фторопластового стакана – 80 об/мин. В таблице 13 приведены полученные значения для четырех предварительно защищенных лаком ХВ-784 с лицевой стороны пластин, травление которых проходило при разных углах наклонах фторопластового стакана – 30 º, 35 º, 40 º и 45 º.

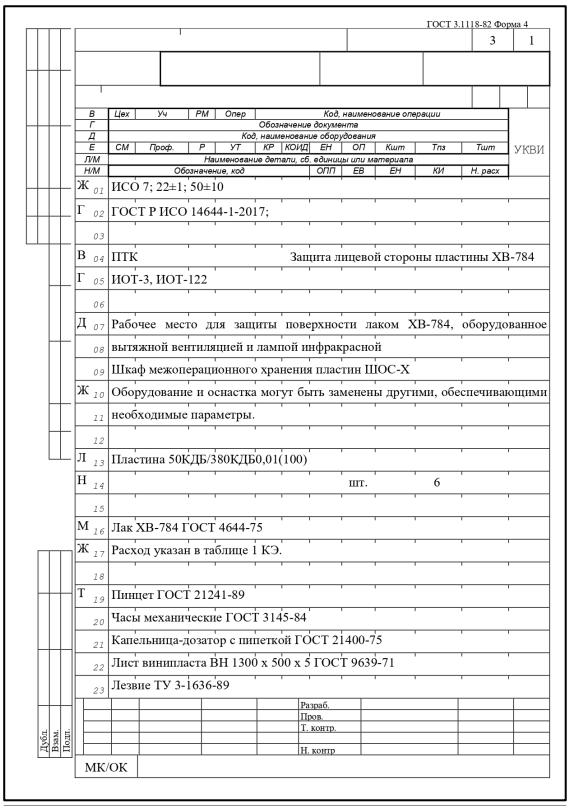
Таблица 13 – Определение угла наклона

№ п/п	Угол наклона	Точка измерения	Толщина, мкм	№ п/п	Угол наклона	Точка измерения	Толщина, мкм
1	2	3	5	6	7	8	9
1	30 º	1	621	11	40 º	1	620
2	30 º	2	619	12	40 º	2	620
3	30 º	3	618	13	40 º	3	620
4	30 º	4	619	14	40 º	4	619
5	30 º	5	619	15	40 º	5	619
6	35 º	1	619	16	45 º	1	618
7	35 º	2	618	17	45 º	2	615
8	35 º	3	617	18	45 º	3	615
9	35 º	4	618	19	45 º	4	616
10	35 º	5	617	20	45 º	5	616

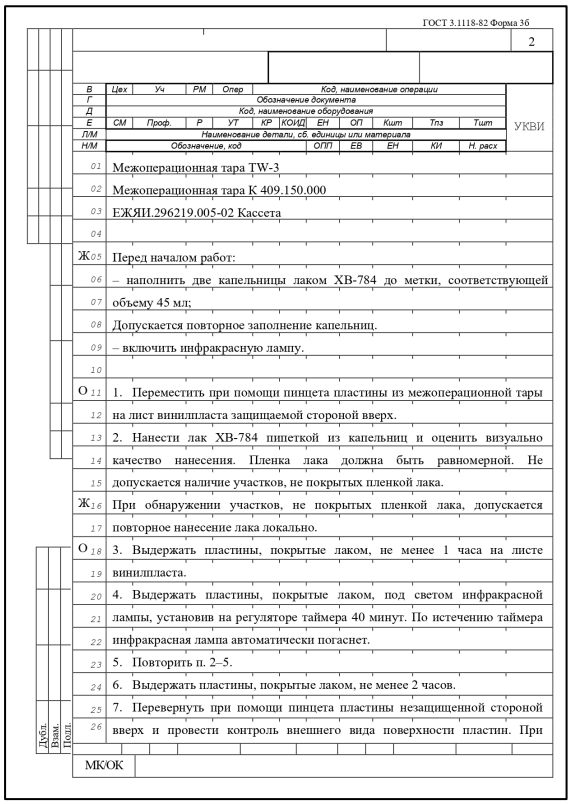
Исходя из полученных значений в таблице 13, наименьший разброс толщин по 5 точкам пластины после жидкостного травления достигается при наклоне фторопластового стакана под углом 40 º и равен 1 мкм, в то время как под углами наклона 30 º и 45 º разброс толщин равен 3 мкм, под углом 35 º – 2 мкм.

Разработанные операционные карты для жидкостного травления сэндвич-слоя с обратной стороны пластины, включающие защиту лицевой стороны пластины лаком, непосредственно жидкостное травление слоя полупроводника и удаление пленки лака, приведены на рисунках 55–58.

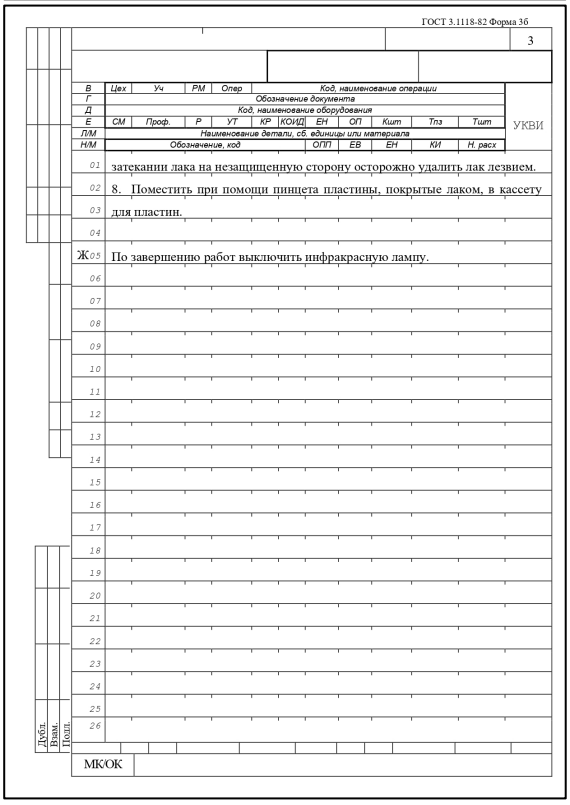
а)



б)



в)



г)

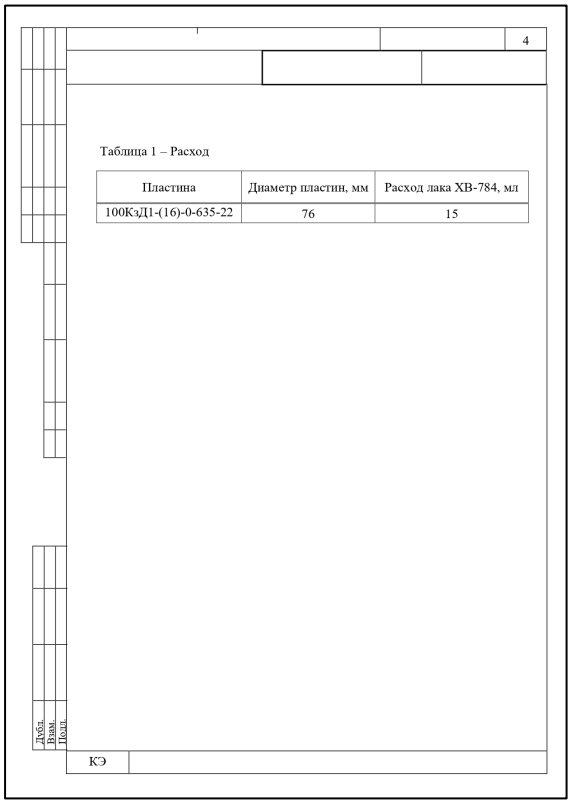
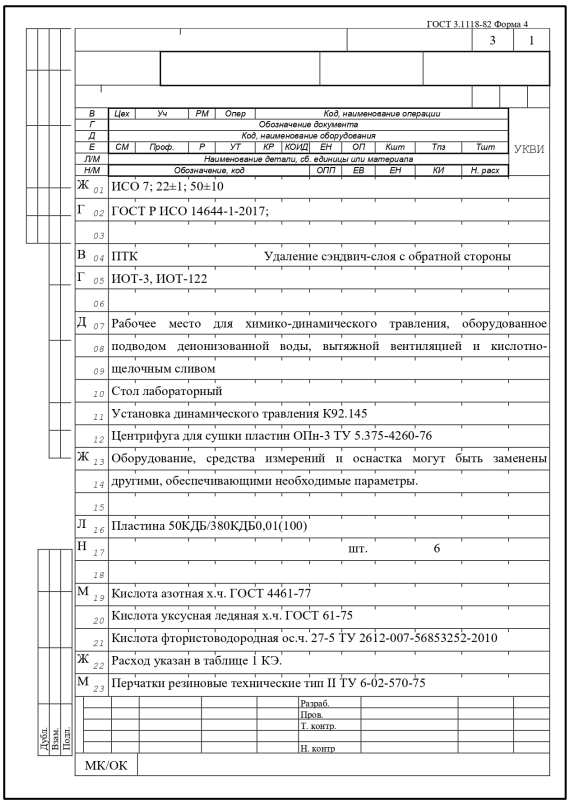


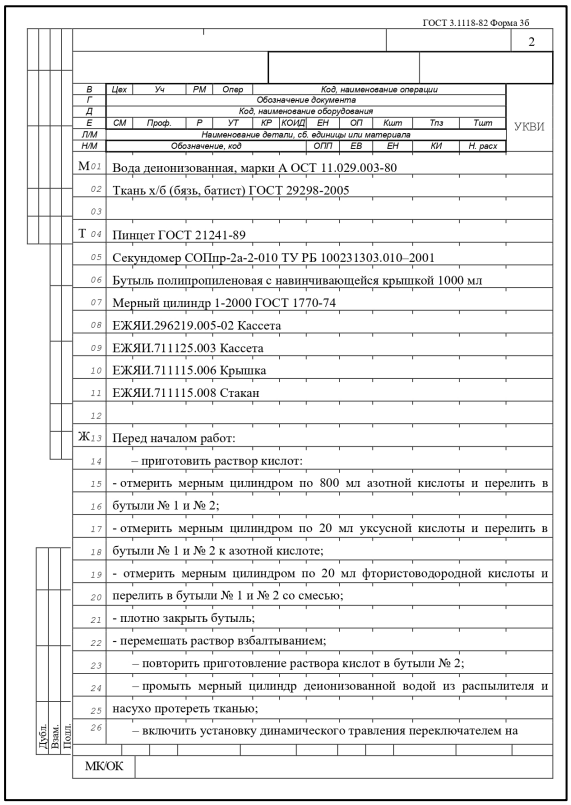
Рисунок 55 – ОК Защита лицевой стороны пластины ХВ-784:

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

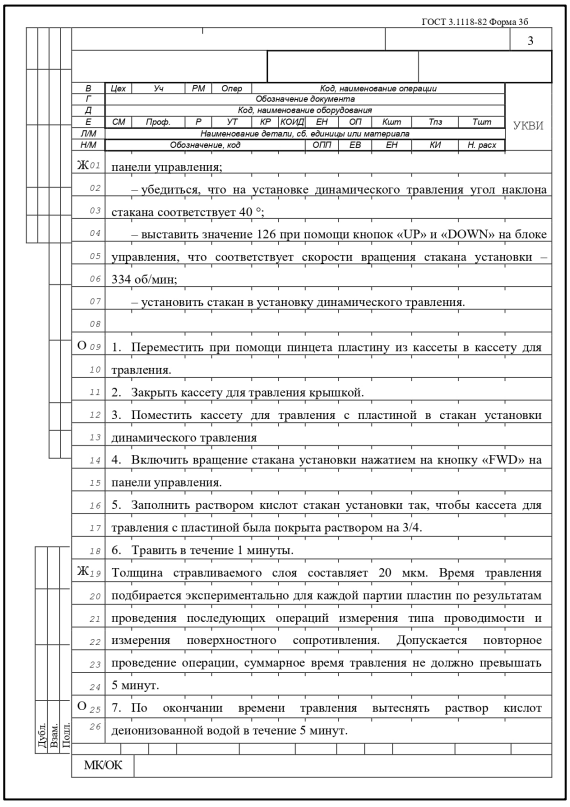
а)



б)



в)



г)

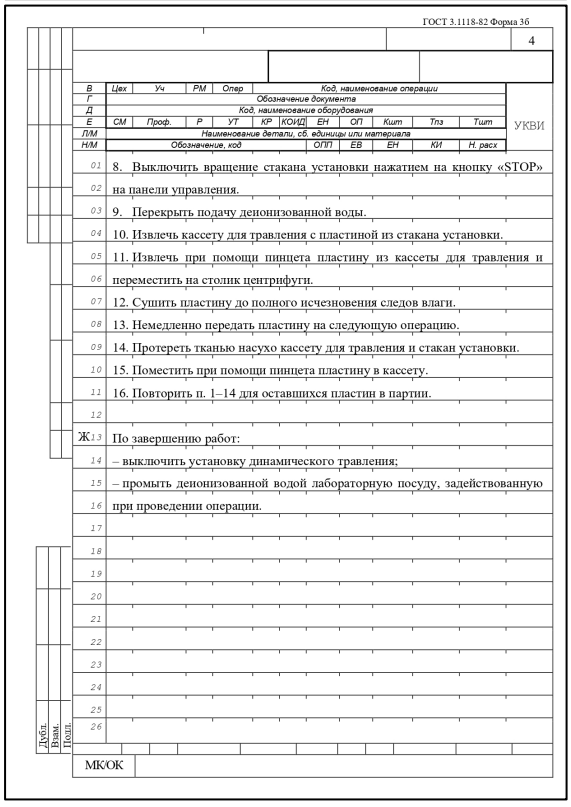
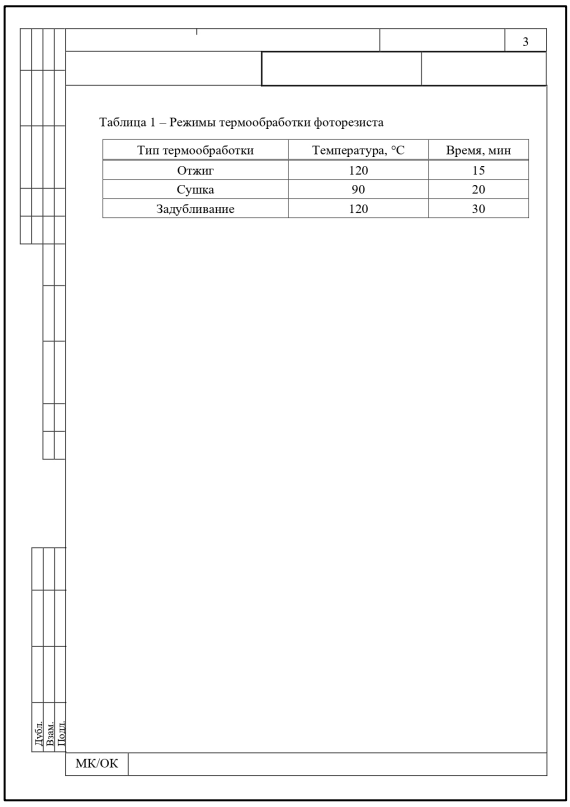


Рисунок 56 – ОК Удаление сэндвич-слоя с обратной стороны пластины (1):

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.



3

Таблица 1 – Режимы термообработки фоторезиста

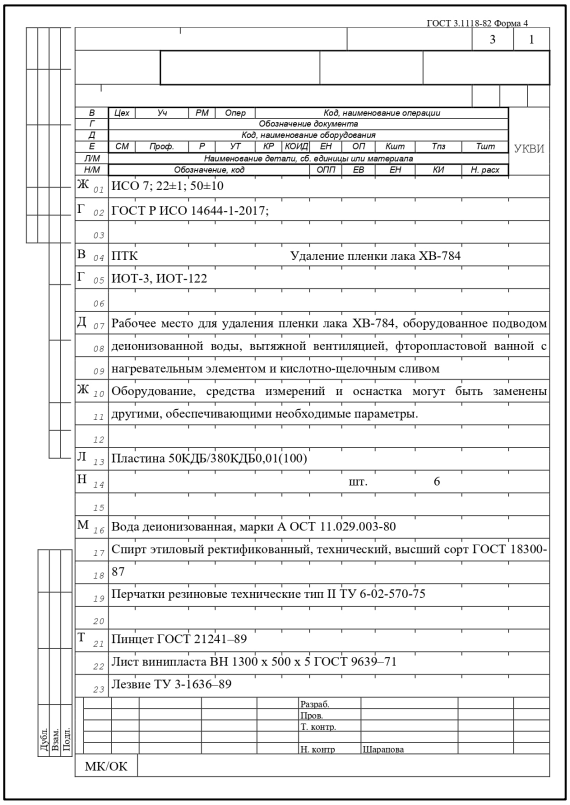
Тип термообработки	Температура, °С	Время, мин
Отжиг	120	15
Сушка	90	20
Задубливание	120	30

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

Рисунок 57 – ОК Удаление сэндвич-слоя с обратной стороны пластины (2)

а)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 4

3 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

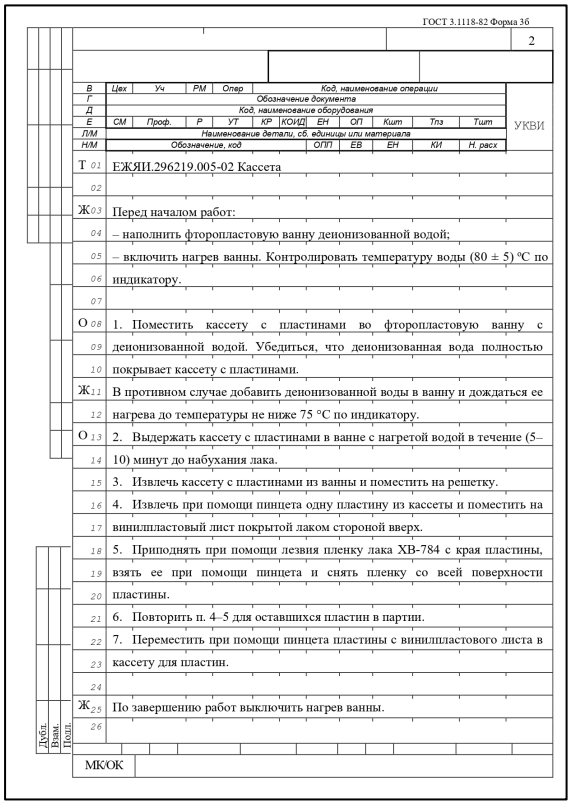
Ж	01	ИСО 7; 22±1; 50±10
Г	02	ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017;
	03	
В	04	ПТК Удаление пленки лака ХВ-784
Г	05	ИОТ-3, ИОТ-122
	06	
Д	07	Рабочее место для удаления пленки лака ХВ-784, оборудованное подводом
	08	деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной с
	09	нагревательным элементом и кислотно-щелочным сливом
Ж	10	Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
	11	другими, обеспечивающими необходимые параметры.
	12	
Л	13	Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н	14	шт. 6
	15	
М	16	Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80
	17	Спирт этиловый ректификованный, технический, высший сорт ГОСТ 18300-
	18	87
	19	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6-02-570-75
	20	
Т	21	Пинцет ГОСТ 21241–89
	22	Лист винипласта ВН 1300 х 500 х 5 ГОСТ 9639–71
	23	Лезвие ТУ 3-1636–89

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр Шарапова

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

2

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКВИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Т	01	ЕЖЯИ.296219.005-02 Кассета
	02	
Ж	03	Перед началом работ:
	04	– наполнить фторопластовую ванну деионизованной водой;
	05	– включить нагрев ванны. Контролировать температуру воды (80 ± 5) °С по
	06	индикатору.
	07	
О	08	1. Поместить кассету с пластинами во фторопластовую ванну с
	09	деионизованной водой. Убедиться, что деионизованная вода полностью
	10	покрывает кассету с пластинами.
Ж	11	В противном случае добавить деионизованной воды в ванну и дождаться ее
	12	нагрева до температуры не ниже 75 °С по индикатору.
О	13	2. Выдержать кассету с пластинами в ванне с нагретой водой в течение (5–
	14	10) минут до набухания лака.
	15	3. Извлечь кассету с пластинами из ванны и поместить на решетку.
	16	4. Извлечь при помощи пинцета одну пластину из кассеты и поместить на
	17	винилпластовый лист покрытой лаком стороной вверх.
	18	5. Приподнять при помощи лезвия пленку лака ХВ-784 с края пластины,
	19	взять ее при помощи пинцета и снять пленку со всей поверхности
	20	пластины.
	21	6. Повторить п. 4–5 для оставшихся пластин в партии.
	22	7. Переместить при помощи пинцета пластины с винилпластового листа в
	23	кассету для пластин.
	24	
Ж	25	По завершению работ выключить нагрев ванны.
	26	

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

Рисунок 58 – ОК Удаление пленки лака ХВ-784:

а – стр. 1; б – стр. 2.

Травление слоя диоксида кремния жидкостным методом обычно проводится в растворе фторида аммония, изготовленного по ТУ 6–09–01–646–83, и фтористоводородной кислоты в соотношении NH_4F:HF = 10:1 [74]. Эскизный маршрут изготовления фоточувствительного кристалла предполагает травление слоев диоксида кремния с толщинами 0,18 мкм и 0,67 мкм через маски фоторезиста. Имеющаяся технологическая база задает времена травления таких пленок (5–9) мин и (13–15) мин, соответственно, с постоянным визуальным контролем цветности поверхности полупроводниковой структуры. Одновременно с травлением диэлектрического слоя на лицевой стороне полупроводниковой пластины осуществляется травление и с обратной стороны. Описание процесса жидкостного травления диоксида кремния через маску фоторезиста в смеси фторида аммония и фтористоводородной кислоты представлено на рисунке 59.

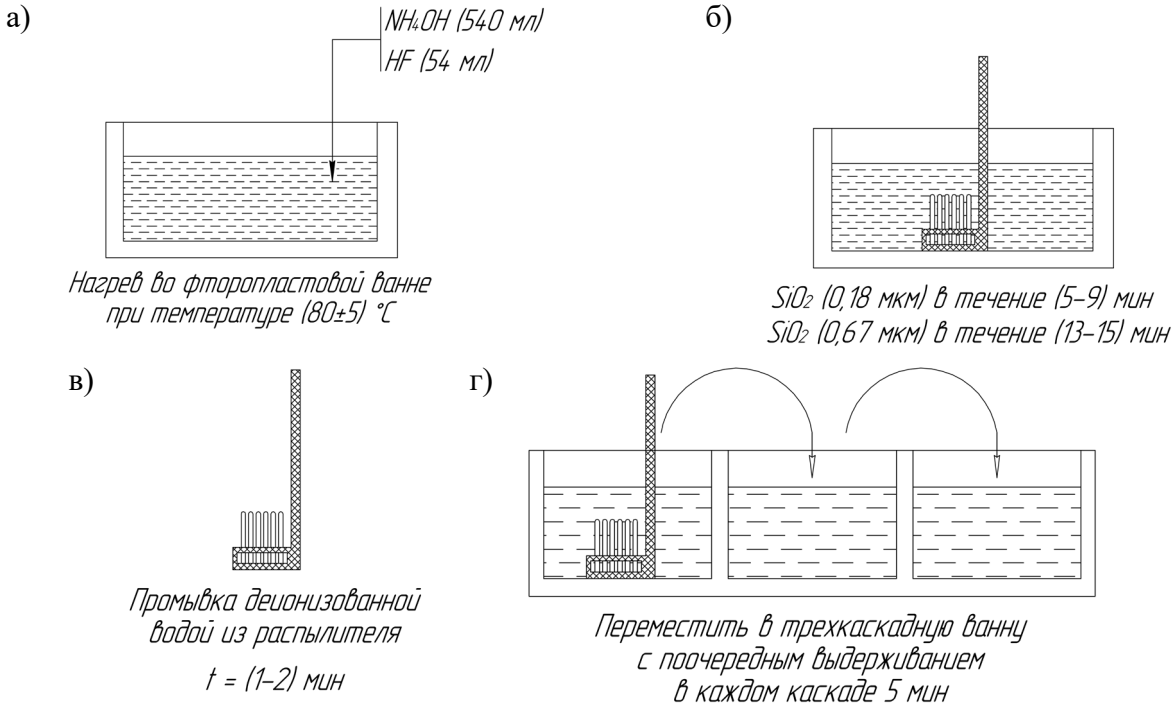
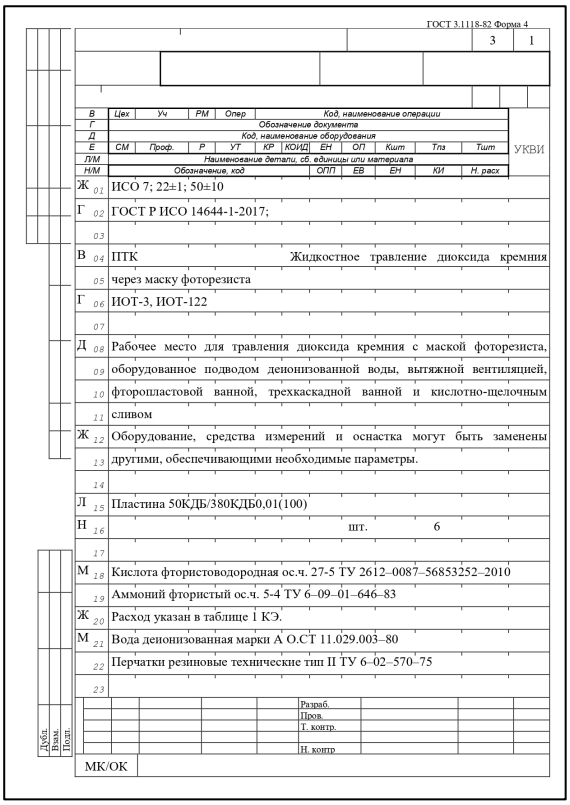


Рисунок 59 – Жидкостное травление диоксида кремния через маску фоторезиста:
а – подготовка; б – травление; в – промывка деионизованной водой;
г – промывка в трехкаскадной ванне.

Статистическая оценка возможностей технологического процесса жидкостного травления диоксида кремния через маску фоторезиста представлена в подразделе 3.4.

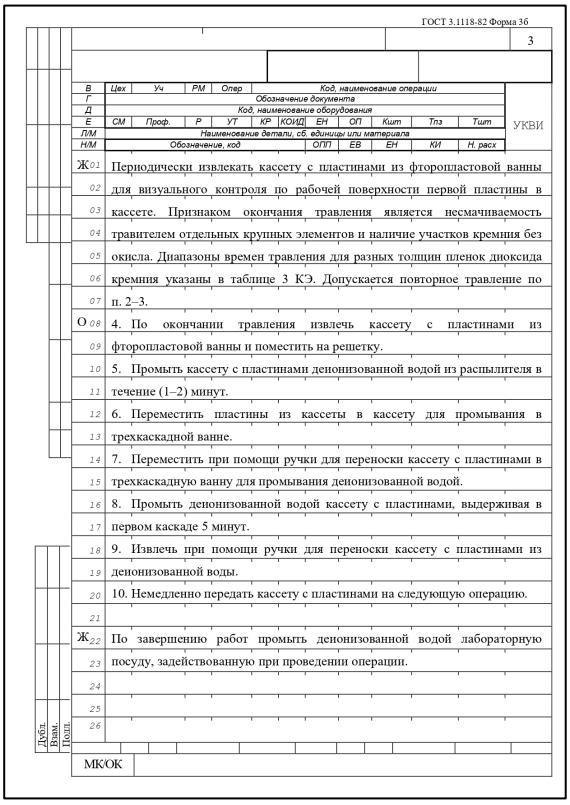
Разработанные операционные карты жидкостного травления SiO_2 приведены на рисунках 60 и 61.

а)



б)

в)



г)

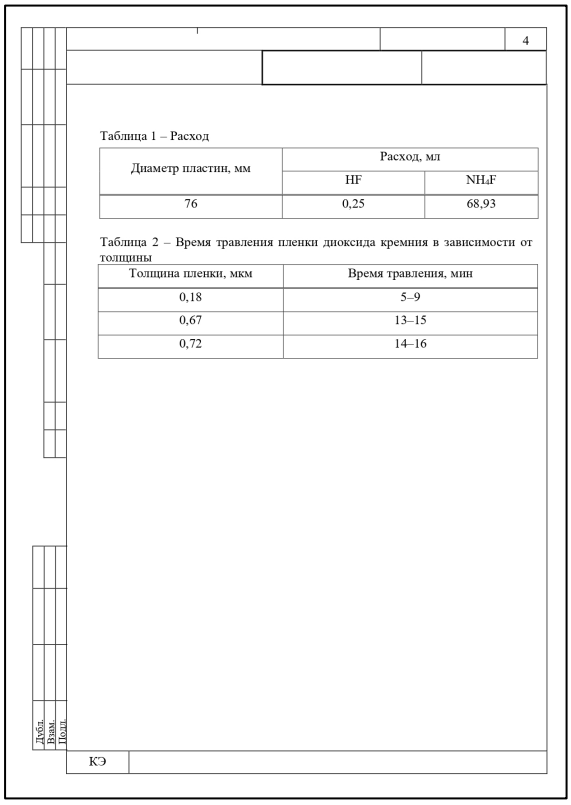
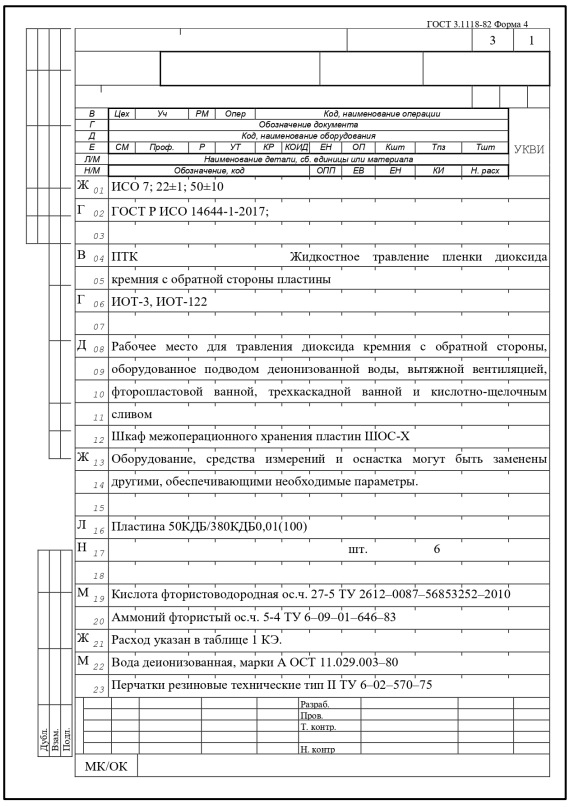
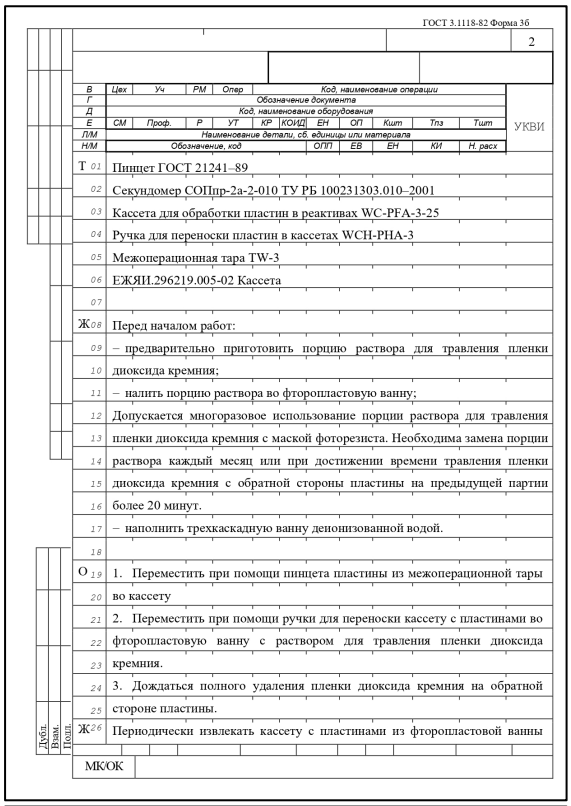


Рисунок 60 – ОК Жидкостное травление пленки диоксида кремния через маску фоторезиста: а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

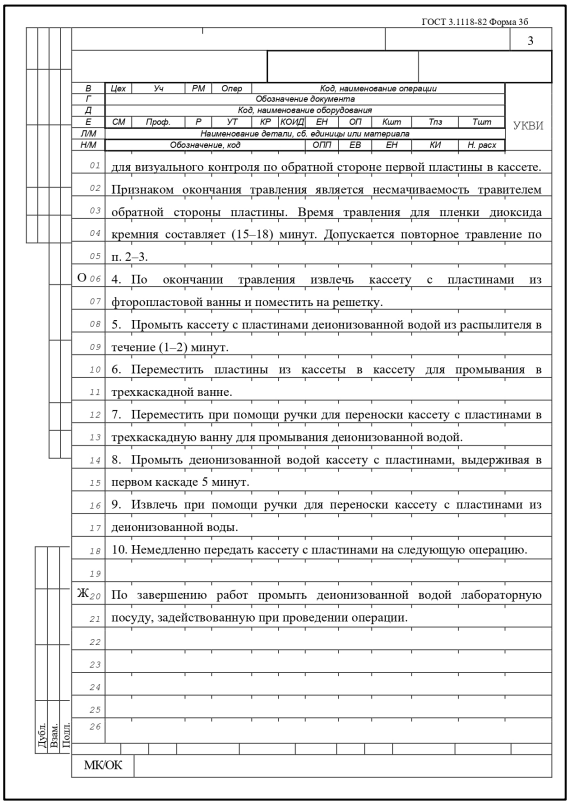
а)



б)



в)



г)

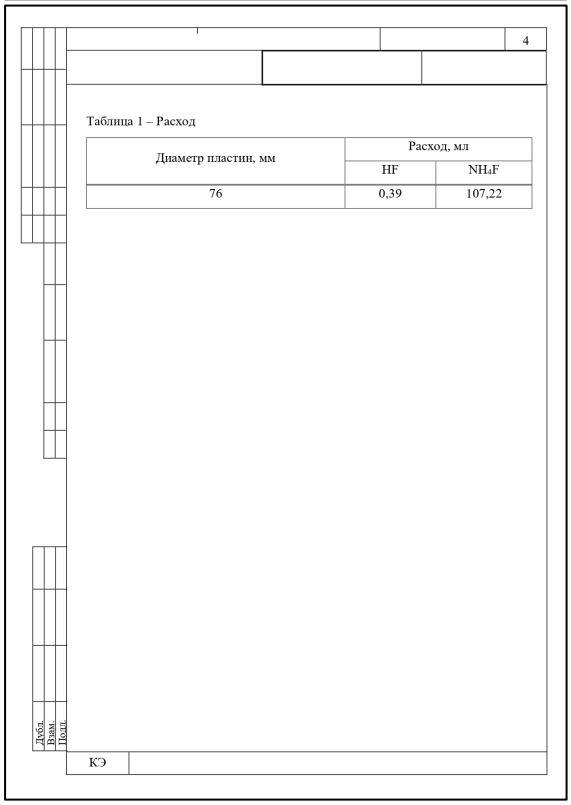


Рисунок 61 – ОК Жидкостное травление пленки диоксида кремния с обратной стороны пластины: а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

Жидкостное травление слоя хрома осуществляется в цериевом травителе с добавлением серной кислоты [75]. Данный раствор содержит оксид хрома (IV), изготовленный по ГОСТ 3776–78, сернокислый церий четырехводный, изготовленный по ТУ 6–09–1646–77, и серную кислоту,

изготовленную по ГОСТ 14262–78, в соотношении CrO_3:$Ce(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$:H_2SO_4 = 3:2:10. Травление слоя хрома в получаемом цериевом травителе проводится во фторопластовой чашке при ее непрерывном покачивании в течение (2,0–2,5) мин.

Жидкостное травление слоя золота проводится в растворе йода в йодиде. в йодистоводородной кислоте, изготовленной по ГОСТ 4200–77, с растворенным в ней кристаллическим йодом, изготовленным по ГОСТ 4159–79. На травление одной пластины требуется HI в объеме 3,97 мл и I_2 в количестве 0,12 г. Травление слоя золота проводится погружением в кварцевый стакан с полученной смесью в течение более 2 мин с постоянным визуальным контролем цветности поверхности пластины до достижения слоя хрома. Также известны растворы KI/I_2 и Na/I_2 в качестве жидкостных травителей пленки золота, описанные в [76] и [77].

Выделение металлических слоев желательно проводить через одну маску фоторезиста. Это позволит предупредить возникновение двойного контура слоев хрома и золота, что неизбежно при проведении повторной фотолитографии с одинаковым топологическим рисунком. Маски фоторезистов марок ФП-9120-1 и ФП-3520 успешно выдерживают воздействие обоих составов травителей в допустимых пределах времен жидкостного травления. Описание процесса жидкостного травления двухслойной металлизации Cr/Au через маску фоторезиста представлено на рисунке 62.

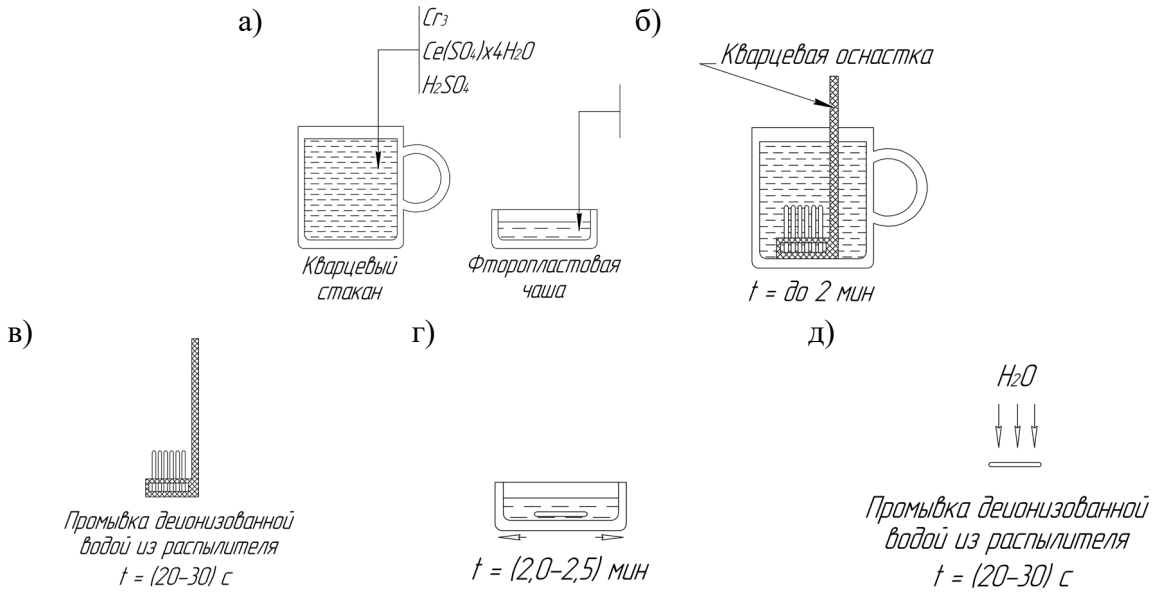
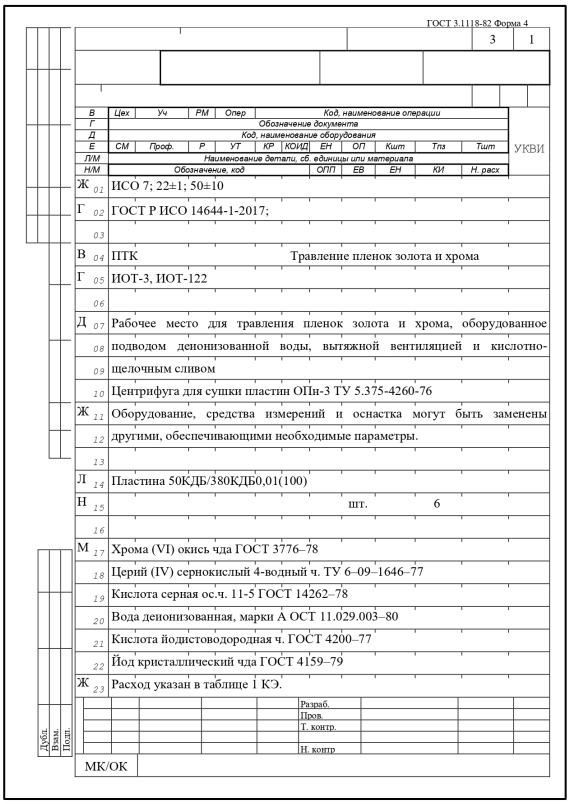


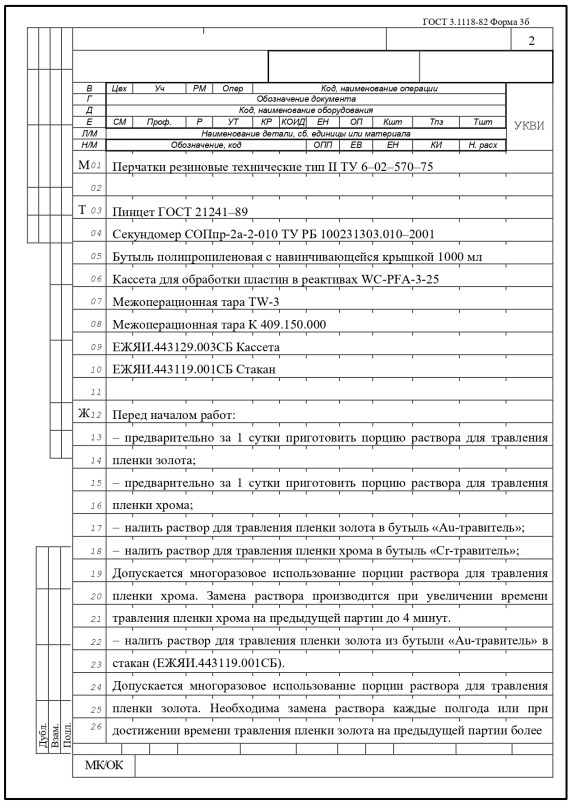
Рисунок 62 – Жидкостное травление металлизации Cr/Au через маску фоторезиста:
а – подготовка; б – травление пленки Au; в – промывка деионизованной водой;
г – травление пленки Cr; д – промывка деионизованной водой.

Разработанная операционная карта жидкостного травления пленок золота и хрома приведена на рисунках 63 и 64.

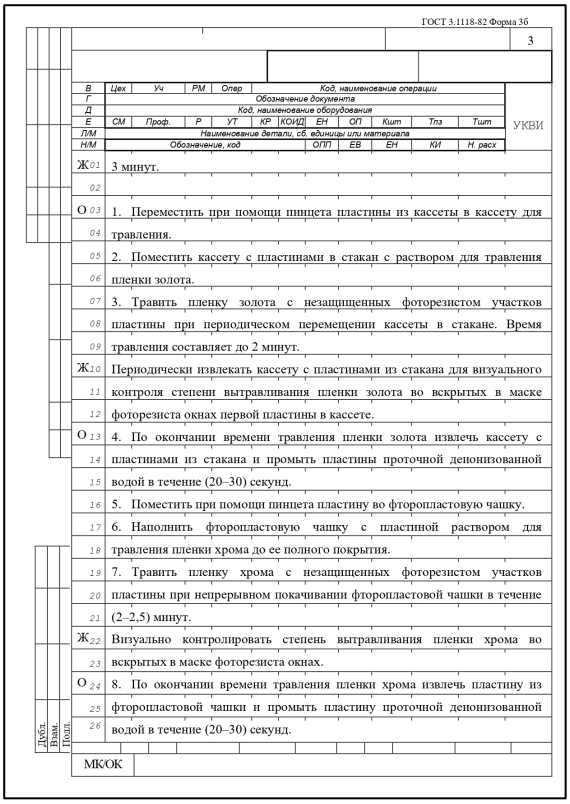
а)



б)



в)



г)

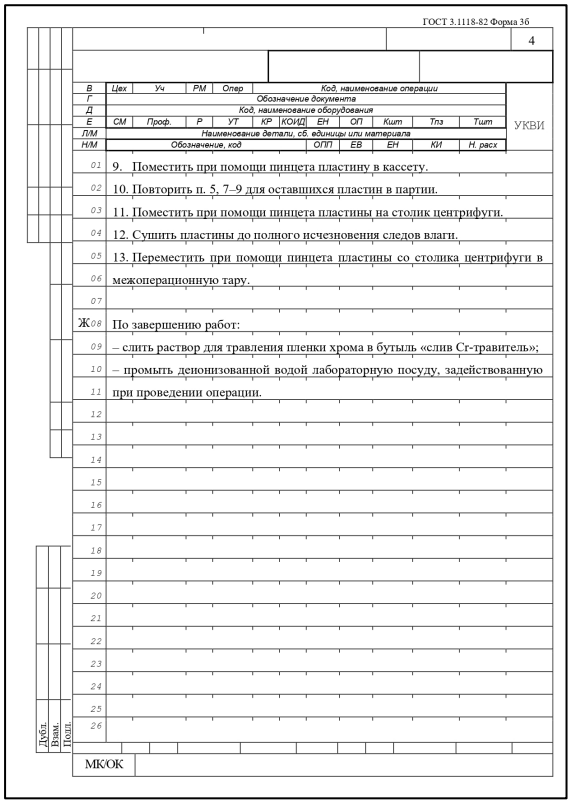


Рисунок 63 – ОК Травление пленок золота и хрома (1):

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

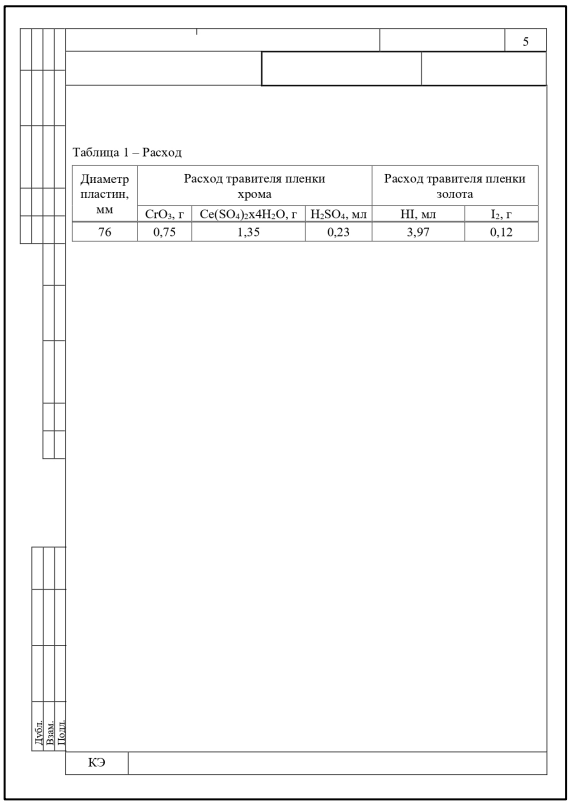


Рисунок 64 – ОК Травление пленок золота и хрома (2)

3.1.4 Термические процессы

Термические процессы применяются для выращивания оксидных пленок на поверхности и создания высоколегированных областей в объеме полупроводниковой пластины, а также отжига радиационных дефектов, возникающих в приповерхностной области пластины при ионной имплантации примесей, и активации этих примесей.

В соответствии с эскизным технологическим маршрутом изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД необходимо проведение термических процессов, таких как:

— термическое окисление пластины до толщины слоя SiO_2 толщиной 0,18 мкм для пассивации поверхности пластины перед ионной имплантации примесями;

— термическое осаждение слоя Si_3N_4;

— разгонка имплантированной примеси бора;

— разгонка имплантированной примеси фосфора и выращивание просветляющей пленки SiO_2;

— быстрый термический отжиг в среде H_2.

При термическом окислении полупроводниковые пластины размещаются на кварцевой лодочке, которая затем загружается в рабочую зону разогретой кварцевой трубы однозонной диффузионной печи СДОМ-3/100. Термическое окисление разделяется на следующие стадии: первичное окисление поверхности полупроводниковой пластины, адсорбция ионов кислорода поверхностью выращенного окисла, их диффузия к границе с неокисленным кремнием и собственно окисление. Термическое окисление проводится как в среде сухого кислорода, так и в последовательной комбинации сред сухого кислорода и кислорода с парами воды, или влажного кислорода [78]. При этом скорость окисления в случае сухого кислорода на порядок ниже, чем в среде влажного кислорода. Это связано с коэффициентом диффузии кислорода в пленке SiO_2, величина которого значительно меньше, чем у водорода и воды при тех же условиях. Так, при температуре 1050 ºС коэффициент диффузии атомов кислорода в пленке диоксида кремния равен $2{,}8 \cdot 10^{-14}$ см^2/с, атомов водорода – $2 \cdot 10^{-6}$ см^2/с, атомов воды – $9 \cdot 10^{-10}$ см^2/с. Однако получаемая таким образом диэлектрическая пленка обладает меньшей дефектностью, поскольку за счет отсутствия водорода и паров воды в выращиваемой оксидной пленке отсутствуют и гидроксильные группы, вследствие чего кислород и кремний могут образовывать прочные связи.

При выращивании пленки диоксида кремния на эпитаксиальной пластине без легированных слоев и других диэлектрических пленок возможно проведение термического окисления в среде сухого кислорода без ограничений, налагаемых на длительность или температуру процесса. В связи с этим получение пленки SiO_2 толщиной 0,18 мкм возможно при высокой температуре 1150 ºС в течение 70 мин.

Одним из известных способов получения тонких пленок Si_3N_4 является термическое осаждение из газовой смести дихлорсилана и аммиака. Данный процесс проводится в реакторе диффузионной печи при температуре 750 ºС в течение 20 мин. Осаждение осуществляется за счет протекания реакции силана с аммиаком по формуле (33) [79]:

$$3SiH_2Cl_2 + 4NH_3 = SiN_4 + 6HCl + 6H_2. \quad (33)$$

Схема термического осаждения пленки Si_3N_4 из газовой смеси приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Термическое осаждение пленки Si_3N_4 из газовой смеси

№ п/п	Интервал	Нагрев печи	Продувка реактора	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Осаждение	Остывание с печью	Выдержка пластин на краю реактора	Выгрузка пластин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Длительность, мин	–	10	10	15	20	120	7	10
2	Температура, ºС	–	750	750	750	750	300	300	–
3	Расход N_2 в реакторе, л/ч	60	–	–	–	–	60	60	60
4	Расход SiH_2Cl_2 в реакторе, л/ч	–	10	10	10	10	–	–	–
5	Расход NH_2 в реакторе, л/ч	–	20	20	20	20	–	–	–

Разгонки имплантированных примесей проводятся в аналогичных однозонных диффузионных печах СДОМ-3/100. Для диффузии используемых примесей бора и фосфора температуры процессов должны быть в пределах (1000–1200) ºС. Стандартными температурами разгонки примеси бора и фосфора на используемой производственной линии являются 1150 ºС и 1050 ºС, соответственно.

Разгонка бора проводится на пластинах, поверхность которых предварительно запассивирована Si_3N_4. Пассивация нитридом кремния необходима для предотвращения обратной диффузии имплантированной примеси. Выращивание оксидной пленки кремния не требуется, по этой причине данный технологический процесс необходимо проводить в бескислородной среде – среда азота. Разгонку фосфора было решено объединить с наращиванием просветляющей оксидной пленки до толщины (0,18–0,20) мкм.

Загрузку и выгрузку пластин для проведения всех термических процессов в рабочую зону диффузионной печи важно проводить медленно во избежание резкого градиента температур на пластине и, как следствие, возникновения дефектов ее кристаллической структуры. По завершению термического процесса печь самостоятельно охлаждается до температуры не более 600 ºС, после чего лодочка с пластинами может быть перемещена ближе к зоне загрузки/выгрузки. Выгрузка лодочки с пластинами осуществляется по достижению температуры не более 300 ºС.

Схема термического окисления в среде сухого кислорода приведена в таблице 15.

Таблица 15 – Термическое окисление в O_2

№ п/п	Интервал	Нагрев печи	Продувка реактора	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Окисление	Остывание с печью	Выдержка пластин на краю реактора	Выгрузка пластин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Длительность, мин	–	10	10	15	65	300*	7	10
2	Температура, ºС	–	1150	1150	1150	1150	600	300	–
3	Расход N_2 в реакторе, л/ч	60	–	–	–	–	60	60	60
4	Расход O_2 в реакторе, л/ч	–	90	90	90	90	–	–	–
* – или при остывании диффузионной печи до температуры не выше 600 ºС.									

Схемы разгонок примеси бора в среде азота и примеси фосфора в средах сухого и влажного кислорода приведены в таблице 16 в таблице 17, соответственно.

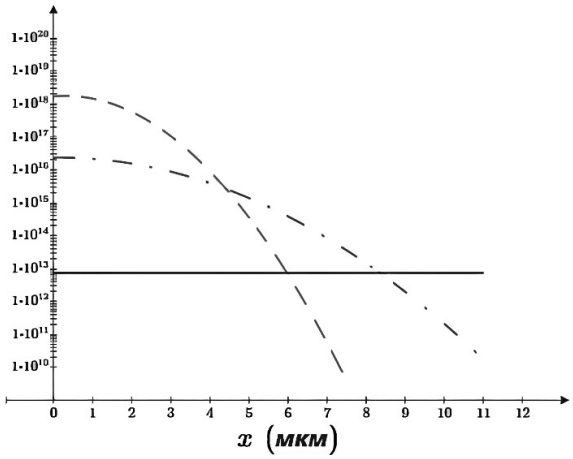
Таблица 16 – Разгонка примеси бора в N_2

№ п/п	Интервал	Нагрев печи	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Разгонка примеси	Остывание с печью	Выдержка пластин на краю реактора	Выгрузка пластин
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Длительность, мин	–	10	15	**	300*	7	10
2	Температура, ºС	–	1150	1150	1150	600	300	–
3	Расход N_2 в реакторе, л/ч	60	60	60	60	60	60	60
* – или при остывании диффузионной печи до температуры не выше 600 ºС; ** – длительность разгонки определена ниже.								

Таблица 17 – Разгонка примеси фосфора в сухом и влажном O_2

№ п/п	Интервал	Нагрев печи	Продувка реактора	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Окисление сухое	Окисление влажное	Окисление сухое	Остывание с печью	Выдержка пластин на краю реактора	Выгрузка пластин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Длительность, мин	–	10	10	15	60	**	60	300*	7	10
2	Температура, ºС	–	1050	1050	1050	1050	1050	1050	600	300	–
3	Расход N_2 в реакторе, л/ч	60	–	–	–	–	–	–	60	60	60
4	Расход O_2 в реакторе, л/ч	–	90	90	90	90	–	90	–	–	–
5	Расход O_2/H_2O в реакторе, л/ч	–	–	–	–	–	80	–	–	–	–
* – или при остывании диффузионной печи до температуры не выше 600 ºС; ** – длительность разгонки определена ниже.											

При этом в разрезе эскизного технологического маршрута изготовления при подборе длительности процесса разгонки фосфора важно учитывать наличие уже имплантированной и разогнанной примеси бора, которая также будет диффундировать вглубь полупроводниковой пластины во время разгонки фосфора. Одновременно с этим, с разгонкой фосфора происходит и активация имплантированной примеси аргона на обратной стороне пластины, выполняющей функцию геттерирования структуры. При определении времен процессов разгонки важно учитывать параметры загонки легирующих примесей, в данном случае, ионной имплантации, определяющие их концентрации в приповерхностной области эпитаксиальной пластины. Для получения требуемой *n–p–i–p* структуры распределение концентраций в подложке должно быть, как показано на рисунке 65.



Сплошная линия – эпитаксиальный слой;

штриховая линия – примесь n^+-типа проводимости;

штрихпунктирная линия – примесь p-типа проводимости.

Рисунок 65 – Распределение концентраций в пластине

Это достигается при ионной имплантации с энергией ускоренных ионов 100 кэВ и дозой облучения $1{,}2 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ для примеси бора и 100 кэВ и $5{,}0 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ для примеси фосфора с временами разгонок 7,7 ч и 2,0 ч, соответственно. Однако данные значения являются ориентировочными и требуют изготовления экспериментальных партий фоточувствительных кристаллов для уточнения длительностей термодиффузионных процессов.

Параметры режима проведения быстрого термического отжига в среде H_2 были определены ранее в подразделе 2.3. Более подробно технологический процесс ионной имплантации рассматривается в следующем подразделе 3.1.5.

3.1.5 Ионная имплантация

Ионная имплантация применяется для легирования полупроводниковой пластины ионизированными атомами примеси, в результате чего создается область определенного типа проводимости. Данный технологический процесс заключается в бомбардировке полупроводниковой пластины пучком ускоренных ионов с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ и обеспечивает точность вводимой в полупроводник дозы примеси и локальность легирования при значительно более низких температурах в сравнении с диффузионным легированием.

На рисунке 66 приведен общий вид ионно-лучевой установки. Условно установка разделяется на четыре камеры. Камера 1 является ионным источником, в который через клапан

подается рабочее вещество, атомы которого под действием разряда между анодом и катодом ионизируются и образуют плазму. Большой отрицательный потенциал, поданный на экстрактор, вынуждает положительно заряженные ионы притягиваться, тем самым выделяя их из плазмы и создавая начальный поток ионов рабочего вещества. Данный поток попадает в камеру 2 с ускоряющими магнитами, фокусирующими линзами и фильтром разделения ионов, которые формируют пучок ионов, придают ионам необходимую энергию и отсеивают их по массе. Камер 3 предназначена для осуществления контроля массы вещества проходящего через нее пучка ионов, а в камере 4 происходит непосредственное ионное легирование полупроводниковых пластин, закрепленных на вращающемся диске.

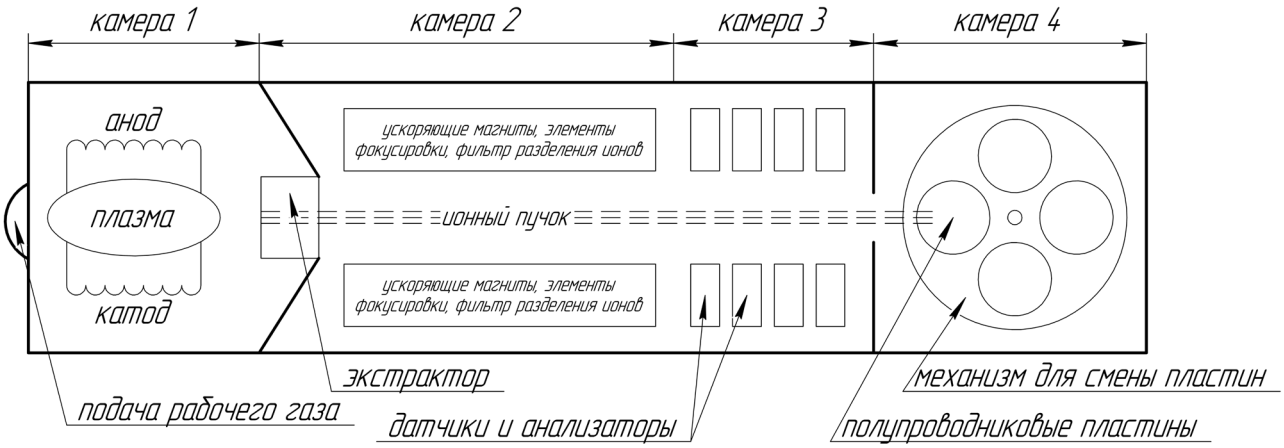


Рисунок 66 – Общий вид ионно-лучевой установки

На рассматриваемой производственной площадке применяется инно-лучевая установка Scanibal SCI 218 производства Balzers. Регулирование развертки профиля сканирования ионного пучка осуществляется визуально на экране осциллографа. По достижению корректного изображения необходимо поддерживать ионный ток пучка, одновременно с этим вращающийся диск с полупроводниковыми пластинами начинает вращение до скорости 120 об/мин. При проведение технологического процесса на заданном имплантере необходимо соблюдение требований, приведенных в таблице 18.

Таблица 18 – Требования к параметрам процесса

№ п/п	Параметр	Значение
1	2	3
1	Вытягивающее напряжение, кВ	39,6–40,0
2	Ток соленоида, А	1–5

Окончание таблицы 18.

1	2	3
3	Перемещение вытягивающего электрода, %	
	по OX	0–70
	по OY	20–70
4	Мощность накала катода, кВт	0,36–0,60
5	Напряжение дуги, В	30–180
6	Давление в источнике, мбар	$(1,5–8,0)\cdot10^{-5}$
7	Давление в камере, мбар	$(3–60)\cdot10^{-7}$
8	Профиль сканирования	по осциллографу

В таблице 19 приведены режимы проведения процессов ионной имплантации для различных примесей, энергий ионов и получаемых доз легирования.

Таблица 19 – Режимы ионной имплантации

№ п/п	Ион легирования	Рабочее вещество	Энергия ионов *E*, кэВ	Доза легирования, *D*		Ток анализирующего магнита, А	Ток квадроупольной линзы, А	
				ион/см^2	мкКл/см^2		1	2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	B^+	BF_3	40	$3,0\cdot10^{13}$	4,8	14,0–14,4	3–4	4–5
2	B^+	BF_3	50	$6,9\cdot10^{12}$	1,1	14,0–14,4	3–4	4–5
3	B^+	BF_3	70	$4,0\cdot10^{11}$	0,064	14,0–14,4	3–4	3–4
4	B^+	BF_3	70	$6,0\cdot10^{14}$	96,0	14,0–14,4	4–5	4–5
5	B^+	BF_3	100	$6,0\cdot10^{11}$	0,1	14,0–14,4	3–5	4–5
6	B^+	BF_3	100	$2,0\cdot10^{12}$	0,32	14,0–14,4	3–5	4–5
7	B^+	BF_3	100	$5,5\cdot10^{12}$	0,88	14,0–14,4	3–5	4–5
8	B^+	BF_3	100	$6,9\cdot10^{12}$	1,1	14,0–14,4	3–5	4–5
9	B^+	BF_3	100	$1,2\cdot10^{13}$	5,0	14,0–14,4	3–5	3–5
10	B^+	BF_3	100	$4,7\cdot10^{14}$	75,0	14,0–14,4	3–5	3–5
11	B^+	BF_3	100	$1,0\cdot10^{15}$	160,0	14,0–14,4	3–5	3–5
12	P^+	PCl_3	100	$5,0\cdot10^{14}$	80,0	23,6–24,0	6–8	6–9
13	P^+	PCl_3	100	$6,0\cdot10^{14}$	96,0	23,7–24,0	6–8	6–9

Окончание таблицы 19.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14	Ar^+	Ar^+	100	$2{,}0\cdot10^{15}$	320,0	26,8–27,3	10–13	10–15
15	Ar^+	Ar^+	100	$1{,}0\cdot10^{16}$	1600,0	26,8–27,3	10–13	10–15

Как ранее было определено, карман и стоп-области *p*-типа проводимости формируются ионным легированием примеси бора. Примесь фосфора необходима для создания активной области n^+-типа проводимости. Аргон внедряется в полупроводниковую пластину с обратной стороны для геттерирования дефектов фоточувствительной структуры.

При этом требуемыми режимами для получения распределения концентраций, представленных на рисунке 65 являются 9 – для ионной имплантации примеси бора и 12 – для ионной имплантации примеси фосфора. Для геттерирования дефектов доза примеси аргона должна быть не менее 10^{15}, поэтому достаточным является режим 14.

3.1.6 Напыление металлизации

Напыление металлизации проводится на двух сторонах пластины, при этом толщина слоя хрома на лицевой стороне составляет 0,02 мкм, на обратной стороне – 0,005 мкм. Для напыления обоих слоев металлизации используется установка вакуумного напыления Leybold Heraeus L-560, позволяющая проводить магнетронное напыление и резистивное напыление в одном процессе без выгрузки из рабочей камеры.

Перед проведением процесса пластины устанавливаются напыляемой стороной на металлическую плоскую кассету и фиксируются вкрученными отверткой винтами. В одном процессе участвуют две плоские кассеты с общем количеством пластин на них, равным 6 шт. Кассеты с пластинами ставятся на карусель, осуществляющую их вращение.

Магнетронное напыление хрома осуществляется распылением соответствующей мишени с предварительным нагревом кассеты с пластинами для достижения однородности получаемой пленки. Откачка рабочей камеры реализуется высоким вакуумом до значения $2\cdot10^{-6}$ мбар и далее аргоновой магистралью до значения $2\cdot10^{-5}$ мбар. Непосредственное осаждение пленки хрома проводится при рабочем давлении $5\cdot10^{-3}$ в течение 60 с на лицевую сторону пластин и в течение 20 с на обратную сторону пластин и регулируется положением заслонки между мишенью и вращающейся на карусели кассетой с пластинами. Мощность разряда равна 250 Вт и 180 Вт для напыления металла на лицевую и обратную стороны пластин, соответственно.

Резистивное напыление золота осуществляется из разогреваемой в испарителе навески золота. Предварительно рабочая камера откачивается до давления, равного $2 \cdot 10^{-5}$ мбар. Активация испарения навески золота достигается регулированием индикатора тока испарителя до значений 34 уд. ед. и 40 уд. ед., где уд. ед. определяются ручкой индикатора, для каждой из сторон пластин. Длительность напыления золота составляет 420 с и 180 с для лицевой и обратной сторон пластин. Различие длительностей и величин токов для процессов напыления золота, осуществляемых на разных сторонах пластин, определяется необходимостью предотвращения чрезмерного разогревания лицевой стороны пластины.

3.1.7 Пооперационный технологический контроль

Осуществление качественного контроля полупроводниковых структур играет важную роль на всех этапах их изготовления. Раннее выявление различного рода несовершенств позволяет, во-первых, своевременно начать комплексную работу по поиску мероприятий для их предотвращения или устранения и, во-вторых, определить характер их влияния на конечную структуру.

В рамках обоих эскизных маршрутов изготовления фоточувствительного кристалла ЛФД необходимо проведение контрольных мер на многих этапах изготовления, а именно:

1. контроль пластин перед запуском партии;
2. контроль после удаления сэндвич-слоя на обратной стороне;
3. контроль пластин после химической обработки в АПР;
4. контроль пластин после термических процессов;
5. контроль пластин после проявления фоторезиста;
6. контроль маски фоторезиста;
7. контроль пластин после травления диэлектрических и металлических слоев;
8. контроль пластин после удаления маски фоторезиста;
9. контроль адгезии металлизации Cr/Au с обеих сторон пластин;
10. контроль толщины металлизации Cr/Au на лицевой стороне пластин;
11. контроль коэффициента взаимосвязи k;
12. контроль коэффициента умножения;
13. контроль токовой монохроматической чувствительности;
14. контроль темновых токов;
15. контроль внешнего вида кристаллов.

Контроль перед запуском партии пластин по маршруту изготовления включает визуальный осмотр, измерение толщины и измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя.

Визуальный осмотр пластин проводится на рабочей стороне с использованием оптического микроскопа Olympus DSX1000 при увеличениях 1^x, 10^x и 40^x по пяти областям в двух режимах – светлое и темное поля. Допускается наличие не более 6 царапин длиной до 400 мкм и шириной до 10 мкм, не более 10 светлых точек в темном поле и не более 3 исчезающих рисок с общей длиной не более значения диаметра пластины. Контроль толщины осуществляется на микрометре в пяти точках по пластине, допуск по разнотолщинности TTV соответствует 15 мкм. Измерение удельного сопротивления эпитаксиального слоя пластин проводится четырехзондовым методом в пяти точках пластины. Полученные значения удельного сопротивление должно быть не менее 1 кОм·см. Схема измерения четырехзондовым методом приведена на рисунке 67.

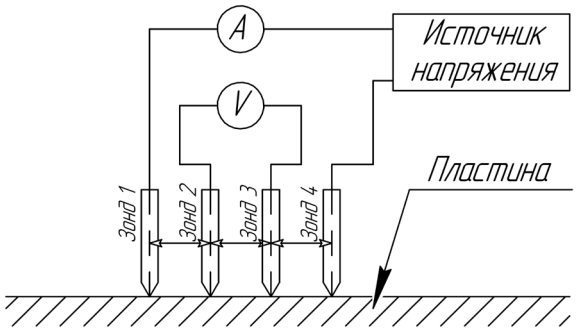


Рисунок 67 – Схема измерения четырехзондовым методом

При равных расстояниях между зондами измерение разности потенциалов между зондами 2 и 3 вследствие пропускания электрического тока на зондах 1 и 4 позволяет рассчитать удельное сопротивление полупроводника по следующей формуле (34):

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}, \tag{34}$$

где s – расстояние между зондами;

U_{23} – падение напряжения на измерительных зондах 2 и 3;

I_{14} – ток, протекающий между измерительными зондами 1 и 4.

Контроль после удаления сэндвич-слоя на обратной стороне пластины заключается в измерении на микрометре толщины стравленного жертвенного слоя, величина которого должна быть порядка 20 мкм.

Контроль после химической обработки в аммиачно-перекисном растворе осуществляется на оптическом микроскопе Olympus DSX1000 при увеличении 10^x. Наличие на рабочей стороне пластины недосушенных капель воды, частиц пыли, волокон, крошки и т.п. недопустимо. При их обнаружении требуется проведение повторной химической обработки.

Контроль пластин после термических процессов проводится посредство измерения толщины и показателя преломления выращенных диэлектрических покрытий эллипсометрическим методом. Данный метод заключается в регистрации изменений поляризованного монохроматического пучка света, возникающих вследствие его взаимодействия с исследуемым образцом. На рисунке 68 приведена функциональная схема используемого оборудования – эллипсометр ЛЭФ-3М-1. Эллипсометр ЛЭФ-3М-1 состоит из плеча поляризатора, плеча анализатора и электронного блока обработки, функционально связанных друг с другом. Устройством поворота плеч поляризатора и анализатора достигается изменение угла падения падающего монохроматического пучка света на исследуемый образец в пределах (45–90) º, а отсчетным устройством – угол его падения на образец.

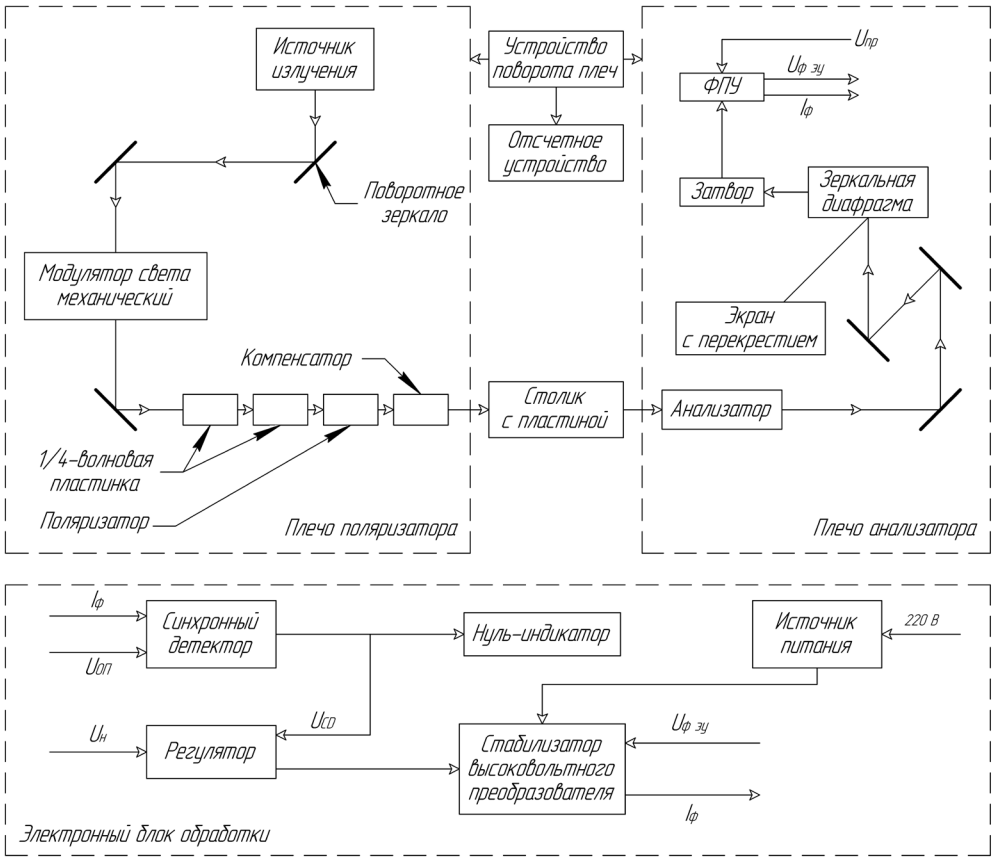


Рисунок 68 – Функциональная схема эллипсометра ЛЭФ-3М-1

В рамках эскизного технологического маршрута требуемыми толщинами пленки диоксида кремния при термическом окислении являются 0,18 мкм и 0,67 мкм, нитрида кремния – 0,10 мкм. Измеряемые значения параметров выращенных пленок SiO_2 должны лежать в пределах (0,17–0,19) мкм и (0,66–0,68) мкм – для толщины пленки, и в пределах (1,45–1,46) – для показателя преломления в соответствии с [80]. Измеряемые значения параметров выращенных пленок Si_3N_4 должны лежать в пределах (0,9–1,1) мкм – для толщины пленки, и в пределах (1,95–2,10) – для показателя преломления в соответствии с [81] и [82]. Заданные пределы обеспечивают получение диэлектрических покрытий с требуемыми стехиометриями.

Контроль пластин после проявления фоторезиста и контроль маски фоторезиста проводятся на оптическом микроскопе МБС при увеличении 12^x под неактиничным освещением желтого цвета с длиной волны не менее 0,58 мкм для предотвращения нежелательной засветки слоя фоторезиста. Края проявленного фоторезиста и маски фоторезиста должны воспроизводить края используемого фотошаблона, а на проявленных участках не должно быть следов недопроявленного фоторезиста. При контроле пластин после проявления и при обнаружении таких следов допускается проведение повторной операции проявления фоторезиста.

Разработанные операционные карты для контроля пластин после проявления и контроля сформированной маски фоторезиста приведены на рисунках 69 и 70.

а)

ГОСТ 3.1118-82 Форма 4

3 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	УКВИ
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Ж	01	ИСО 7; 22±1; 50±10
Г	02	ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017;
	03	
В	04	ПТК Контроль пластин после проявления
Г	05	ИОТ-3, ИОТ-122
	06	
Д	07	Стол лабораторный
Ж	08	Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
	09	другими, обеспечивающими необходимые параметры.
	10	
Л	11	Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н	12	шт. 6
	13	
М	14	Спирт этиловый ректификованный, технический, высший сорт ГОСТ 18300–
	15	87
	16	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005
	17	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75
	18	
Т	19	Микроскоп Olympus DSX1000
Ж	20	Допускается замена на микроскоп МБС-9 ТУ3-3.1210–78
Т	21	Пинцет ГОСТ 21241–89
	22	Чашка ЧБН-1-100 Петри ГОСТ 23932–90
	23	Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр
Дубл.
Взам.
Подп.
МК/ОК

б)

ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

2

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	УКВИ
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

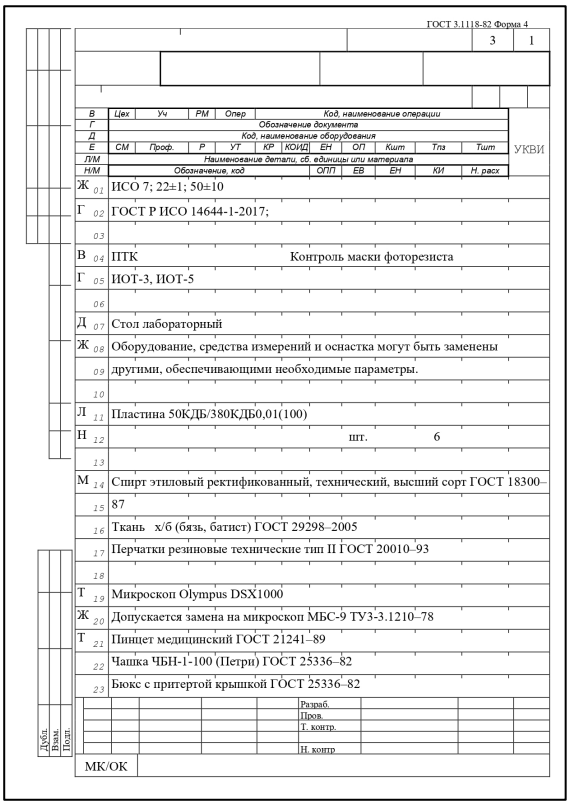
Ж	01	Допускается замена на капельницу 3-50 ХС ГОСТ 25336–82
Т	02	Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25
	03	
Ж	04	Перед началом работ:
	05	– протереть тканью, смоченной спиртом, предметный столик микроскопа;
	06	– включить микроскоп.
	07	
О	08	1. Поместить при помощи пинцета пластину из кассеты на столик
	09	микроскопа рабочей стороной вверх.
	10	2. Проверить качество пластины после проявления при увеличении
	11	микроскопа 10^x. Край проявленного фоторезиста должен полностью
	12	воспроизводить край фотошаблона.
Ж	13	На проявленных участках не должно быть следов непроявленного
	14	фоторезиста. Допускается повторное проведение операции проявления
	15	фоторезиста при обнаружении следов непроявленного фоторезиста.
О	16	3. Поместить при помощи пинцета пластину в кассету.
	17	4. Повторить п. (1–3) для оставшихся пластин в партии.
	18	
Ж	19	Хранить ткань в чашке Петри, хранить спирт в бюксе.
	20	
	21	По завершению работ выключить микроскоп.
	22	
	23	
	24	
	25	
	26	

Дубл.
Взам.
Подп.
МК/ОК

Рисунок 69 – ОК Контроль пластин после проявления:

а – стр. 1; б – стр. 2.

а)



б)

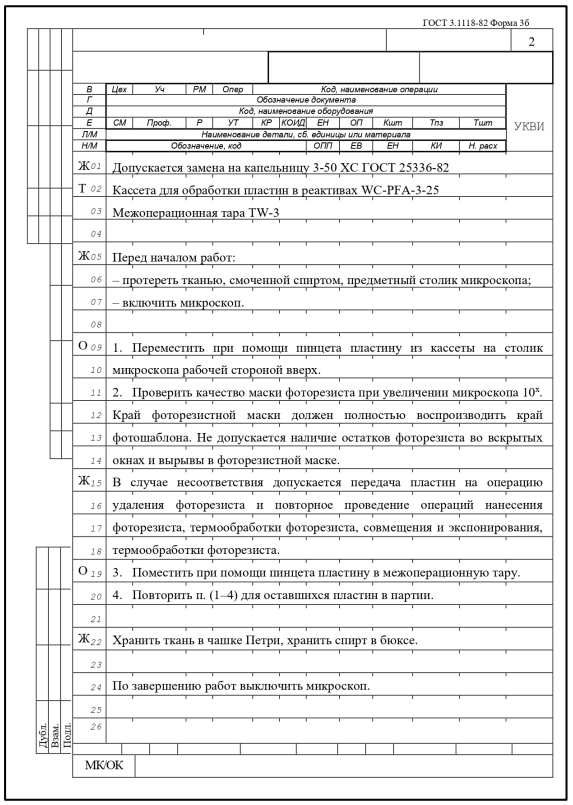
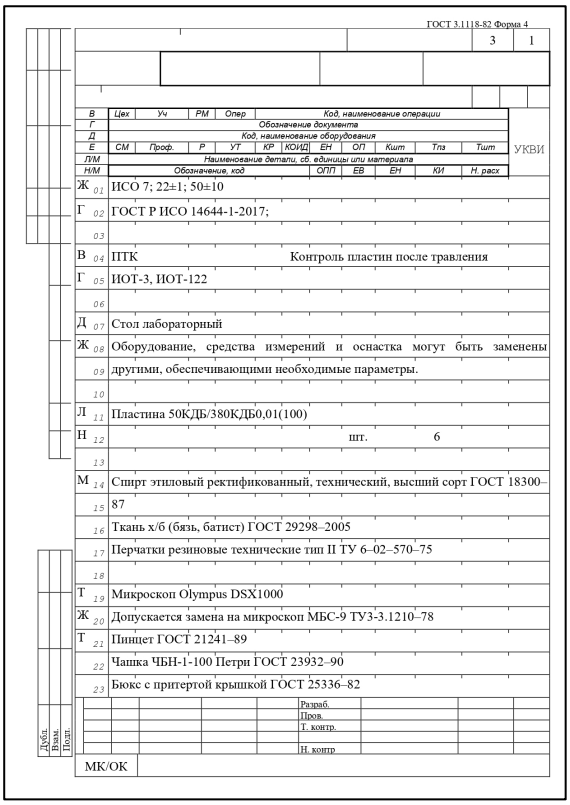


Рисунок 70 – ОК Контроль маски фоторезиста: а – стр. 1; б – стр. 2.

Контроль пластин непосредственно после травления диэлектрических и металлических слоев также производится с применением оптической микроскопии, в результате которой край вытравленного топологического рисунка должен полностью совпадать с краем маски фоторезиста в отсутствии подтравок под слой фоторезиста размером более 1 мкм от края.

Разработанная операционная карта для контроля пластин после жидкостного травления приведена на рисунке 71.

а)



б)

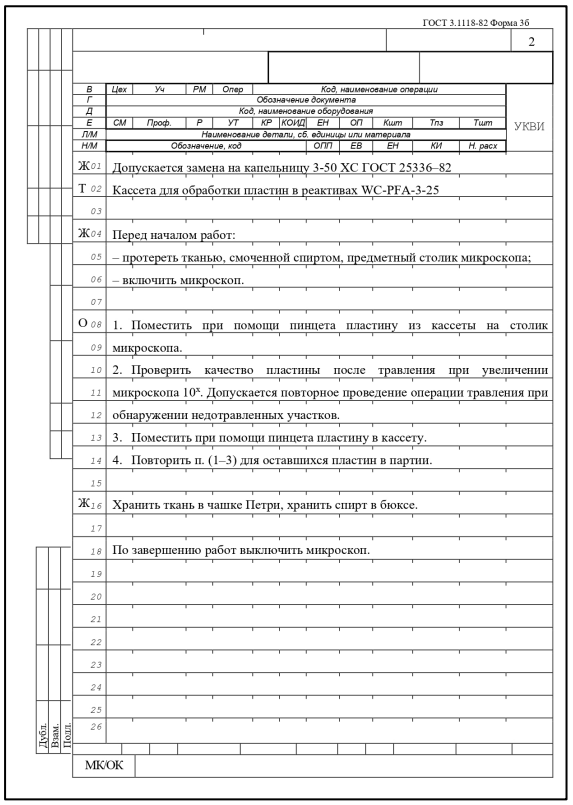


Рисунок 71 – ОК Контроль пластин после травления: а – стр. 1; б – стр. 2

Контроль пластин после удаления маски фоторезиста необходим для предупреждения наличия остатков недоснятого фоторезиста на поверхности и осуществляется визуальным осмотром. Разработанная операционная карта для контроля пластин после удаления фоторезиста приведена на рисунке 72.

а) б)

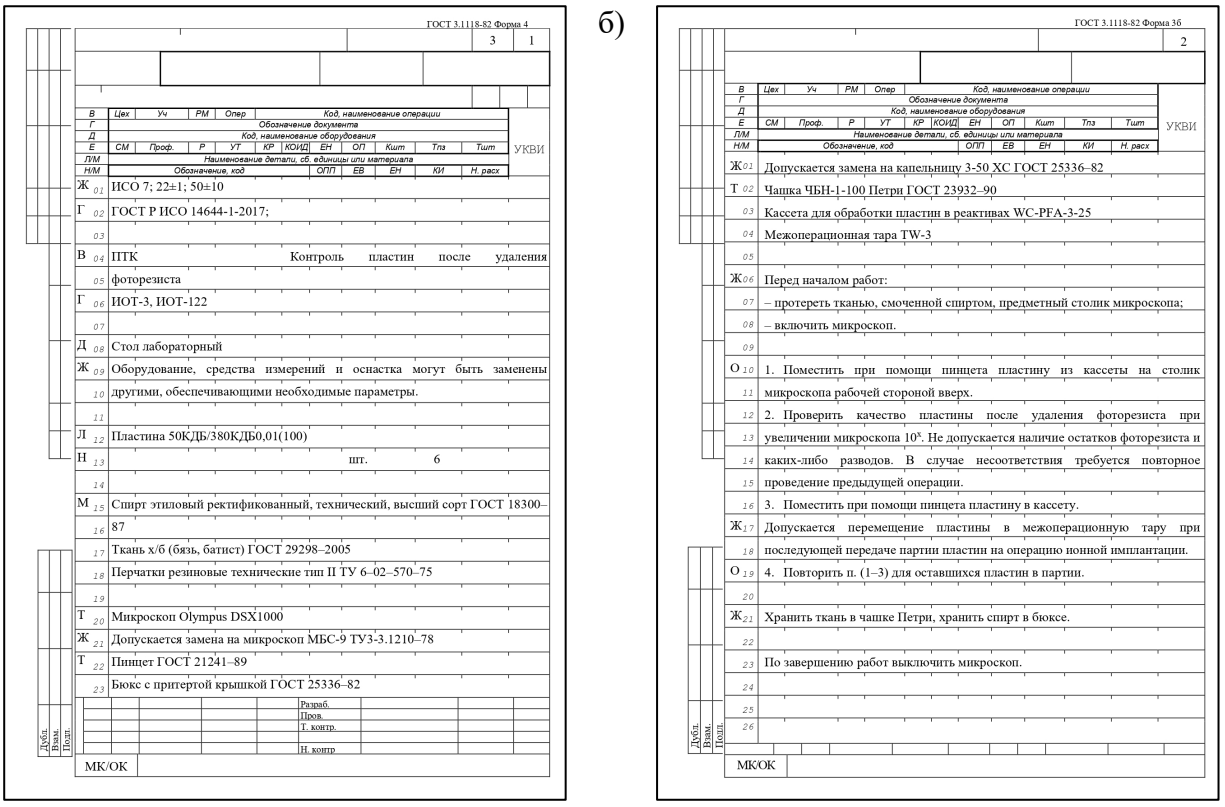


Рисунок 72 – ОК Контроль пластин после удаления фоторезиста: а – стр. 1; б – стр. 2

Контроль адгезии металлизации Cr/Au требуется для своевременного выявления зачатков отслоения как слоя золота от адгезионного подслоя, так и слоя хрома от поверхности полупроводника посредством нанесения нескольких рисок на краях пластины пинцетом. Наблюдение скатывания или подснятия металлической композиции недопустимо и может привести к полному отслоению металлизации при проведении дальнейших технологических процессов и операций или во время разварки золотых проволочек на контактных площадках. В особенности проведение такого контроля важно на обратной стороне пластины, толщина адгезионного подслоя хрома на которой крайне мала и составляет всего 0,005 мкм. При обнаружении недопустимых дефектов металлизации необходимо полное стравливание контролируемых слоев и повторное формирование слоев хрома и золота.

Контроль общей толщины металлизации Cr/Au на лицевой стороне пластины осуществляется с использованием контактного профилометра Bruker Dektak 3030, при этом значение измеряемого параметра должно быть не менее 0,52 мкм. При несоответствии данному условию необходимо проведение повторного формирования металлизации с предварительным полным удалением предыдущих металлических слоев. Вид контактного профилометра приведен на рисунке 73.

Рисунок 73 – Контактный профилометр Bruker Dektak 3030

Контроль коэффициента взаимосвязи k между панарно расположенными фоточувствительными элементами необходим для своевременной изоляции кристаллов, не соответствующих заданному требованию, и заключается в измерении паразитных сигналов, считываемых на соседних фоточувствительных элементах, при падении пятна рабочего излучения на конкретный фоточувствительный элемент. Расчет значения коэффициента взаимосвязи проводится по формуле (35):

$$k_{x-y} = \frac{U_y}{U_x} \cdot 100\ \%, \tag{35}$$

где k_{x-y} – коэффициент взаимосвязи между элементами x и y, где $x < y$, при этом пятно излучения выставлено на элементе x;

U_x, U_y – величина паразитного сигнала на элементах.

Допустимым диапазоном для коэффициента взаимосвязи значения до 5 %. На рисунке 74 приведена функциональная схема установки для контроля коэффициента взаимосвязи k.

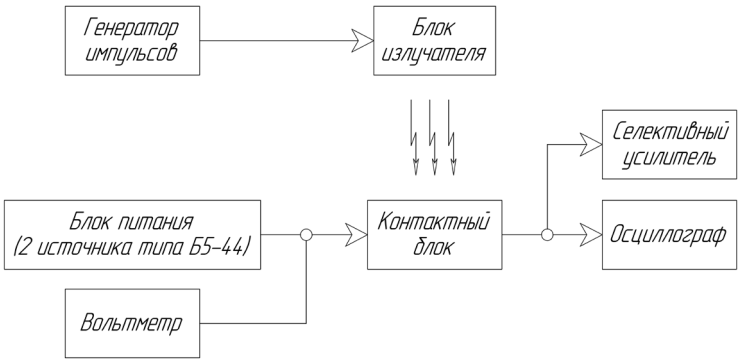


Рисунок 74 – Функциональная схема установки для контроля коэффициента взаимосвязи k

Контроль коэффициента умножения изготовленной линейки ЛФД осуществляется на установке, функциональная схема которой представлена на рисунке 75 [83].

Рисунок 75 – Функциональная схема установки для характеризации параметров фоточувствительных элементов

Двухкоординатным регистратором является экран осциллографа, на котором выводится зависимость, по которой возможно определить максимальную величину параметра и зафиксировать напряжение, при котором происходит микропламенный пробой. На экране осциллографа выводится зависимость, имеющая следующий вид (36):

$$lg\left(1-\frac{1}{M}\right)=f(lg\,U), \tag{36}$$

где M – коэффициент лавинного умножения;

U – напряжение, подаваемое на фоточувствительный элемент.

При измерении параметров лавинного фотодиода, пробой которой по площади *p-n* перехода однороден, зависимость на экране осциллографа будет являться прямой линией с наклоном к оси OY, равным показателю степенной зависимости коэффициента умножения от напряжения, имея следующий вид по формуле (37):

$$M=\frac{1}{1-\left(\frac{U}{U_{\text{пр}}}\right)^{n}}, \tag{37}$$

где M – коэффициент лавинного умножения;

U – напряжение, подаваемое на фоточувствительный элемент;

$U_{\text{пр}}$ – напряжение лавинного пробоя;

n – степенной показатель зависимости M от напряжения.

Как видно, данная прямая не зависит от напряжения и длины волны, являясь константой. В случае, если лавинный пробой неоднороден по площади *p-n* перехода, получаемая линия становится нелинейной, а возникающие острые максимумы соответствуют микроплазме.

Напряжение пробоя измеряемого фоточувствительного элемента определяется в точке пересечения линии с осью ординат.

Контроль токовой монохроматической чувствительности осуществляется на установке, функциональная схема которой представлена на рисунке 76.

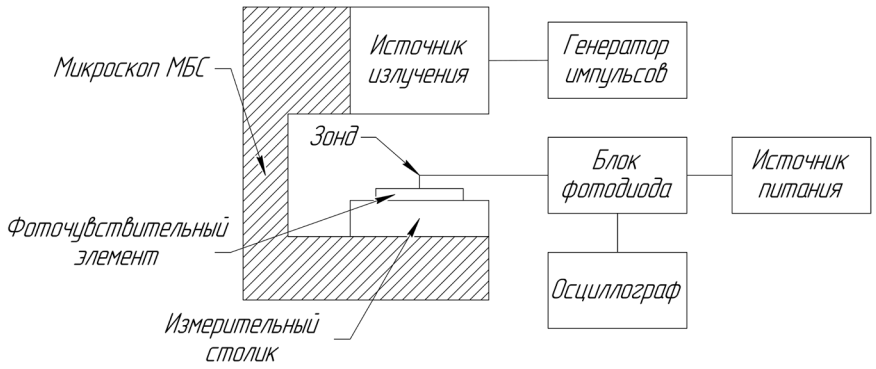


Рисунок 76 – Функциональная схема установки для определения токовой монохроматической чувствительности

Контроль токовой монохроматической чувствительности, или фоточувствительности, проводится подачей рабочего напряжения источником питания GW Instek GPR-730H10D на контактную площадку эталонного образца с известной величиной параметра на заданной длине волны. Далее необходимо определить положение эталонного образца посредством перемещения измерительного столика, при котором достигается максимальное значение величины напряжения на осциллографе. Аналогичное проводится на исследуемом фоточувствительном элементе. Значение токовой монохроматической чувствительности определяется по формуле (38):

$$S = \frac{S_{\text{эталон}} \cdot U}{U_{\text{эталон}}}, \tag{38}$$

где S – фоточувствительность исследуемого образца;

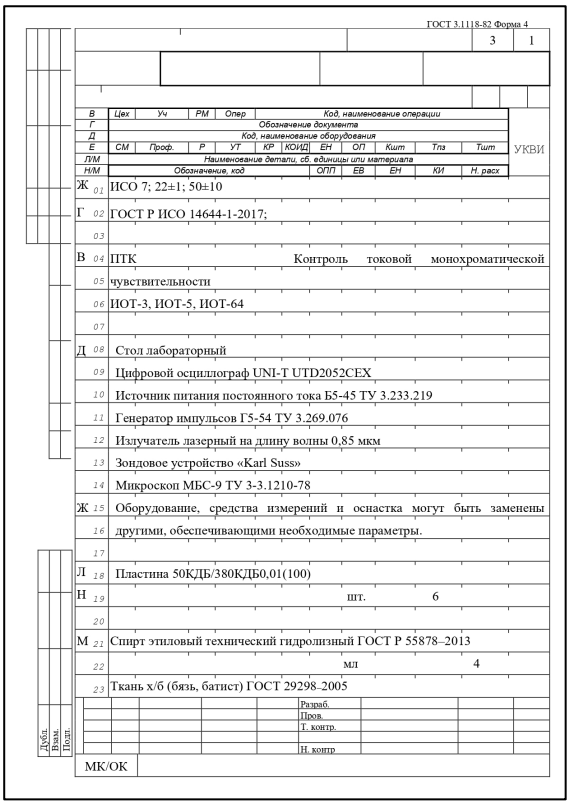
U – напряжение на исследуемом образце;

$S_{\text{эталон}}$ – фоточувствительность эталона;

$U_{\text{эталон}}$ – напряжение на эталоне.

Разработанная операционная карта для контроля токовой монохроматической чувствительности приведена на рисунках 77 и 78.

а)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 4

3 1

В Цех Уч РМ Опер Код, наименование операции
Г Обозначение документа
Д Код, наименование оборудования
Е СМ Проф. Р УТ КР КОИД ЕН ОП Кшт Тпз Тшт
ПМ Наименование детали, сб. единицы или материала
Н/М Обозначение, код ОПП ЕВ ЕН КИ Н. расх
УКВИ

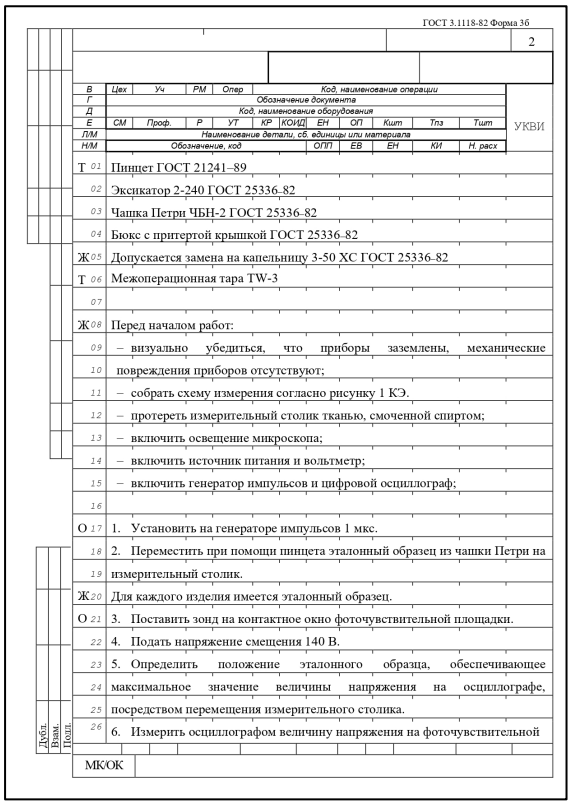
Ж 01 ИСО 7; 22±1; 50±10
Г 02 ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017;
03
В 04 ПТК Контроль токовой монохроматической
05 чувствительности
06 ИОТ-3, ИОТ-5, ИОТ-64
07
Д 08 Стол лабораторный
09 Цифровой осциллограф UNI-T UTD2052CEX
10 Источник питания постоянного тока Б5-45 ТУ 3.233.219
11 Генератор импульсов Г5-54 ТУ 3.269.076
12 Излучатель лазерный на длину волны 0,85 мкм
13 Зондовое устройство «Karl Suss»
14 Микроскоп МБС-9 ТУ 3-3.1210-78
Ж 15 Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
16 другими, обеспечивающими необходимые параметры.
17
Л 18 Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н 19 шт. 6
20
М 21 Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878–2013
22 мл 4
23 Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр

Дубл. Взам. Подп.

МК/ОК

б)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

2

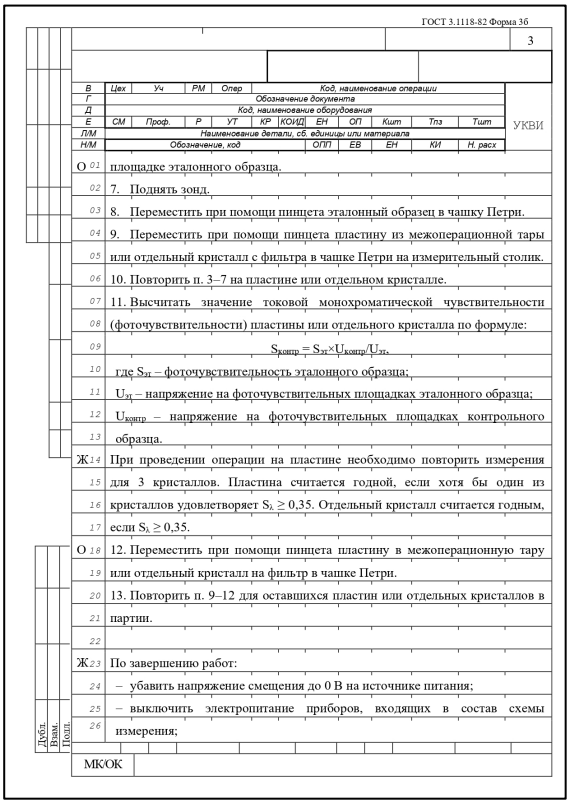
В Цех Уч РМ Опер Код, наименование операции
Г Обозначение документа
Д Код, наименование оборудования
Е СМ Проф. Р УТ КР КОИД ЕН ОП Кшт Тпз Тшт
ПМ Наименование детали, сб. единицы или материала
Н/М Обозначение, код ОПП ЕВ ЕН КИ Н. расх
УКВИ

Т 01 Пинцет ГОСТ 21241–89
02 Эксикатор 2-240 ГОСТ 25336-82
03 Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336-82
04 Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336-82
Ж 05 Допускается замена на капельницу 3-50 ХС ГОСТ 25336-82
Т 06 Межоперационная тара TW-3
07
Ж 08 Перед началом работ:
09 – визуально убедиться, что приборы заземлены, механические
10 повреждения приборов отсутствуют;
11 – собрать схему измерения согласно рисунку 1 КЭ.
12 – протереть измерительный столик тканью, смоченной спиртом;
13 – включить освещение микроскопа;
14 – включить источник питания и вольтметр;
15 – включить генератор импульсов и цифровой осциллограф;
16
О 17 1. Установить на генераторе импульсов 1 мкс.
18 2. Переместить при помощи пинцета эталонный образец из чашки Петри на
19 измерительный столик.
Ж 20 Для каждого изделия имеется эталонный образец.
О 21 3. Поставить зонд на контактное окно фоточувствительной площадки.
22 4. Подать напряжение смещения 140 В.
23 5. Определить положение эталонного образца, обеспечивающее
24 максимальное значение величины напряжения на осциллографе,
25 посредством перемещения измерительного столика.
26 6. Измерить осциллографом величину напряжения на фоточувствительной

Дубл. Взам. Подп.

МК/ОК

в)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

3

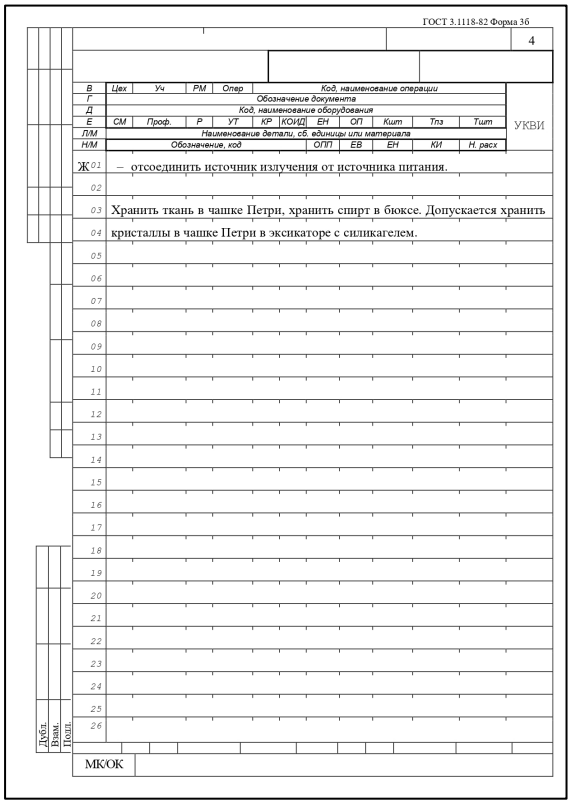
В Цех Уч РМ Опер Код, наименование операции
Г Обозначение документа
Д Код, наименование оборудования
Е СМ Проф. Р УТ КР КОИД ЕН ОП Кшт Тпз Тшт
ПМ Наименование детали, сб. единицы или материала
Н/М Обозначение, код ОПП ЕВ ЕН КИ Н. расх
УКВИ

О 01 площадке эталонного образца.
02 7. Поднять зонд.
03 8. Переместить при помощи пинцета эталонный образец в чашку Петри.
04 9. Переместить при помощи пинцета пластину из межоперационной тары
05 или отдельный кристалл с фильтра в чашке Петри на измерительный столик.
06 10. Повторить п. 3–7 на пластине или отдельном кристалле.
07 11. Высчитать значение токовой монохроматической чувствительности
08 (фоточувствительности) пластины или отдельного кристалла по формуле:
09 $S_{контр} = S_{эт} \times U_{контр} / U_{эт}$,
10 где $S_{эт}$ – фоточувствительность эталонного образца;
11 $U_{эт}$ – напряжение на фоточувствительных площадках эталонного образца;
12 $U_{контр}$ – напряжение на фоточувствительных площадках контрольного
13 образца.
Ж 14 При проведении операции на пластине необходимо повторить измерения
15 для 3 кристаллов. Пластина считается годной, если хотя бы один из
16 кристаллов удовлетворяет $S_x \geq 0,35$. Отдельный кристалл считается годным,
17 если $S_x \geq 0,35$.
О 18 12. Переместить при помощи пинцета пластину в межоперационную тару
19 или отдельный кристалл на фильтр в чашке Петри.
20 13. Повторить п. 9–12 для оставшихся пластин или отдельных кристаллов в
21 партии.
22
Ж 23 По завершению работ:
24 – убавить напряжение смещения до 0 В на источнике питания;
25 – выключить электропитание приборов, входящих в состав схемы
26 измерения;

Дубл. Взам. Подп.

МК/ОК

г)



ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

4

В Цех Уч РМ Опер Код, наименование операции
Г Обозначение документа
Д Код, наименование оборудования
Е СМ Проф. Р УТ КР КОИД ЕН ОП Кшт Тпз Тшт
ПМ Наименование детали, сб. единицы или материала
Н/М Обозначение, код ОПП ЕВ ЕН КИ Н. расх
УКВИ

Ж 01 – отсоединить источник излучения от источника питания.
02
03 Хранить ткань в чашке Петри, хранить спирт в бюксе. Допускается хранить
04 кристаллы в чашке Петри в эксикаторе с силикагелем.
05
06
07
08
09
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26

Дубл. Взам. Подп.

МК/ОК

Рисунок 77 – ОК Контроль токовой монохроматической чувствительности (1):

а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

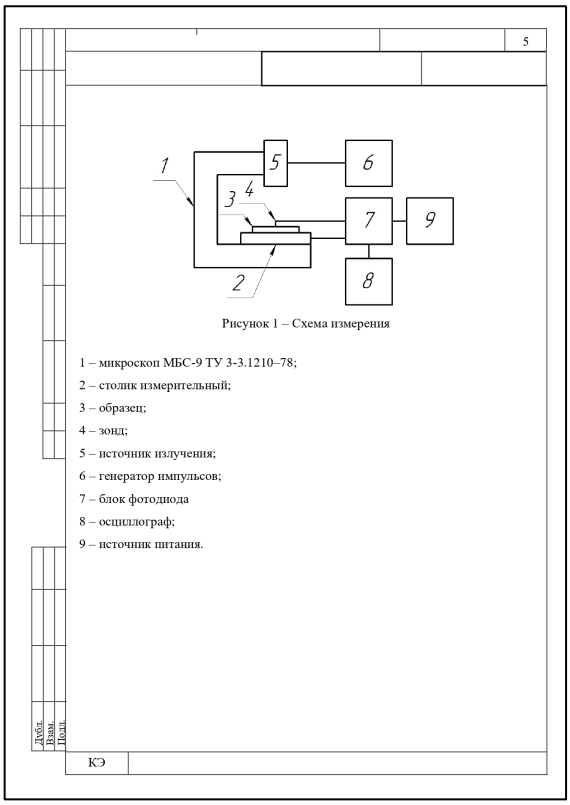


Рисунок 78 – ОК Контроль токовой монохроматической чувствительности (2)

Контроль темновых токов осуществляется на измерительной системе Karl Suss PM-5 с подключенными к ней источником питания GW Instek GPR-730H10D и вольтметром В7-40/5. Вид измерительной системы приведен на рисунке 79. Уровень темновых токов должен быть не более 15 нА.

Рисунок 79 – Измерительная система Karl Suss PM-5

Разработанная операционная карта для контроля темновых токов приведена на рисунке 80.

а)

ГОСТ 3.1118-82 Форма 4

3 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	УКВИ
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Ж 01 ИСО 7; 22±1; 50±10

Г 02 ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017;

03

В 04 ПТК Измерение темновых токов

05 ИОТ-3, ИОТ-5, ИОТ-64

06

Д 07 Стол лабораторный

08 Вольтметр В7-40/5 ТГ 2.710.016 ТУ

09 Источник питания GW Instek GPR-730H10D

10 Система многозондовая измерительная PM-5 «Karl Suss»

Ж 11 Оборудование и оснастка могут быть заменены другими,

12 обеспечивающими необходимые параметры.

13

Л 14 Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)

Н 15 шт. 6

16

М 17 Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878–2013

18 мл 4

19 Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005

20 Ткань хлопчатобумажная (черная) ГОСТ 29298–92

21

Т 22 Пинцет ГОСТ 21241–89

23 Эксикатор 2-240 ГОСТ 25336-82

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)

ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

2

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	УКВИ
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Т 01 Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336-82

02 Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336-82

Ж 03 Допускается замена на капельницу 3-50 ХС ГОСТ 25336-82

Т 04 Межоперационная тара TW-3

05

Ж 06 Перед началом работ:

07 – собрать схему измерения согласно рисунку 1 КЭ;

08 – протереть координатный столик измерительной многозондовой

09 системы тканью, смоченной спиртом;

10 – включить освещение измерительной многозондовой установки;

11 – включить источник питания и вольтметр.

12

О 13 1. Переместить при помощи пинцета пластину из межоперационной тары

14 на координатный столик.

Ж 15 При проведении операции на кристаллах переместить при помощи пинцета

16 из чашки Петри на координатный столик.

О 17 2. Поставить восемь зондовых игл измерительной многозондовой

18 системы на контактные окна фоточувствительных площадок и одну на

19 контакт охранного кольца кристалла.

20 3. Накрыть пластину или кристалл тканью хлопчатобумажной.

21 4. Подать напряжение питания 140 В от источника питания.

22 5. Измерить вольтметром величины темновых токов фоточувствительных

23 площадок, последовательно переключая каналы 1–12 коммутатора.

Ж 24 Значения темновых токов площадок кристаллов должны быть ≤ 8 нА

О 25 6. Снять ткань хлопчатобумажную.

26 7. Поднять зондовые иглы измерительной многозондовой системы.

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

в)

ГОСТ 3.1118-82 Форма 3б

3

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	УКВИ
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Ж 01 При проведении операции на пластине повторить п. 2–7 на 5 разных

02 кристаллах. Пластина считается годной, если хотя бы один из кристаллов

03 удовлетворяет требованию по значению темнового тока площадок

04 кристалла. Кристалл считается годным, значения темнового тока всех

05 площадок ≤ 8 нА.

О 06 8. Переместить при помощи пинцета годную пластину с координатного

07 столика измерительной многозондовой системы в межоперационную тару.

Ж 08 При проведении операции на отдельном кристалле переместить при помощи

09 пинцета годный кристалл, значение темнового тока всех площадок которого

10 должны быть ≤ 8 нА, на фильтр в чашке Петри. Пластины и кристаллы, не

11 удовлетворяющие данному требованию в отдельную чашку Петри.

О 12 9. Повторить п. 1–8 для оставшихся пластин и кристаллов в партии.

13

Ж 14 По завершению работ выключить освещение измерительной многозондовой

15 установки, вольтметр и источник питания.

16 Хранить ткань в чашке Петри, хранить спирт в бюксе. Допускается хранить

17 кристаллы в чашке Петри в эксикаторе с силикагелем.

18

19

20

21

22

23

24

25

26

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

г)

4

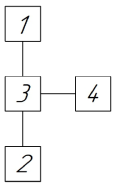


Рисунок 1 – Схема измерения

1 – источник питания GW Instek GPR-730H10D;

2 – вольтметр В7-40/5;

3 – коммутатор;

4 – система многозондовая измерительная PM-5.

Дубл. Взам. Подл.

КЭ

Рисунок 80 – ОК Контроль темновых токов: а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

Контроль внешнего вида фоточувствительных кристаллов проводится на оптическом микроскопе. К недопустимым видам наблюдаемых дефектов относятся:

— дефекты изолирующей пленки, соединяющие между собой любые диффузионные области;

— отсутствие изолирующего окисла на границе *p*-*n*-перехода;

— сколы любой формы по периметру фоточувствительного кристалла, расположенные на расстоянии более 200 мкм от края;

— трещины, достигающие внешней границы металлизированных контактных площадок или рабочих элементов фоточувствительного кристалла, а также пересекающие фоточувствительные площадки;

— царапины на просветляющем покрытии;

— царапины на изолирующей пленке, приводящие к разрыву изолирующих областей;

— проколы и отверстия в изолирующей пленке;

— наличие включений в просветляющей пленке и инородных закрепленных частиц размером более 20 мкм;

— наличие невытравленных участков металлизации на фоточувствительной площадке размером более 10 мкм;

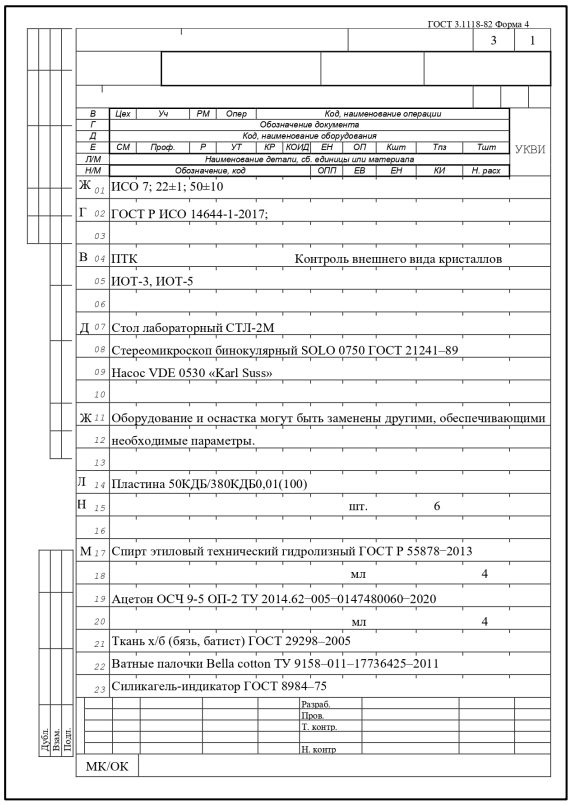
— отсутствие металлизации более чем на 1/5 от размера контактной площадки;

— отслаивание металлизации от контактной площадки.

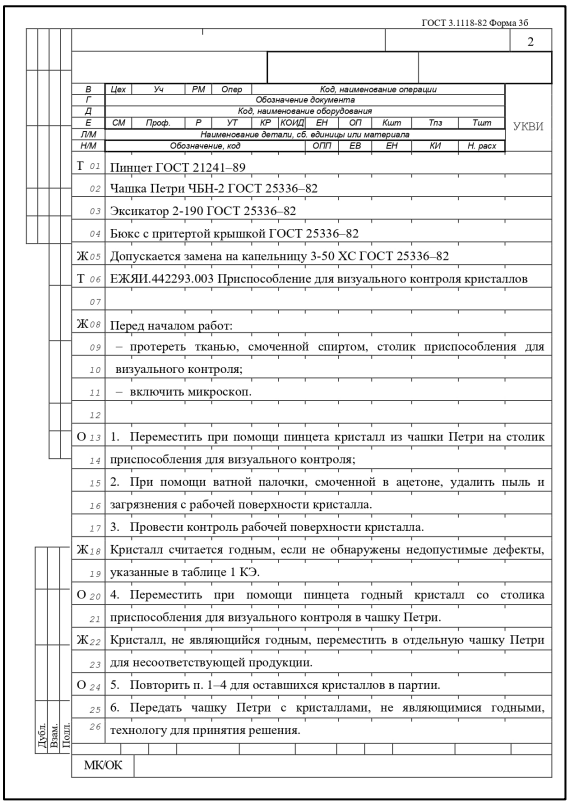
Обнаружение одного из приведенных видов дефектов внешнего вида на хотя бы одном фоточувствительном элементе линейки ЛФД является достаточным для его отнесения к технологическим потерям и изоляции кристалла от годных.

Разработанная операционная карта для контроля внешнего вида приведена на рисунке 81.

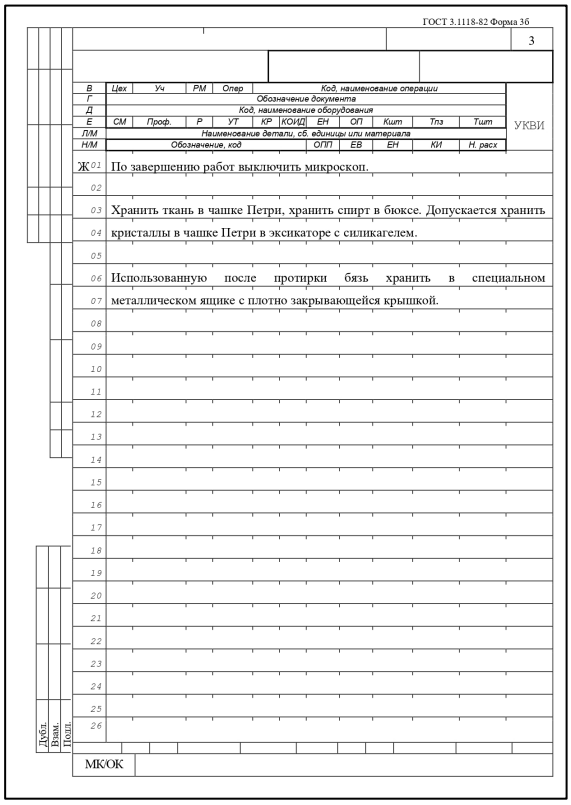
а)



б)



в)



г)

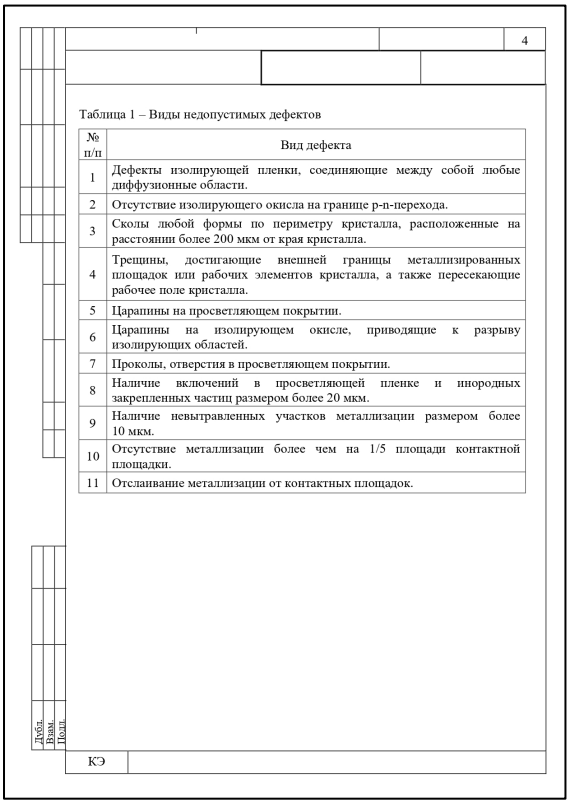
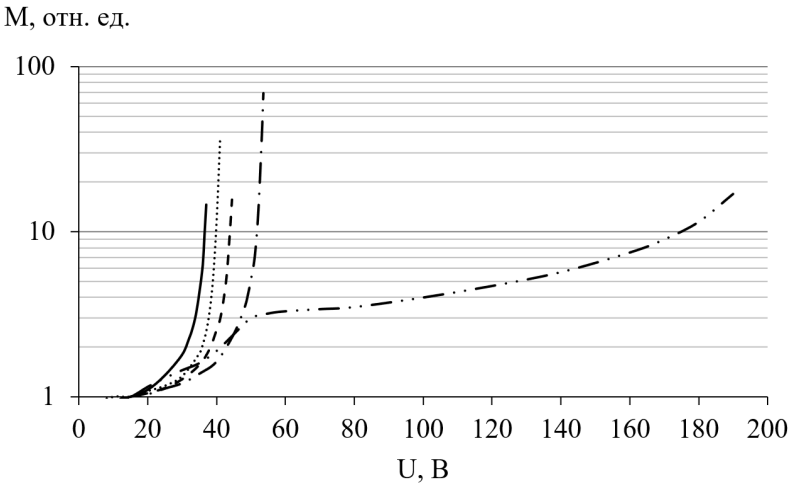


Рисунок 81 – ОК Контроль внешнего вида кристаллов: а – стр. 1; б – стр. 2.

3.2 Изготовление

Для уточнения параметров режимов термодиффузионных процессов имплантированных примесей бора и фосфора была изготовлена партия фоточувствительных кристаллов линейки лавинных фотодиодов в соответствии с эскизным технологическим маршрутом изготовления без дополнительной пассивации пленкой Al_2O_3 до этапа создания металлизации к фоточувствительным элементам и тыльному контактному слою.

При измерении фотоэлектрических параметров изготовленных кристаллов оказалось, что прокол кармана *p*-типа проводимости до поглощающего слоя не достигается. Вследствие этого были изготовлены еще 5 партий фоточувствительных кристаллов по маршруту изготовления с различными временами разгонки примеси фосфора, а именно: партия № 2 – 2 ч 5 мин, партия № 3 – 2 ч 26 мин, партия № 4 – 2 ч 52 мин, партия № 5 – 3 ч 5 мин, партия № 6 – 4 ч 40 мин. На рисунке 82 приведены полученные зависимости коэффициента умножения *M* от приложенного напряжения для партий № 1–5. При этом характер зависимостей партий № 1–4 соответствует n^+-*p* структуре. Обеднение кармана *p*-типа проводимости наблюдается только на партии № 5.



сплошная линия – партия № 1 с разгонкой фосфора 1 ч 58 мин;

пунктирная линия – партия № 2 с разгонкой фосфора 2 ч 5 мин;

штриховая линия – партия № 3 с разгонкой фосфора 2 ч 26 мин;

штрихпунктирная линия – партия № 4 с разгонкой фосфора 2 ч 52 мин;

штрихпунктирная линия с двумя точками – партия № 5 с разгонкой фосфора 3 ч 5 мин.

Рисунок 82 – Коэффициент умножения *M*

В таблице 20 приведены максимальные типовые значения коэффициента умножения $M_{макс}$ и соответствующее ему напряжение $U_{макс}$ до возникновения явления микроплазмы для каждой из изготовленных партий фоточувствительных кристаллов.

Таблица 20 – Типовые электрофизические характеристики фоточувствительных кристаллов из партий № 1–5

№ п/п	Параметр	Значение				
		Партия № 1	Партия № 2	Партия № 3	Партия № 4	Партия № 5
1	2	3	4	5	6	7
1	$M_{макс}$, отн. ед.	37,0	41,0	44,5	53,5	190,0
2	$U_{макс}$, В	15	36	17	70	17

На рисунке 83 приведены зависимость $1/c^2$ от напряжения, распределение концентрации в эпитаксиальном слое и коэффициент умножения M от напряжения для партии фоточувствительных кристаллов № 6, прошедшей маршрут изготовления с разгонкой фосфора длительностью 4 ч 40 мин.

Таким образом, в соответствии с рисунком 83а обеднение кармана p-типа проводимости, а именно прокол области поглощения, наблюдается при напряжении 50 В. При этом величина коэффициента умножения M, равная 100, достигается при напряжении 100 В, а максимальное значение, равное 180, до влияния микроплазмы – при напряжении 130 В. Достигнутые значения являются достаточными, вследствие чего параметры термодиффузионных процессов, используемые для изготовления партии фоточувствительных кристаллов № 6, необходимо включить в технологический маршрут изготовления линейки ЛФД.

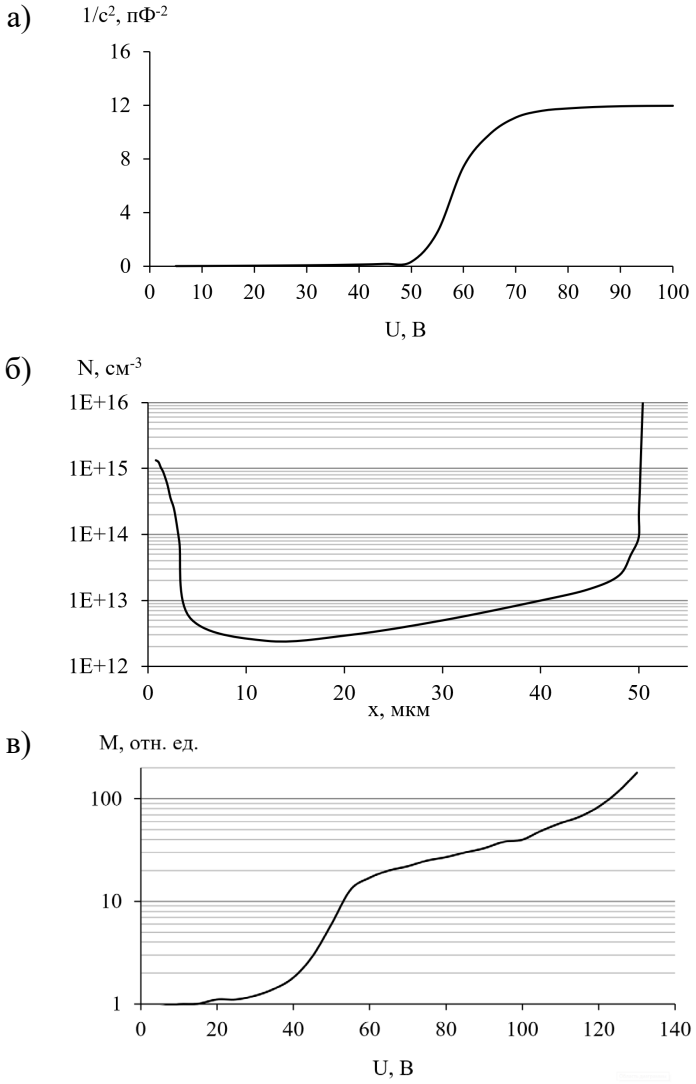
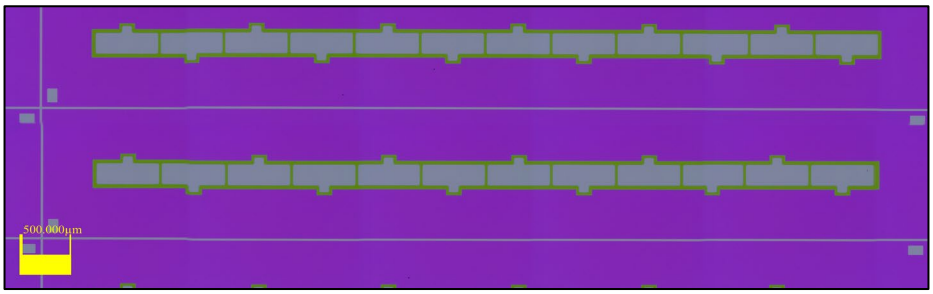


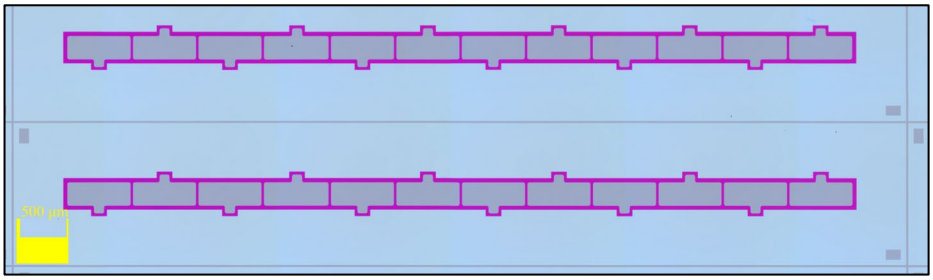
Рисунок 83 – Партия фоточувствительных кристаллов № 6:
а – емкостная характеристика; б – распределение концентрации в эпитаксиальном слое;
в – коэффициент умножения *M*.

Также важно определить, необходимо ли нанесение дополнительной пленки Al_2O_3, пассивирующей пленку SiO_2. Для этого были изготовлены по 5 партий фоточувствительных кристаллов по каждому из двух эскизных маршрутов изготовления с заданными параметрами технологических процессов, определенных в текущем разделе. На рисунке 84 представлены изображения фоточувствительного кристалла, полученные на оптическом микроскопе Olympus DSX1000 в режиме «сшивка» изображений.

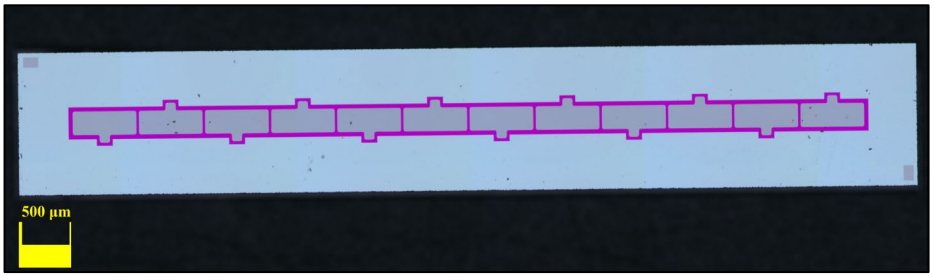
а)



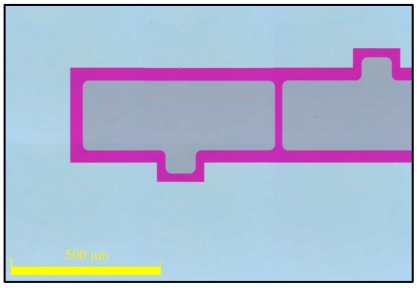
б)



в)



г)



д)

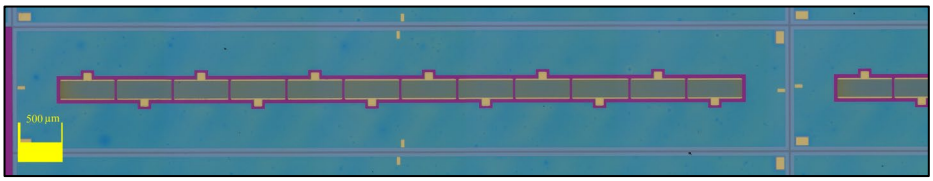


Рисунок 84 – «Сшивки» изображений линейки ЛФД:

а – пластина до вскрытия контактных окон при увеличении 10^x;

б – пластина после вскрытия контактных окон при увеличении 10^x;

в – фоточувствительный кристалл при увеличении 10^x;

г – фоточувствительный кристалл при увеличении 40^x;

д – пластина после формирования металлизации при увеличении 10^x.

В таблице 21 и таблице 22 приведены типовые значения электрофизических характеристик и проценты выхода годных фоточувствительных кристаллов из партий № 7–11, изготовленных по эскизному маршруту изготовления в отсутствии пассивирующей пленки

Al_2O_3, и из партий № 12–16, изготовленных по эскизному маршруту изготовления с дополнительной пассивирующей пленкой Al_2O_3. Представленные электрофизические характеристики включают: напряжение прокола области поглощения, $U_{прокол}$; напряжение, при котором достигается коэффициент умножения, равный 100, $U_{при\ M=100}$; максимальный коэффициент умножения до возникновения микроплазмы, $M_{макс}$; напряжение, при котором достигается максимальный коэффициент умножения, $U_{макс}$; уровень темнового тока отдельных фоточувствительных элементов по достижению коэффициента умножения M, равного 100, на длине волны 0,85 мкм, I_T; сопротивление изоляции $R_{ИЗ}$. При этом $R_{ИЗ}$ для всех партий составляло более 100 МОм.

Таблица 21 – Типовые электрофизические характеристики и проценты выхода годных фоточувствительных кристаллов из партий № 7–11

№ п/п	Параметр	Значение				
		Партия № 7	Партия № 8	Партия № 9	Партия № 10	Партия № 11
1	2	3	4	5	6	7
1	$U_{прокол}$, В	52	50	50	51	50
2	$U_{при\ M=100}$, В	145	130	142	140	132
3	$M_{макс}$, отн. ед.	195,0	180,8	190,0	193,0	188,8
4	$U_{макс}$, В	199	165	178	182	176
5	I_T, нА	(10–12)	(4–8)	(5–10)	(5–8)	(5–9)
6	Процент выхода годных, %	12,0	11,5	13,1	15,2	12,1

Таблица 22 – Типовые электрофизические характеристики и проценты выхода годных фоточувствительных кристаллов из партий № 12–16

№ п/п	Параметр	Значение				
		Партия № 12	Партия № 13	Партия № 14	Партия № 15	Партия № 16
1	2	3	4	5	6	7
1	$U_{прокол}$, В	50	50	53	51	50
2	$U_{при\ M=100}$, В	150	155	158	143	170
3	$M_{макс}$, отн. ед.	190,0	190,5	192,0	189,4	194,1
4	$U_{макс}$, В	190	198	187	175	189
5	I_T, нА	(5–9)	(6–9)	(5–8)	(7–13)	(6–8)

Окончание таблицы 22.

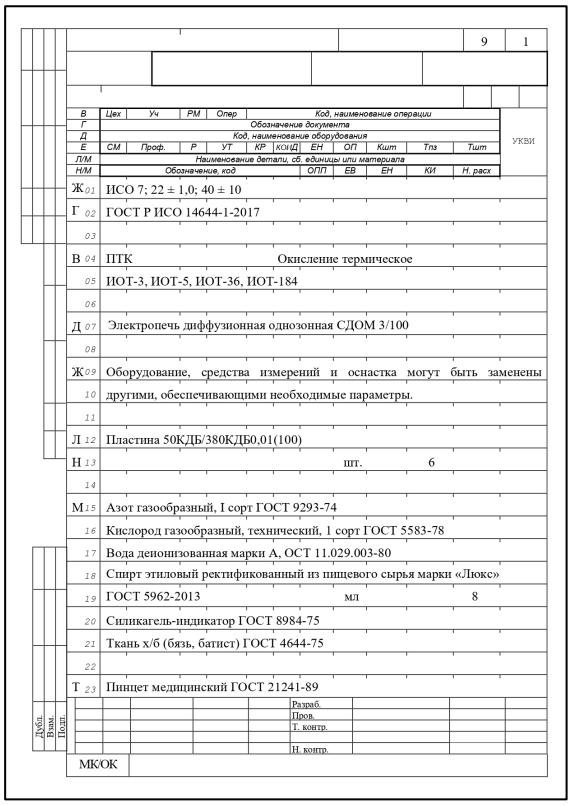
1	2	3	4	5	6	7
6	Процент выхода годных, %	11,8	12,5	12,9	10,8	15,6

Как видно при сравнении значений из таблицы 21 и таблицы 22, применение пассивирующей пленки оксида алюминия не привело к значительным улучшениям диапазона темнового тока отдельных фоточувствительных элементов линейки ЛФД или повышению процента выхода годных. В связи с этим, в данном случае необходимость во введении дополнительных технологических процессов формирования диэлектрической пленки Al_2O_3 для стабилизации зарядовых свойств на границе раздела изолирующей пленки SiO_2 и слоя кремния отсутствует.

3.3 Уточнение режимов термических процессов

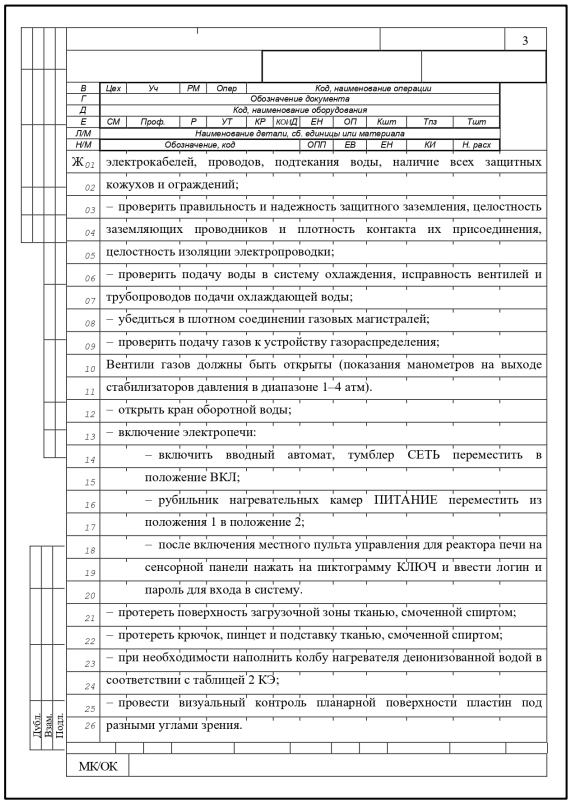
На основе уточненных в подразделе 3.2 режимов термодиффузионных процессов имплантированных примесей бора и фосфора были разработаны операционные карты термических процессов, таких как термическое окисление, разгонка примеси бора в азоте (отжиг в азоте) и разгонка примеси фосфора в средах сухого и влажного кислорода (отжиг в кислороде), вид которых приведен на рисунках 87–93.

а)



б)

в)



г)

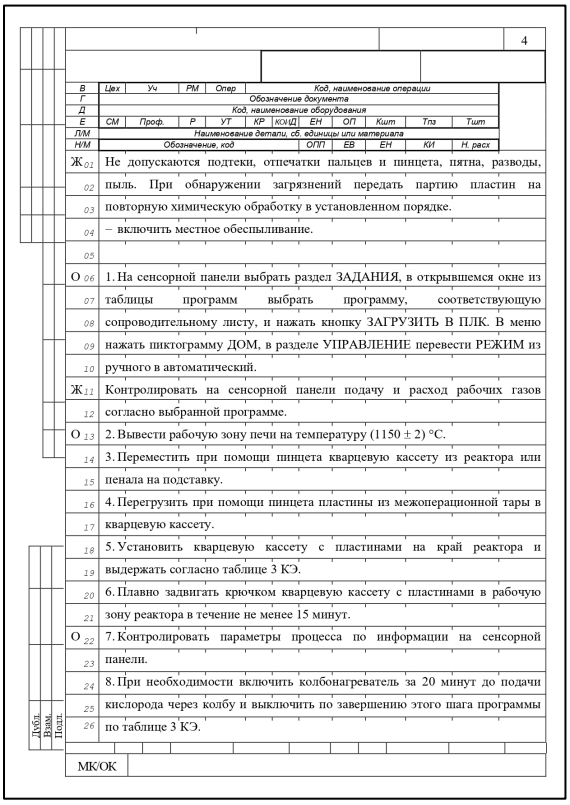
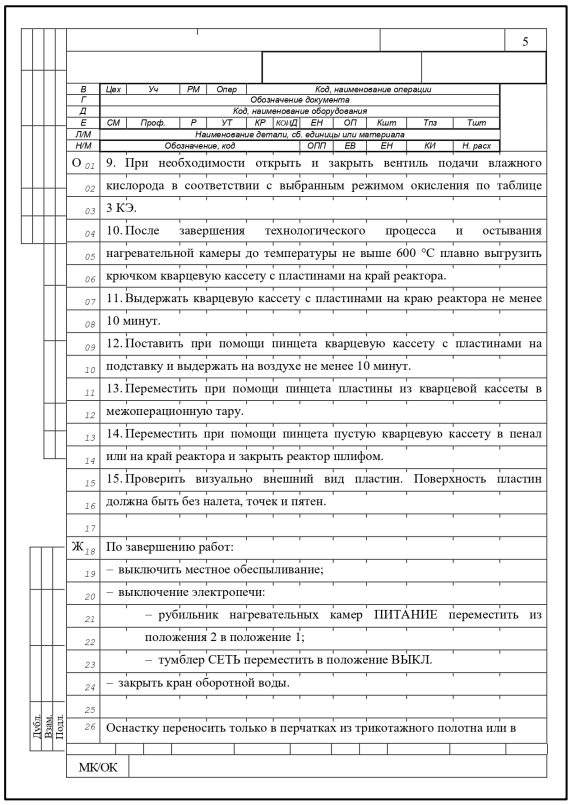


Рисунок 85 – ОК Окисление термическое (1): а – стр. 1; б – стр. 2; в – стр. 3; г – стр. 4.

а)



5

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

О 9. При необходимости открыть и закрыть вентиль подачи влажного кислорода в соответствии с выбранным режимом окисления по таблице 3 КЭ.

10. После завершения технологического процесса и остывания нагревательной камеры до температуры не выше 600 °С плавно выгрузить крючком кварцевую кассету с пластинами на край реактора.

11. Выдержать кварцевую кассету с пластинами на краю реактора не менее 10 минут.

12. Поставить при помощи пинцета кварцевую кассету с пластинами на подставку и выдержать на воздухе не менее 10 минут.

13. Переместить при помощи пинцета пластины из кварцевой кассеты в межоперационную тару.

14. Переместить при помощи пинцета пустую кварцевую кассету в пенал или на край реактора и закрыть реактор шлифом.

15. Проверить визуально внешний вид пластин. Поверхность пластин должна быть без налета, точек и пятен.

Ж По завершению работ:

– выключить местное обеспыливание;

– выключение электропечи:

– рубильник нагревательных камер ПИТАНИЕ переместить из положения 2 в положение 1;

– тумблер СЕТЬ переместить в положение ВЫКЛ.

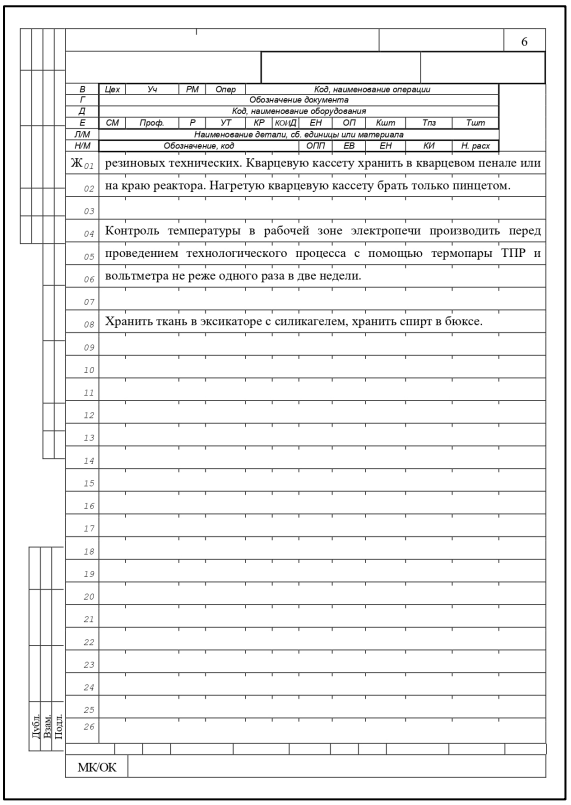
– закрыть кран оборотной воды.

Оснастку переносить только в перчатках из трикотажного полотна или в

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)



6

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

Ж резиновых технических. Кварцевую кассету хранить в кварцевом пенале или на краю реактора. Нагретую кварцевую кассету брать только пинцетом.

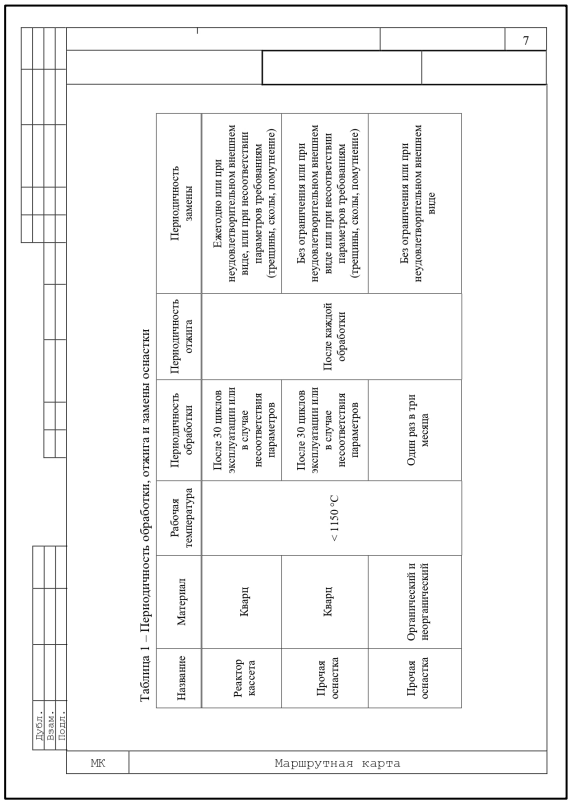
Контроль температуры в рабочей зоне электропечи производить перед проведением технологического процесса с помощью термопары ТПР и вольтметра не реже одного раза в две недели.

Хранить ткань в эксикаторе с силикагелем, хранить спирт в бюксе.

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

в)



7

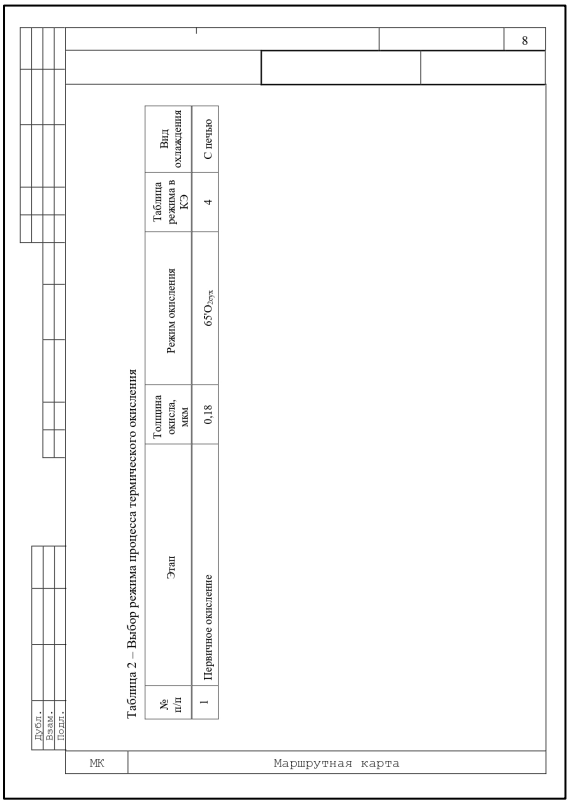
Таблица 1 – Периодичность обработки, отжига и замены оснастки

Название	Материал	Рабочая температура	Периодичность обработки	Периодичность отжига	Периодичность замены
Реактор кассета	Кварц	< 1150 °С	После 30 циклов эксплуатации или в случае несоответствия параметров	После каждой обработки	Ежегодно или при неудовлетворительном внешнем виде, или при несоответствии параметров требованиям (трещины, сколы, помутнение)
Прочая оснастка	Кварц		После 30 циклов эксплуатации или в случае несоответствия параметров		Без ограничения или при неудовлетворительном внешнем виде или при несоответствии параметров требованиям (трещины, сколы, помутнение)
Прочая оснастка	Органический и неорганический		Один раз в три месяца		Без ограничения или при неудовлетворительном внешнем виде

Дубл. Взам. Подл.

МК Маршрутная карта

г)



8

Таблица 2 – Выбор режима процесса термического окисления

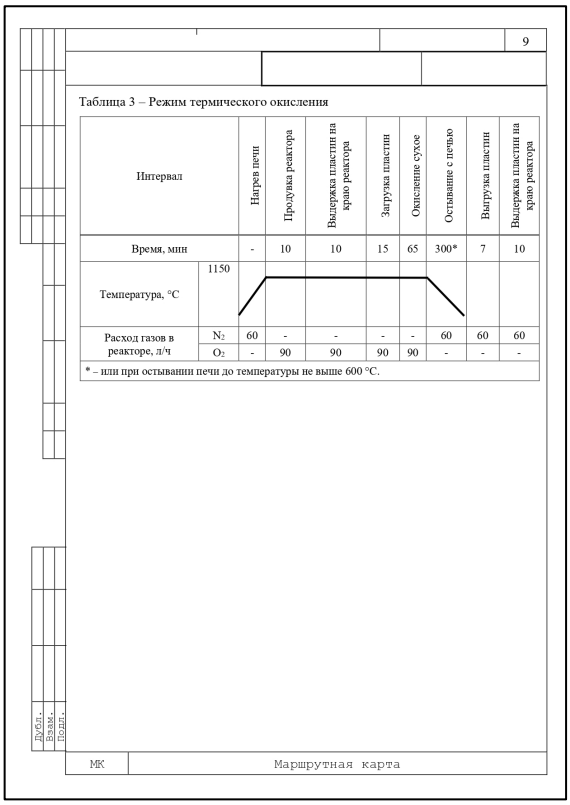
№ п/п	Этап	Толщина окисла, мкм	Режим окисления	Таблица режима в КЭ	Вид охлаждения
1	Первичное окисление	0,18	$65^{\circ}O_{2\text{сух}}$	4	С печью

Дубл. Взам. Подл.

МК Маршрутная карта

Рисунок 86 – ОК Окисление термическое (2):

а – стр. 5; б – стр. 6; в – стр. 7; г – стр. 8.



9

Таблица 3 – Режим термического окисления

Интервал		Нагрев печи	Продувка реактора	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Окисление сухое	Оставание с печью	Выгрузка пластин	Выдержка пластин на краю реактора
Время, мин		-	10	10	15	65	300*	7	10
Температура, °С	1150								
Расход газов в реакторе, л/ч	N_2	60	-	-	-	-	60	60	60
	O_2	-	90	90	90	90	-	-	-

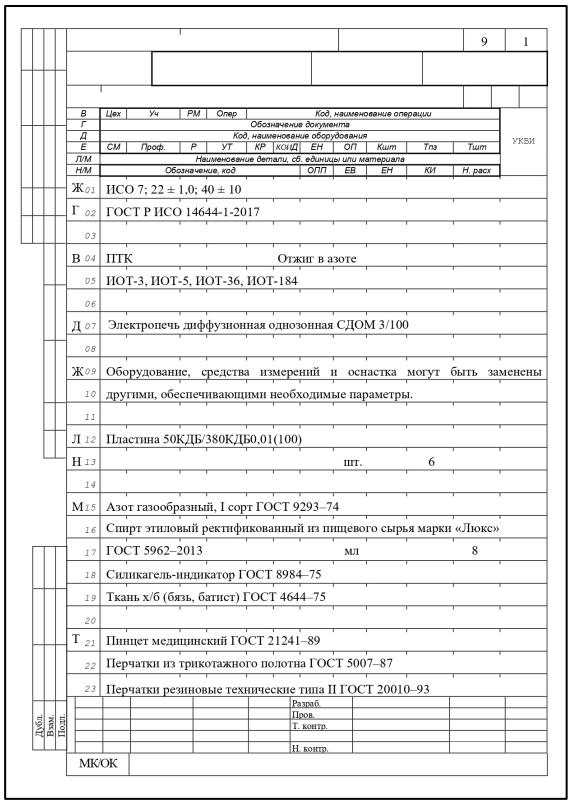
* – или при остывании печи до температуры не выше 600 °С.

Дубл. Взам. Подл.

МК Маршрутная карта

Рисунок 87 – ОК Окисление термическое (3)

а)



9 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции						УКБИ
Г	Обозначение документа										
Д	Код, наименование оборудования										
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала										
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх

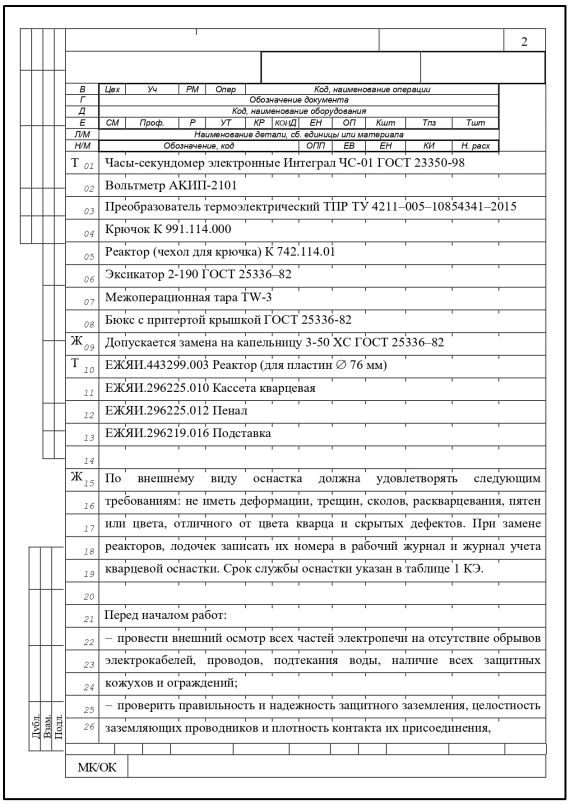
Ж 01	ИСО 7; 22 ± 1,0; 40 ± 10
Г 02	ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017
03	
В 04	ПТК Отжиг в азоте
05	ИОТ-3, ИОТ-5, ИОТ-36, ИОТ-184
06	
Д 07	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100
08	
Ж 09	Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
10	другими, обеспечивающими необходимые параметры.
11	
Л 12	Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н 13	шт. 6
14	
М 15	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74
16	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс»
17	ГОСТ 5962–2013 мл 8
18	Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75
19	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75
20	
Т 21	Пинцет медицинский ГОСТ 21241–89
22	Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87
23	Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93

Дубл. Взам. Подл.

Разраб.
Пров.
Т. контр.
Н. контр.

МК/ОК

б)



2

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции						
Г	Обозначение документа										
Д	Код, наименование оборудования										
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала										
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх

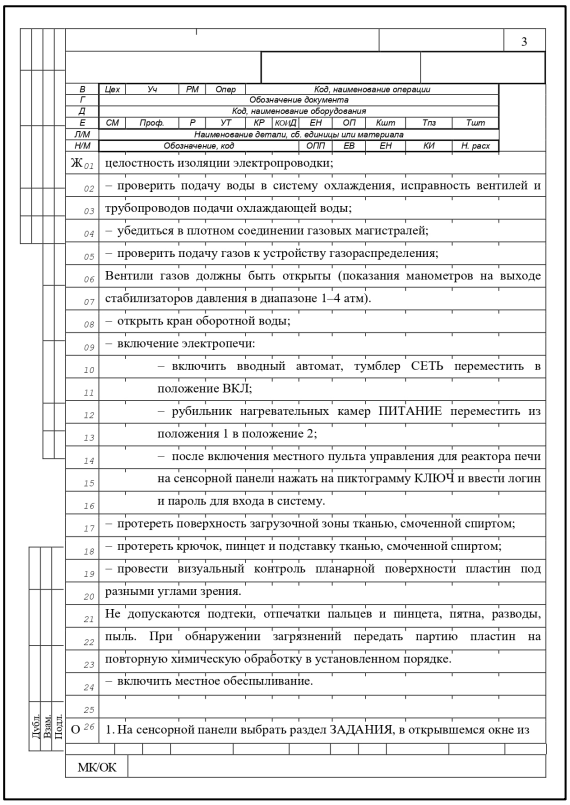
Т 01	Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350-98
02	Вольтметр АКИП-2101
03	Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015
04	Крючок К 991.114.000
05	Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01
06	Эксикатор 2-190 ГОСТ 25336–82
07	Межоперационная тара TW-3
08	Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336-82
Ж 09	Допускается замена на капельницу 3-50 ХС ГОСТ 25336–82
Т 10	ЕЖЯИ.443299.003 Реактор (для пластин ∅ 76 мм)
11	ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая
12	ЕЖЯИ.296225.012 Пенал
13	ЕЖЯИ.296219.016 Подставка
14	
Ж 15	По внешнему виду оснастка должна удовлетворять следующим
16	требованиям: не иметь деформации, трещин, сколов, раскварцевания, пятен
17	или цвета, отличного от цвета кварца и скрытых дефектов. При замене
18	реакторов, лодочек записать их номера в рабочий журнал и журнал учета
19	кварцевой оснастки. Срок службы оснастки указан в таблице 1 КЭ.
20	
21	Перед началом работ:
22	– провести внешний осмотр всех частей электропечи на отсутствие обрывов
23	электрокабелей, проводов, подтекания воды, наличие всех защитных
24	кожухов и ограждений;
25	– проверить правильность и надежность защитного заземления, целостность
26	заземляющих проводников и плотность контакта их присоединения,

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

Рисунок 88 – ОК Отжиг в азоте (1): а – стр. 1; б – стр. 2.

а)



3

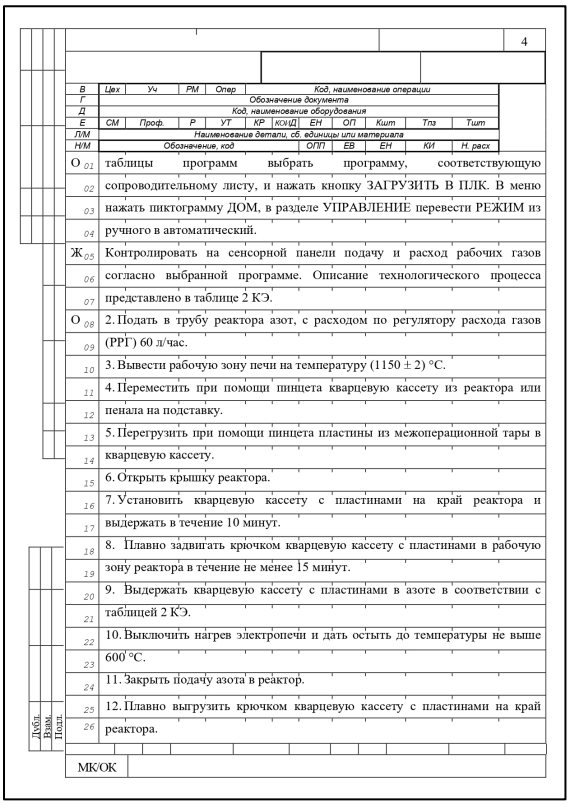
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции						
Г	Обозначение документа										
Д	Код, наименование оборудования										
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала										
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх

Ж 01 целостность изоляции электропроводки;
02 – проверить подачу воды в систему охлаждения, исправность вентилей и
03 трубопроводов подачи охлаждающей воды;
04 – убедиться в плотном соединении газовых магистралей;
05 – проверить подачу газов к устройству газораспределения;
06 Вентили газов должны быть открыты (показания манометров на выходе
07 стабилизаторов давления в диапазоне 1–4 атм).
08 – открыть кран оборотной воды;
09 – включение электропечи:
10 – включить вводный автомат, тумблер СЕТЬ переместить в
11 положение ВКЛ;
12 – рубильник нагревательных камер ПИТАНИЕ переместить из
13 положения 1 в положение 2;
14 – после включения местного пульта управления для реактора печи
15 на сенсорной панели нажать на пиктограмму КЛЮЧ и ввести логин
16 и пароль для входа в систему.
17 – протереть поверхность загрузочной зоны тканью, смоченной спиртом;
18 – протереть крючок, пинцет и подставку тканью, смоченной спиртом;
19 – провести визуальный контроль планарной поверхности пластин под
20 разными углами зрения.
21 Не допускаются подтеки, отпечатки пальцев и пинцета, пятна, разводы,
22 пыль. При обнаружении загрязнений передать партию пластин на
23 повторную химическую обработку в установленном порядке.
24 – включить местное обеспыливание.
25
О 26 1. На сенсорной панели выбрать раздел ЗАДАНИЯ, в открывшемся окне из

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

б)



4

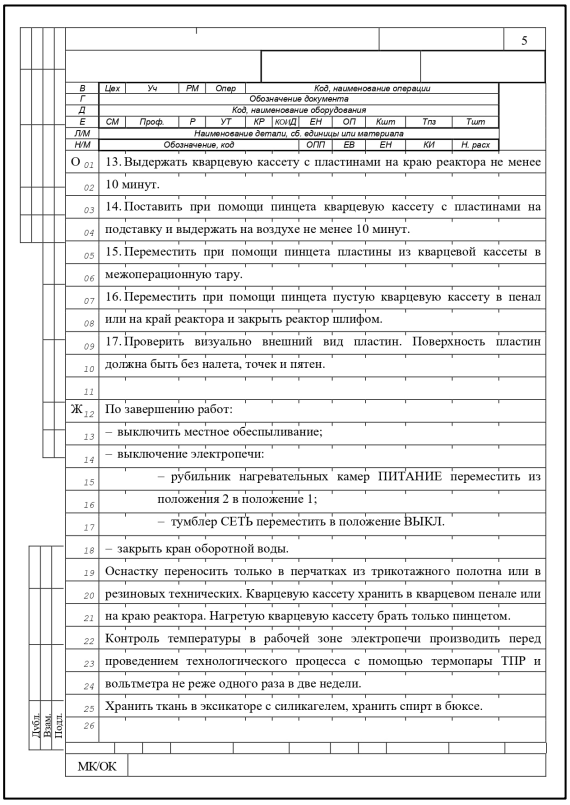
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции						
Г	Обозначение документа										
Д	Код, наименование оборудования										
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала										
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх

О 01 таблицы программ выбрать программу, соответствующую
02 сопроводительному листу, и нажать кнопку ЗАГРУЗИТЬ В ПЛК. В меню
03 нажать пиктограмму ДОМ, в разделе УПРАВЛЕНИЕ перевести РЕЖИМ из
04 ручного в автоматический.
Ж 05 Контролировать на сенсорной панели подачу и расход рабочих газов
06 согласно выбранной программе. Описание технологического процесса
07 представлено в таблице 2 КЭ.
О 08 2. Подать в трубу реактора азот, с расходом по регулятору расхода газов
09 (РРГ) 60 л/час.
10 3. Вывести рабочую зону печи на температуру (1150 ± 2) °С.
11 4. Переместить при помощи пинцета кварцевую кассету из реактора или
12 пенала на подставку.
13 5. Перегрузить при помощи пинцета пластины из межоперационной тары в
14 кварцевую кассету.
15 6. Открыть крышку реактора.
16 7. Установить кварцевую кассету с пластинами на край реактора и
17 выдержать в течение 10 минут.
18 8. Плавно задвигать крючком кварцевую кассету с пластинами в рабочую
19 зону реактора в течение не менее 15 минут.
20 9. Выдержать кварцевую кассету с пластинами в азоте в соответствии с
21 таблицей 2 КЭ.
22 10. Выключить нагрев электропечи и дать остыть до температуры не выше
23 600 °С.
24 11. Закрыть подачу азота в реактор.
25 12. Плавно выгрузить крючком кварцевую кассету с пластинами на край
26 реактора.

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

в)



5

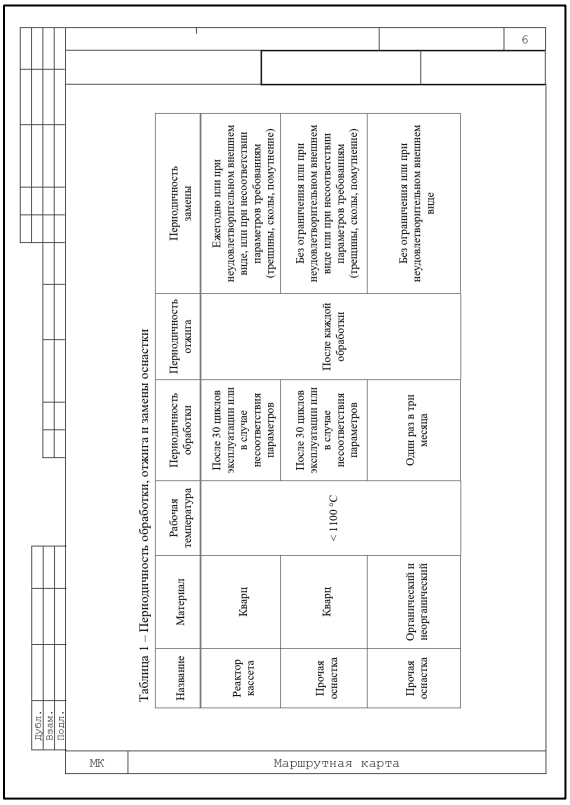
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции						
Г	Обозначение документа										
Д	Код, наименование оборудования										
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала										
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх

О 01 13. Выдержать кварцевую кассету с пластинами на краю реактора не менее
02 10 минут.
03 14. Поставить при помощи пинцета кварцевую кассету с пластинами на
04 подставку и выдержать на воздухе не менее 10 минут.
05 15. Переместить при помощи пинцета пластины из кварцевой кассеты в
06 межоперационную тару.
07 16. Переместить при помощи пинцета пустую кварцевую кассету в пенал
08 или на край реактора и закрыть реактор шлифом.
09 17. Проверить визуально внешний вид пластин. Поверхность пластин
10 должна быть без налета, точек и пятен.
11
Ж 12 По завершению работ:
13 – выключить местное обеспыливание;
14 – выключение электропечи:
15 – рубильник нагревательных камер ПИТАНИЕ переместить из
16 положения 2 в положение 1;
17 – тумблер СЕТЬ переместить в положение ВЫКЛ.
18 – закрыть кран оборотной воды.
19 Оснастку переносить только в перчатках из трикотажного полотна или в
20 резиновых технических. Кварцевую кассету хранить в кварцевом пенале или
21 на краю реактора. Нагретую кварцевую кассету брать только пинцетом.
22 Контроль температуры в рабочей зоне электропечи производить перед
23 проведением технологического процесса с помощью термопары ТПР и
24 вольтметра не реже одного раза в две недели.
25 Хранить ткань в эксикаторе с силикагелем, хранить спирт в бюксе.
26

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

г)



6

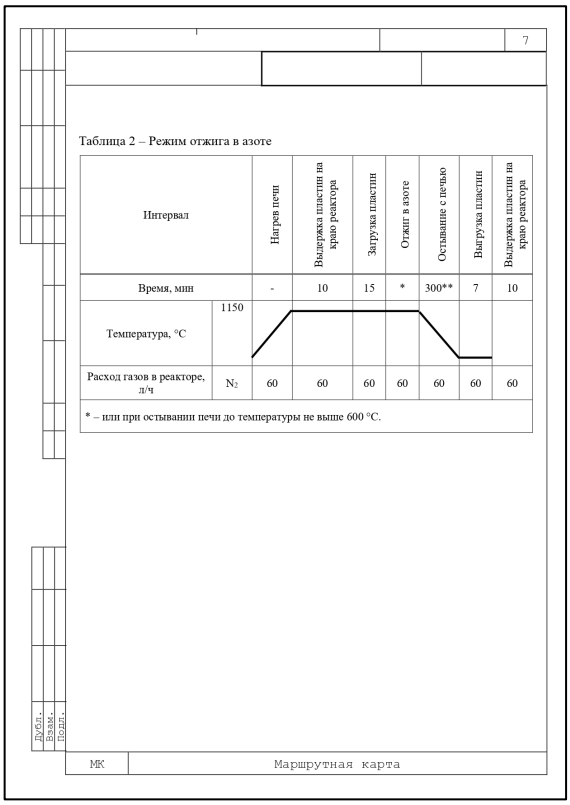
Таблица 1 – Периодичность обработки, отжига и замены оснастки

Название	Материал	Рабочая температура	Периодичность обработки	Периодичность отжига	Периодичность замены
Реактор кассета	Кварц	< 1100 °С	После 30 циклов эксплуатации или в случае несоответствия параметров	После каждой обработки	Ежегодно или при неудовлетворительном внешнем виде, или при несоответствии параметров требованиям (трещины, сколы, помутнение)
Прочая оснастка	Кварц		После 30 циклов эксплуатации или в случае несоответствия параметров		Без ограничения или при неудовлетворительном внешнем виде или при несоответствии параметров требованиям (трещины, сколы, помутнение)
Прочая оснастка	Органический и неорганический		Один раз в три месяца		Без ограничения или при неудовлетворительном внешнем виде

Дубл. Взам. Подл.

МК Маршрутная карта

Рисунок 89 – ОК Отжиг в азоте (2): а – стр. 3; б – стр. 4; в – стр. 5; г – стр. 6.



7

Таблица 2 – Режим отжига в азоте

Интервал		Нагрев печи	Выдержка пластин на краю реактора	Загрузка пластин	Отжиг в азоте	Остывание с печью	Выгрузка пластин	Выдержка пластин на краю реактора
Время, мин		-	10	15	*	300**	7	10
Температура, °С	1150							
Расход газов в реакторе, л/ч	N_2	60	60	60	60	60	60	60

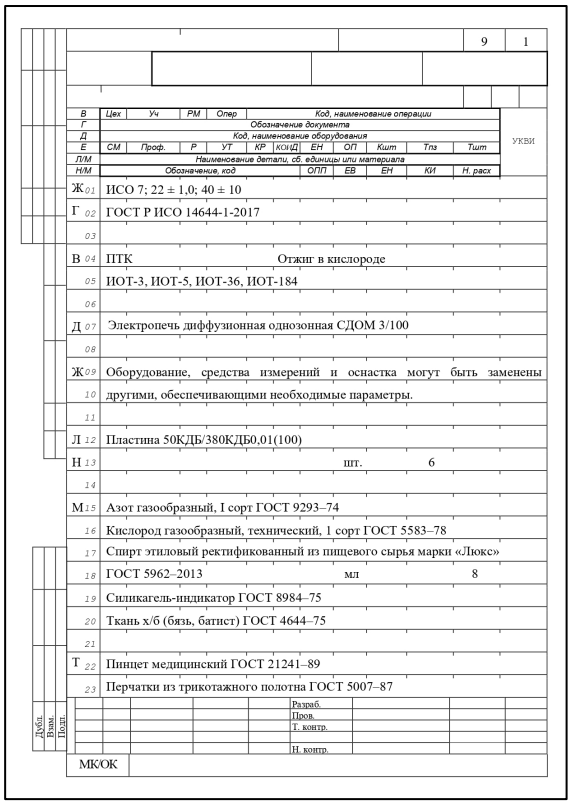
* – или при остывании печи до температуры не выше 600 °С.

Дубл. Взам. Подл.

МК Маршрутная карта

Рисунок 90 – ОК Отжиг в азоте (3)

а)



9 1

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							УКБИ
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

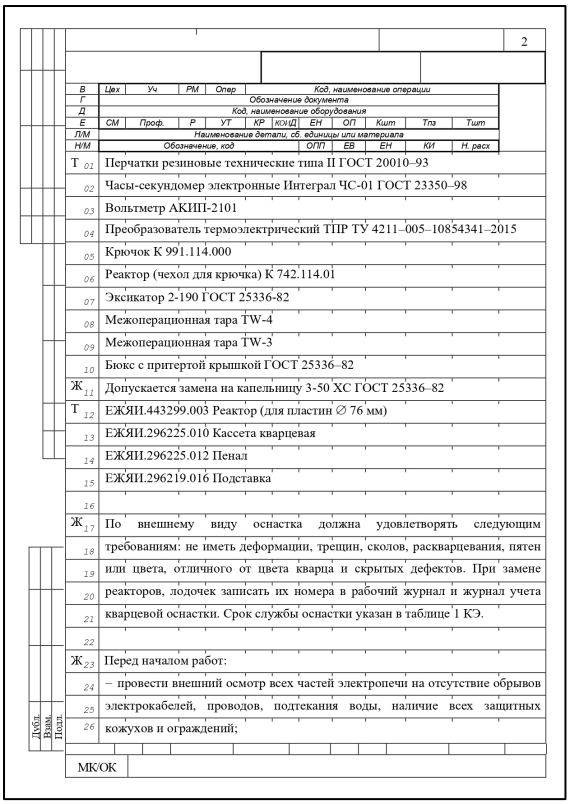
Ж	01	ИСО 7; 22 ± 1,0; 40 ± 10
Г	02	ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017
	03	
В	04	ПТК Отжиг в кислороде
	05	ИОТ-3, ИОТ-5, ИОТ-36, ИОТ-184
	06	
Д	07	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100
	08	
Ж	09	Оборудование, средства измерений и оснастка могут быть заменены
	10	другими, обеспечивающими необходимые параметры.
	11	
Л	12	Пластина 50КДБ/380КДБ0,01(100)
Н	13	шт. 6
	14	
М	15	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74
	16	Кислород газообразный, технический, 1 сорт ГОСТ 5583–78
	17	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс»
	18	ГОСТ 5962–2013 мл 8
	19	Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75
	20	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75
	21	
Т	22	Пинцет медицинский ГОСТ 21241–89
	23	Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87

Дубл. Взам. Подл.

Разраб. Пров. Т. контр. Н. контр.

МК/ОК

б)



2

В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г	Обозначение документа											
Д	Код, наименование оборудования											
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт	
Л/М	Наименование детали, сб. единицы или материала											
Н/М	Обозначение, код						ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н. расх	

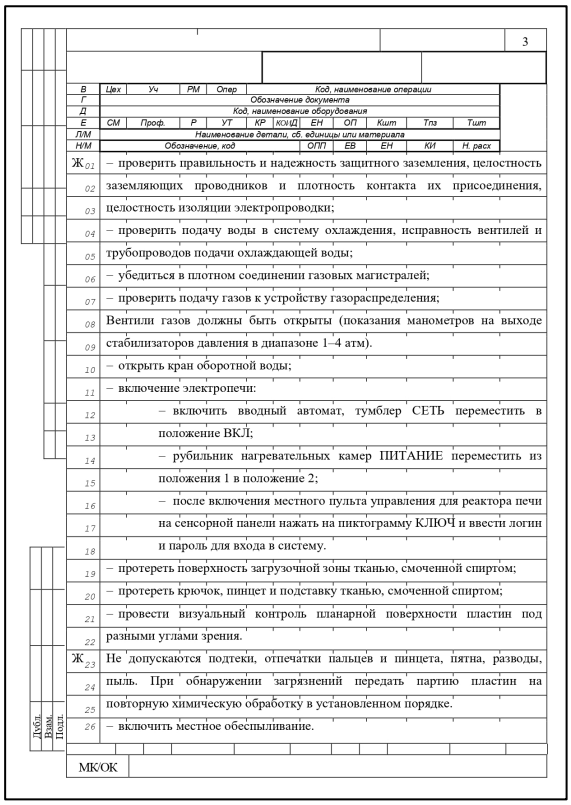
Т	01	Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93
	02	Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98
	03	Вольтметр АКИП-2101
	04	Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015
	05	Крючок К 991.114.000
	06	Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01
	07	Эксикатор 2-190 ГОСТ 25336-82
	08	Межоперационная тара TW-4
	09	Межоперационная тара TW-3
	10	Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82
Ж	11	Допускается замена на капельницу 3-50 ХС ГОСТ 25336–82
Т	12	ЕЖЯИ.443299.003 Реактор (для пластин ∅ 76 мм)
	13	ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая
	14	ЕЖЯИ.296225.012 Пенал
	15	ЕЖЯИ.296219.016 Подставка
	16	
Ж	17	По внешнему виду оснастка должна удовлетворять следующим
	18	требованиям: не иметь деформации, трещин, сколов, раскварцевания, пятен
	19	или цвета, отличного от цвета кварца и скрытых дефектов. При замене
	20	реакторов, лодочек записать их номера в рабочий журнал и журнал учета
	21	кварцевой оснастки. Срок службы оснастки указан в таблице 1 КЭ.
	22	
Ж	23	Перед началом работ:
	24	– провести внешний осмотр всех частей электропечи на отсутствие обрывов
	25	электрокабелей, проводов, подтекания воды, наличие всех защитных
	26	кожухов и ограждений;

Дубл. Взам. Подл.

МК/ОК

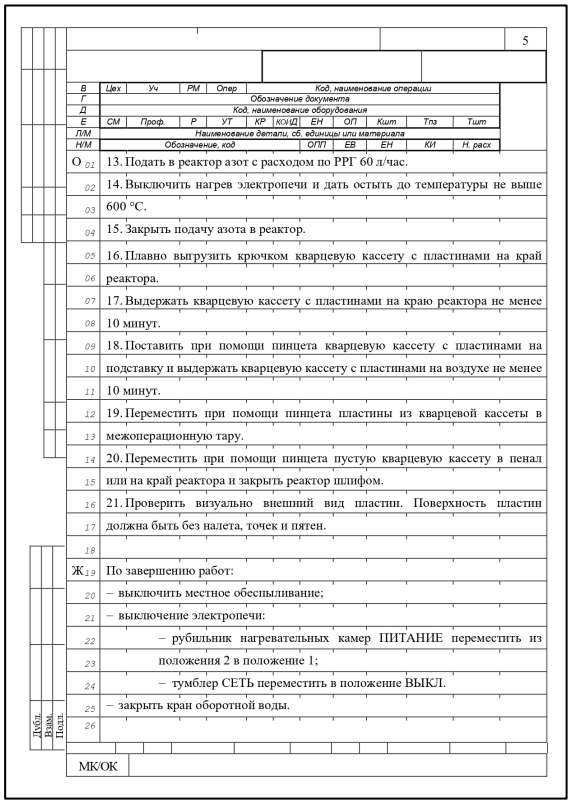
Рисунок 91 – ОК Отжиг в кислороде (1): а – стр. 1; б – стр. 2.

а)



б)

в)



г)

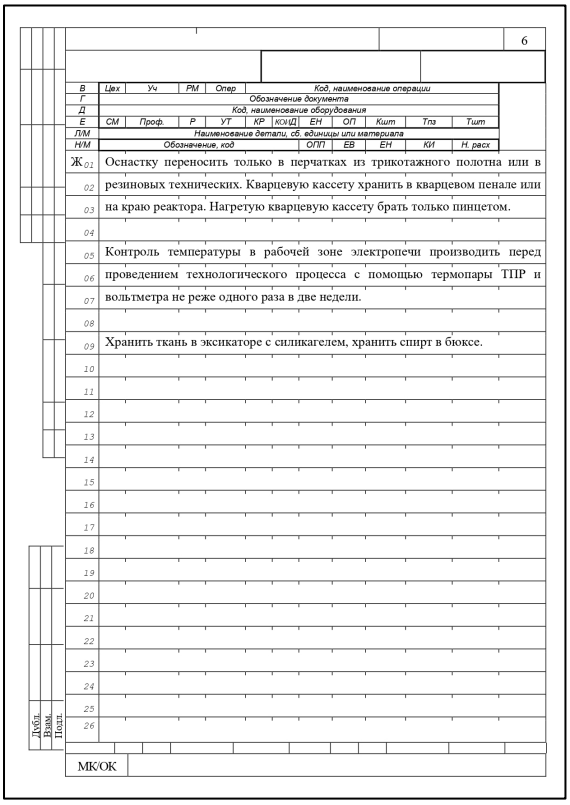
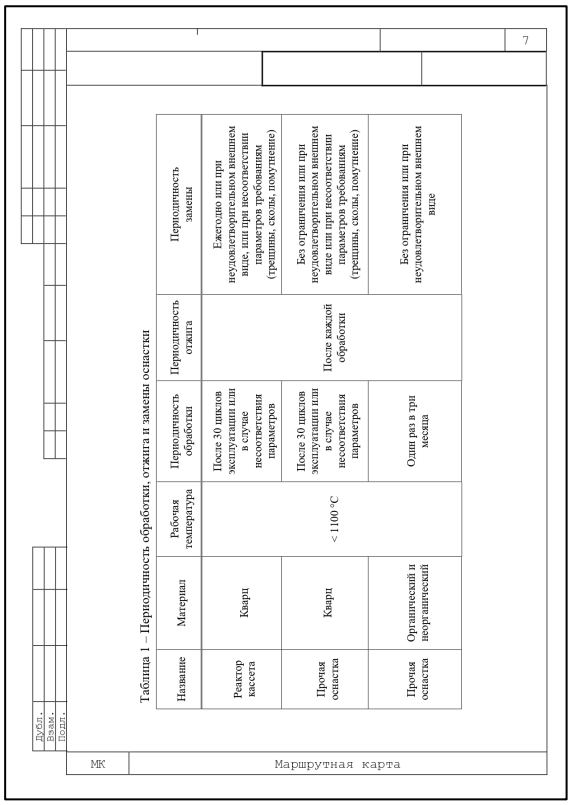


Рисунок 92 – ОК Отжиг в кислороде (2): а – стр. 3; б – стр. 4; в – стр. 5; г – стр. 6.

а)



б)

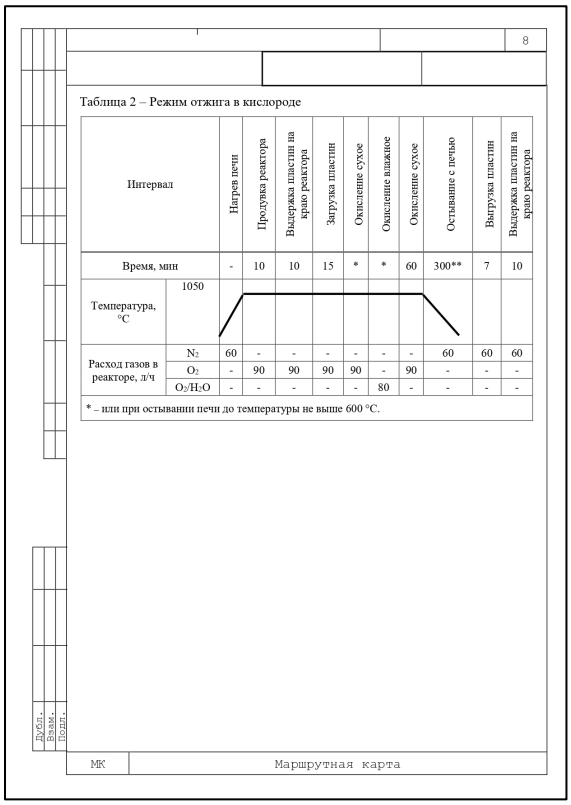


Рисунок 93 – ОК Отжиг в кислороде (3): а – стр. 7; б – стр. 8.

3.4 Маршрут изготовления

Результаты исследований электрофизических характеристик экспериментальных партий кристалла линейки ЛФД, изготовленных по двум эскизным технологическим маршрутам, позволяют определить оптимальный маршрут изготовления, состоящий из следующих технологических процессов и операций.

1. защита лицевой стороны пластины пленкой химико-стойкого лака ХВ-784:
2. удаление с обратной стороны пластин сэндвич-слоя толщиной порядка 20 мкм химико-динамическим полированием;
3. удаление пленки лака ХВ-784;
4. контроль травления;
5. химическая обработка в АПР;
6. термические окисление пластин в среде сухого кислорода до толщины диоксида кремния, равной 0,18 мкм;
7. фотолитография для утонения толщины пленки SiO_2 в окнах:
   7.1. отжиг пластин;

7.2. нанесение фоторезиста марки ФП-9120-1 или ФП-3520;

7.3. сушка слоя фоторезиста;

7.4. совмещение и экспонирование слоя фоторезиста через фотошаблон № 01;

7.5. проявление маски фоторезиста;

7.6. контроль пластин после проявления;

7.7. задубливание маски фоторезиста;

7.8. контроль маски фоторезиста.

8. травление пленки SiO_2 до толщины 0,005 мкм в окнах маски фоторезиста;

9. контроль травления;

10. ионная имплантация примеси бора в лицевую сторону пластин;

11. удаление маски фоторезиста в СПР-01Ф;

12. химическая обработка в АПР;

13. термическое осаждение пленки Si_3N_4 толщиной 0,10 мкм;

14. разгонка имплантированной примеси бора;

15. химическая обработка в АПР;

16. фотолитография для вскрытия окон в пассивирующей пленке:

16.1. отжиг пластин;

16.2. нанесение фоторезиста марки ФП-9120-1 или ФП-3520;

16.3. сушка слоя фоторезиста;

16.4. совмещение и экспонирование слоя фоторезиста через фотошаблон № 02;

16.5. проявление маски фоторезиста;

16.6. контроль пластин после проявления;

16.7. задубливание маски фоторезиста;

16.8. контроль маски фоторезиста.

17. плазмохимическое травление пассивирующей пленки Si_3N_4 через маску фоторезиста с обеих сторон пластин;

18. контроль травления;

19. жидкостное травление пленки SiO_2 до Si через маску фоторезиста с обеих сторон пластин;

20. контроль травления;

21. удаление маски фоторезиста в СПР-01Ф;

22. ионная имплантация примеси фосфора в лицевую сторону пластин;

23. ионная имплантация примеси аргона в обратную сторону пластин;

24. удаление маски фоторезиста;

25. химическая обработка в АПР;

26. разгонка имплантированной примеси фосфора;
27. фотолитография для вскрытия окон в просветляющей пленке SiO_2:
    27.1. отжиг пластин;
    27.2. нанесение фоторезиста марки ФП-9120-1 или ФП-3520;
    27.3. сушка слоя фоторезиста;
    27.4. совмещение и экспонирование слоя фоторезиста через фотошаблон № 03;
    27.5. проявление маски фоторезиста;
    27.6. контроль пластин после проявления;
    27.7. задубливание маски фоторезиста;
    27.8. контроль маски фоторезиста.
28. жидкостное травление просветляющей пленки SiO_2 до Si;
29. контроль травления;
30. удаление маски фоторезиста в СПР-01Ф;
31. быстрый термический отжиг пластин при температуре 450 °С в течение 5 с в среде H_2;
32. химическая обработка в АПР;
33. напыление металлизации Cr (0,02 мкм)/Au (0,5 мкм) на лицевую сторону пластин;
34. фотолитография для выделения металлизации Cr/Au:
    34.1. отжиг пластин;
    34.2. нанесение фоторезиста марки ФП-9120-1 или ФП-3520;
    34.3. сушка слоя фоторезиста;
    34.4. совмещение и экспонирование слоя фоторезиста через фотошаблон № 04;
    34.5. проявление маски фоторезиста;
    34.6. контроль пластин после проявления;
    34.7. задубливание маски фоторезиста;
    34.8. контроль маски фоторезиста.
35. жидкостное травление слоев Au и Cr через маску фоторезиста;
36. контроль травления;
37. удаление маски фоторезиста в СПР-01Ф;
38. напыление металлизации Cr (0,005 мкм)/Au (0,5 мкм) на обратную сторону пластин;
39. контроль коэффициента лавинного умножения на пластине;
40. контроль токовой монохроматический чувствительности на пластине;
41. контроль темновых токов на пластине;
42. нанесение фоторезиста для дисковой резки пластины на кристаллы:
    42.1. нанесение фоторезиста марки ФП-9120-1 или ФП-3520;
    42.2. задубливание маски фоторезиста;

42.3. контроль маски фоторезиста.

43. дисковая резка пластин на отдельные кристаллы;
44. удаление маски фоторезиста в СПР-01Ф;
45. контроль коэффициента лавинного умножения на отдельных кристаллах;
46. контроль токовой монохроматический чувствительности на отдельных кристаллах;
47. контроль темновых токов на отдельных кристаллах.

3.5 Статистическая оценка возможностей технологических процессов

При разработке технологии изготовления важно оценить устойчивость отдельных технологических процессов, в наибольшей мере влияющих на процент выхода годных фоточувствительных кристаллов. На практике к числу таких технологических процессов относятся фотолитография, термическая обработка, различные способы получения диэлектрических слоев, а также травление полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев.

Оценка устойчивости технологического процесса заключается в определении его точности и настроенности. Данные параметры характеризуют его качество и отработанность в рамках маршрута изготовления. Для оценки точности и настроенности технологического процесса применяется статистическая методика, которая является обязательным требованием при введении технологии в производство.

Для начала необходимо рассмотреть классификацию дефектов технологических процессов. По существующей классификации дефектов имеется три группы [84]. Первая группа нормативов, называемая «критический дефект», содержит параметры продукции, нарушение требований по точности и стабильности к которым может привести к их небезопасности. Нарушение требований по точности и стабильности второй группы нормативов, называемой «значительный дефект» может привести к ухудшению параметров надежности работы продукции и его внешнего вида. В третью группу нормативов, называемую «незначительный дефект», входят малые отклонения в габаритных размерах в отсутствии негативного влияния на безопасность или надежность продукции. Анализ и классифицирование параметров продукции, отраженный в [84], определяет следующие границы для упомянутых групп нормативов дефектов:

— первой группе допускается включать до 5 % от общего числа параметров продукции;

— второй группе допускается включать до (15–25) % от общего числа параметров продукции;

— третьей группе допускается включать до (60–85) % от общего числа параметров продукции.

Статистическая оценка точности и настроенности в основном применяется для первой и второй групп нормативов дефектов. Данный анализ содержит сбор и статистическую обработку систематизированных данных, позволяющих в дальнейшем улучшить рассматриваемый технологический процесс. Одновременно с тем определяются и оптимальные параметры его статистического регулирования. Другими словами, статистический анализ точности и настроенности технологического процесса является совокупностью мероприятий, в ходе которых устанавливаются пределы значений параметров, входящих в одну из групп нормативов дефектов, и их изменения во времени. Одним из применяемых статистических методов обработки с графическим представлением являются контрольные карты Шухарта, описание и применение которых приведено в стандартах [85], [86] и [87], а также в монографии [88] и [89]. Контрольные карты Шухарта позволяют управлять производственным процессом и оценить его возможности статистическим подходом, за счет чего активно применяются на предприятиях, выпускающих различную продукцию [90].

Для построения контрольной карты Шухарта необходимо определить ряд параметров количественного признака, таких как центр рассеяние, среднеквадратичное отклонение и поле рассеяния.

Центр рассеяния количественного признака, или среднее значение, является выборочным среднеарифметическим и определяется по формуле (39):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}. \tag{39}$$

Среднеквадратичное отклонение количественного признака рассчитывается по формуле (40):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \tag{40}$$

где X_i – результат i-ого измерения параметра;

$\bar{X}$ – центр рассеяния количественного признака;

n – объем выборки.

Поле рассеяния количественного признака является разностью максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное время и рассчитывается по формуле (41):

$$\omega = I(y) \cdot S, \tag{41}$$

где $I(y)$ – коэффициент, зависящий от закона распределения параметра, при нормальном законе распределения и доверительной вероятности y, равной 0,997, коэффициент принимается равным 6.

На рисунке 94 представлены типовые примеры контрольных карт Шухарта.

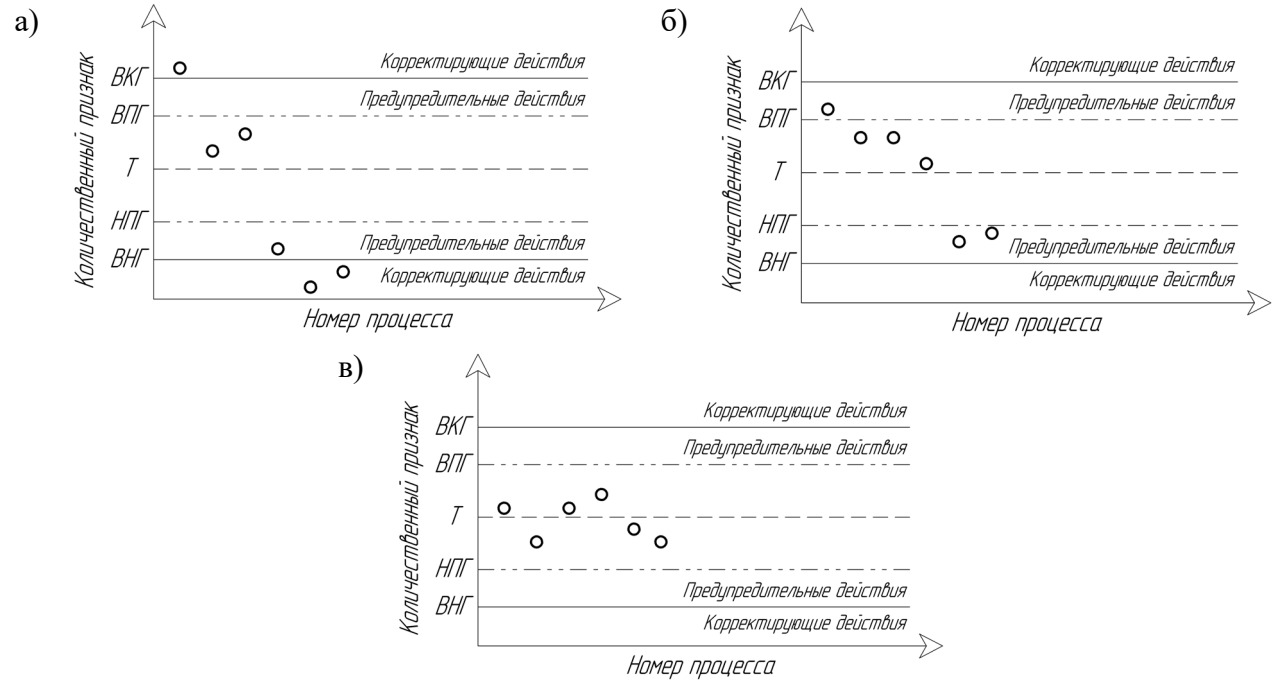


Рисунок 94 – Примеры типовых контрольных карт Шухарта:

а – нарушение контрольных границ;

б – нарушение предупреждающих границ;

в – в отсутствии нарушения границ.

На представленных типовых контрольных картах Шухарта имеются линии, такие как: верхняя и нижняя контрольные границы, или ВКГ и НКГ; верхняя и нижняя предупредительные границы, или ВПГ и НПГ.

Границы ВКГ и НКГ определяют поле допуска рассматриваемого количественного признака. Выход отдельных технологических процессов, входящих в изучаемую выборку, по данному количественному признаку за пределы границ ВКГ или НКГ, как показано на рисунке

94а ведет появлению продукции, не отвечающей выдвигаемым к ней требованиям. В этом случае требуется введение корректирующих мероприятий или вовсе остановка технологического процесса. Границы ВПГ и НПГ равны трем среднеквадратичным отклонениям количественного признака от центра поля допуска. Нарушение границ ВПГ и НПГ, показанное на рисунке 94б, обуславливает необходимость введения предупредительных мероприятий. В случае, когда построенная контрольная карта Шухарта соответствует виду, представленному на рисунке 94в, и не имеет нарушений каких-либо границ, необходимость в корректирующих или предупредительных мер по регулированию технологического процесса отсутствует. Тогда доступно определение коэффициентов точности и настроенности технологического процесса [88] и [89].

Коэффициент точности и настроенности технологического процесса показывает то, насколько поле рассеяния количественного признака отклоняется от поля допуска, и рассчитывается по формуле (42):

$$K_{\text{т}} = \frac{\text{ВКГ} - \text{НКГ}}{6 \cdot S}, \tag{42}$$

где S – среднеквадратичное отклонение количественного признака.

Коэффициент настроенности технологического признака определяется формулой (43):

$$K_{\text{н}} = \text{мин}\left(\frac{\text{ВКГ} - \bar{X}}{3 \cdot S};\ \frac{\bar{X} - \text{НКГ}}{3 \cdot S}\right). \tag{43}$$

Помимо определения необходимости введения корректирующих или предупредительных мероприятий целью статистического контроля является повышение коэффициентов точности и настроенности технологического процесса. Рекомендуемым пороговым значением коэффициента точности K_T и коэффициента настроенности K_H, достаточным для запуска производства, является не менее единицы с тенденцией повышения коэффициентов. Для мелкосерийного производства значения K_T и K_H должны быть не менее 2,0 и 1,5, соответственно. При этом если коэффициент настроенности K_H удовлетворяет неравенству $-1 < K_H < 1$, то рассматриваемый технологический процесс может быть запущен в производство, но с условием обязательного проведения стопроцентных отбраковочных испытаний. При коэффициенте настроенности K_H, значение которого меньше минус 1, технологический процесс не способен обеспечить требуемое качество продукции и не может быть введен в производство [87].

Другими словами, если при статистической оценке возможностей технологического процесса были получены неудовлетворительные значения коэффициентов точности и настроенности, необходимо разработать и принять совокупность мероприятий, следствием которых будет являться повышение данных коэффициентов до заданных значений. Если же получаемые значения коэффициентов точности и настроенности лежат в допустимых пределах, необходима поддержка технологического процесса на достигнутом уровне при постоянном статистическом контроле и непрерывное повышение параметров

В рамках разработанного маршрута изготовления кристалла линейки ЛФД необходимо убедиться в устойчивости подобранных режимов технологических процессов фотолитографии, жидкостного травления SiO_2 через маску фоторезиста и термического окисления кремния, в наибольшей степени влияющих на процент выхода годных кристаллов, а именно провести статистическую оценку их возможностей.

3.4.1 Фотолитография

Фотолитография встречается в маршруте изготовления фоточувствительного кристалла на этапах формирования ионно-диффузионных областей и создания контактных площадок к ним. При этом толщины получаемых масок фоторезиста по техническим характеристикам фоторезистов марок ФП-9120-1 и ФП-3520, приведенным в таблице 9 и таблице 10, должны лежать в диапазонах (1,10–1,30) мкм и (1,94–2,06) мкм, соответственно. Однако на практике допустимые диапазоны оказываются равными (0,9–1,5) мкм и (1,8–2,2) мкм.

Контроль толщин масок фоторезиста осуществлялся на контактном профилометре Dektak XT. Результаты измерений отражены в таблице 23.

Таблица 23 – Результаты контроля для технологических процессов фотолитографии

№ п/п	№ образца	Толщина маски фоторезиста, Å	
		ФП-9120-1	ФП-3520
1	2	3	4
1	1	12924	20924
2	2	10821	21021
3	3	13006	19006
4	4	13114	19514

Окончание таблицы 23.

1	2	3	4
5	5	11031	20531

На рисунке 95 приведены полученные контрольные карты Шухарта для обеих марок фоторезиста, а в таблице 24 – значения параметров статистической оценки.

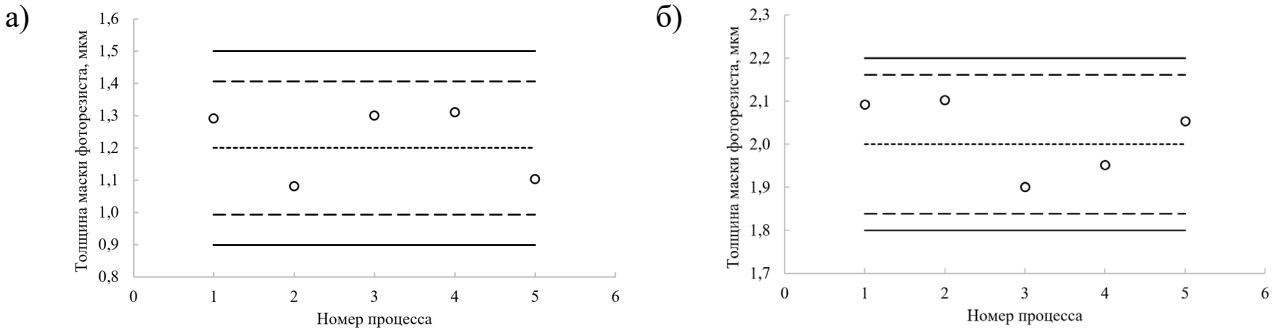


Рисунок 95 – Контрольные карты Шухарта для фотолитографии:
а – фотолитография с использованием фоторезиста марки ФП-9120-1;
б – фотолитография с использованием фоторезиста марки ФП-3520.

Таблица 24 – Статистическая оценка технологического процессов фотолитографии

№ п/п	Параметр	Расчет	Значение, мкм	
			ФП-9120-1	ФП-3520
1	2	3	4	5
1	Центр рассеяния $\bar{X}$	по формуле (39)	1,218	2,020
2	Среднеквадратичное отклонение S	по формуле (40)	0,115	0,089
3	Поле рассеяния ω	по формуле (41)	0,689	0,537
4	Коэффициент точности K_T	по формуле (42)	5,225	4,469
5	Коэффициент настроенности K_H	по формуле (43)	0,819	0,671

Для обеих марок фоторезистов значения K_T больше 1 и таким образом удовлетворяет условия для внедрения технологического процесса в мелкосерийное производство. При этом значения K_H попадают в границы (–1; 1), что накладывает необходимость проведения стопроцентных отбраковочных испытаний.

3.4.2 Жидкостное травление

Для технологических процессов жидкостного травления целесообразно произвести статистическую оценку удаления сэндвич-слоя на обратной стороне эпитаксиальной пластины и травления SiO_2 через маску фоторезиста до толщины 0,005 мкм. Для проведения статистической оценки возможностей обоих технологических процессов были проанализированы экспериментальные партии № 7–11, изготовление которых описано в подразделе 3.2.

Контрольные границы определяются толщиной сэндвич-слоя, который необходимо удалить, и остаточной толщиной пленки SiO_2. Контроль стравленного слоя кремния проводился на микрометре, а контроль толщины остаточной пленки после утонения пленки диоксида кремния – на оптическом профилометре ЛЭФ-3М-1 после снятия масок фоторезиста. Результаты измерений отражены в таблице 25. На рисунке 96 приведены полученные контрольные карты Шухарта, а в таблице 26 – значения параметров их статистической оценки.

Таблица 25 – Результаты контроля для технологических процессов жидкостного травления

№ п/п	№ экспериментальной партии	Значение	
		травление Si, мкм	травление SiO_2, Å
1	2	3	4
1	7	20,1	421
2	8	20,3	532
3	9	19,7	551
4	10	20,2	411
5	11	20,0	512

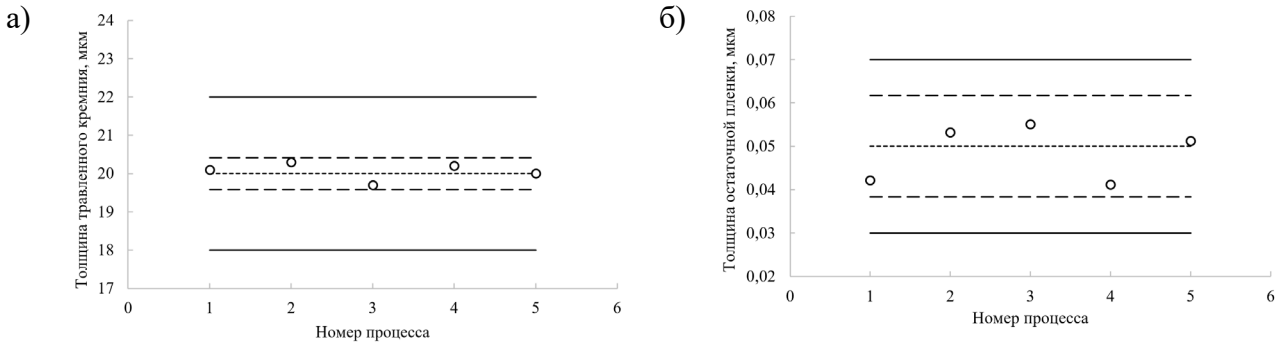


Рисунок 96 – Контрольные карты Шухарта для жидкостного травления:
а – удаление сэндвич-слоя; б – травления SiO_2.

Таблица 26 – Статистическая оценка технологических процессов жидкостного травления

№ п/п	Параметр	Расчет	Значение	
			травление Si	травление SiO_2
1	2	3	4	5
1	Центр рассеяния $\bar{X}$	по формуле (39)	20,060	0,049
2	Среднеквадратичное отклонение S	по формуле (40)	0,230	0,006
3	Поле рассеяния ω	по формуле (41)	1,381	0,039
4	Коэффициент точности K_T	по формуле (42)	17,375	6,160
5	Коэффициент настроенности K_H	по формуле (43)	2,809	0,952

Для обоих процессов значения K_T значительно больше 1, что допускает внедрение технологического процесса в мелкосерийное производство. Однако значение K_H для жидкостного травления пленки SiO_2 попадает в диапазон от минус 1 до 1, что накладывает на внедрение технологического процесса в мелкосерийное производство условия по проведению стопроцентных отбраковочных испытаний.

3.4.3 Термические процессы

Статистическая оценка возможностей производилась для следующих технологических процессов: термические окисления пленки SiO_2 до толщин 0,18 мкм и 0,67 мкм и термическое осаждение пленки Si_3N_4 с толщиной 0,10 мкм. Технологические процессы осуществлялись на предварительно очищенных подложках монокристаллического кремния. Всего было запущено 12 партий образцов, каждая четверка из которых подвергалась упомянутым термическим процессам. Результаты измерений отражены в таблице 27.

Таблица 27 – Результаты контроля для термических технологических процессов

№ п/п	№ образца	Толщина диэлектрической пленки, Å		
		0,18 мкм SiO_2	0,67 мкм SiO_2	0,10 мкм Si_3N_4
1	2	3	4	5
1	1	1780	6720	1020
2	2	1810	6680	980

Окончание таблицы 27.

1	2	3	4	5
3	3	1790	6710	990
4	4	1810	6700	1010

На рисунке 97 приведены построенные карты Шухарта, а в таблице 28 – значения параметров статистической оценки. Контроль толщин выращенных диэлектрических пленок проводился на оптическом профилометре ЛЭФ-3М-1.

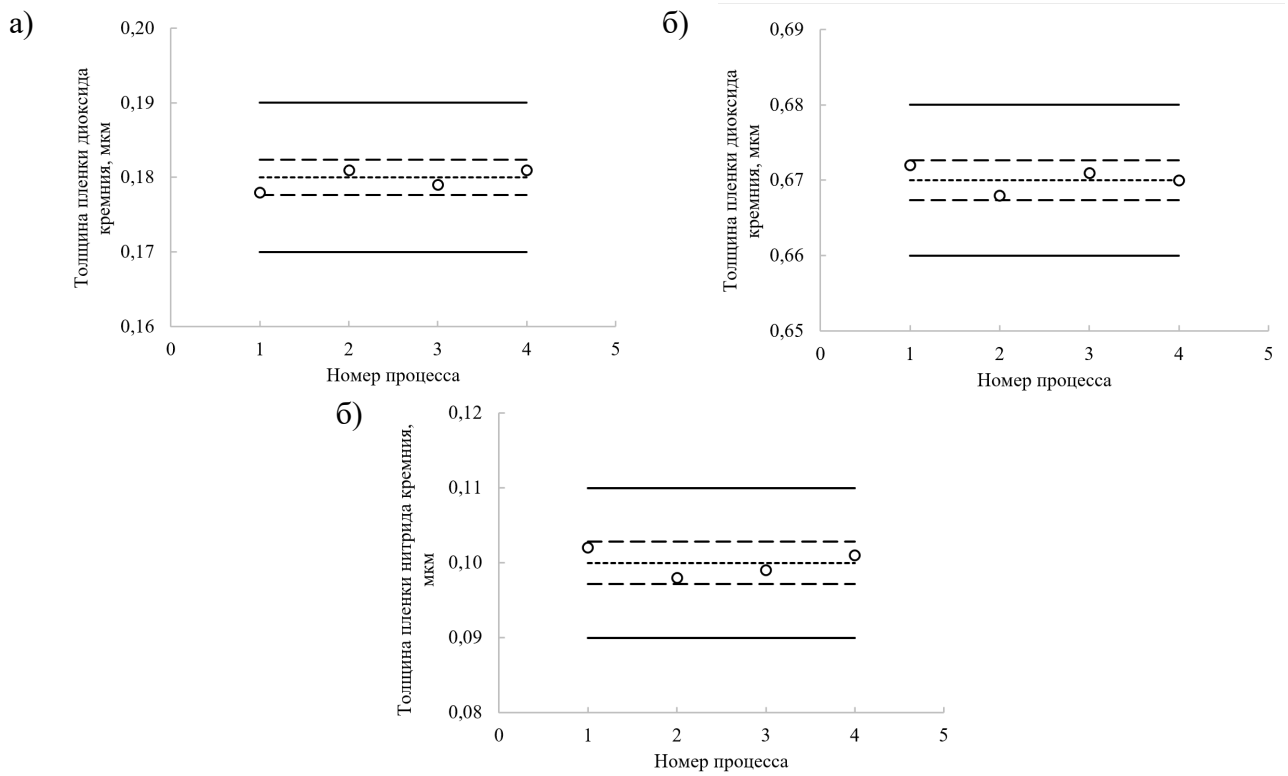


Рисунок 97 – Контрольные карты Шухарта для термических процессов:

а – окисление SiO_2 толщиной 0,18 мкм;

б – окисление SiO_2 толщиной 0,67 мкм;

в – осаждение Si_3N_4 толщиной 0,10 мкм.

Таблица 28 – Статистическая оценка термических технологических процессов

№ п/п	Параметр	Расчет	Значение		
			0,18 мкм SiO_2	0,67 мкм SiO_2	0,10 мкм Si_3N_4
1	2	3	4	5	6
1	Центр рассеяния $\bar{X}$	по формуле (39)	0,180	0,670	0,100

Окончание таблицы 28.

2	Среднеквадратичное отклонение S	по формуле (40)	0,001	0,001	0,002
3	Поле рассеяния ω	по формуле (41)	0,008	0,009	0,009
4	Коэффициент точности K_T	по формуле (42)	15,396	13,522	12,649
5	Коэффициент настроенности K_H	по формуле (43)	2,502	2,197	2,108

Полученные значения K_T и K_H позволяют вводить рассматриваемые технологические процессы в мелкосерийное производство в отсутствии стопроцентных отбраковочных испытаний на выходе.

3.4.4 Напыление металлизации

Процессы формирования двуслойной металлизации также подвергались статистической оценке возможностей. В качестве анализируемой выборки образцов для напыления слоев хрома с толщинами 0,02 мкм и 0,005 мкм рассматривались подложки монокристаллического кремния, прошедшие соответствующие технологические процессы, параметры которых описаны в подразделе 3.1.5, в количестве 10 шт. на каждую сторону образцов. Для процесса напыления обеих пленок металла изучались экспериментальные партии № 7–11, изготовление которых описано в подразделе 3.2. Результаты измерений отражены в таблице 29.

Таблица 29 – Результаты контроля для технологических процессов напыления металлизации

№ п/п	№ образца или экспериментальной партии	Толщина металлической пленки, Å			
		0,02 мкм Cr	0,005 мкм Cr	Cr/Au (лиц. ст.)	Cr/Au (обр. ст.)
1	2	3	4	5	6
1	1	201	49	–	–
2	2	198	50	–	–
3	3	199	50	–	–
4	4	199	49	–	–
5	5	200	51	–	–
6	6	200	50	–	–
7	7	201	50	5240	5050

Окончание таблицы 29.

1	2	3	4	5	6
8	8	200	50	5250	5049
9	9	199	50	5260	5051
10	10	200	50	5260	5050
11	11	–	–	5250	5050

На рисунке 98 приведены построенные карты Шухарта, а в таблице 30 – значения параметров статистической оценки. Контроль толщин напыленных пленок проводился на контактном профилометре Dektak 3030, при этом ступенька между металлизацией и поверхностью пластины создавалось маскирование тестовой пластиной перед их загрузкой в рабочую камеру установки напыления Leybold Heraeus L-560.

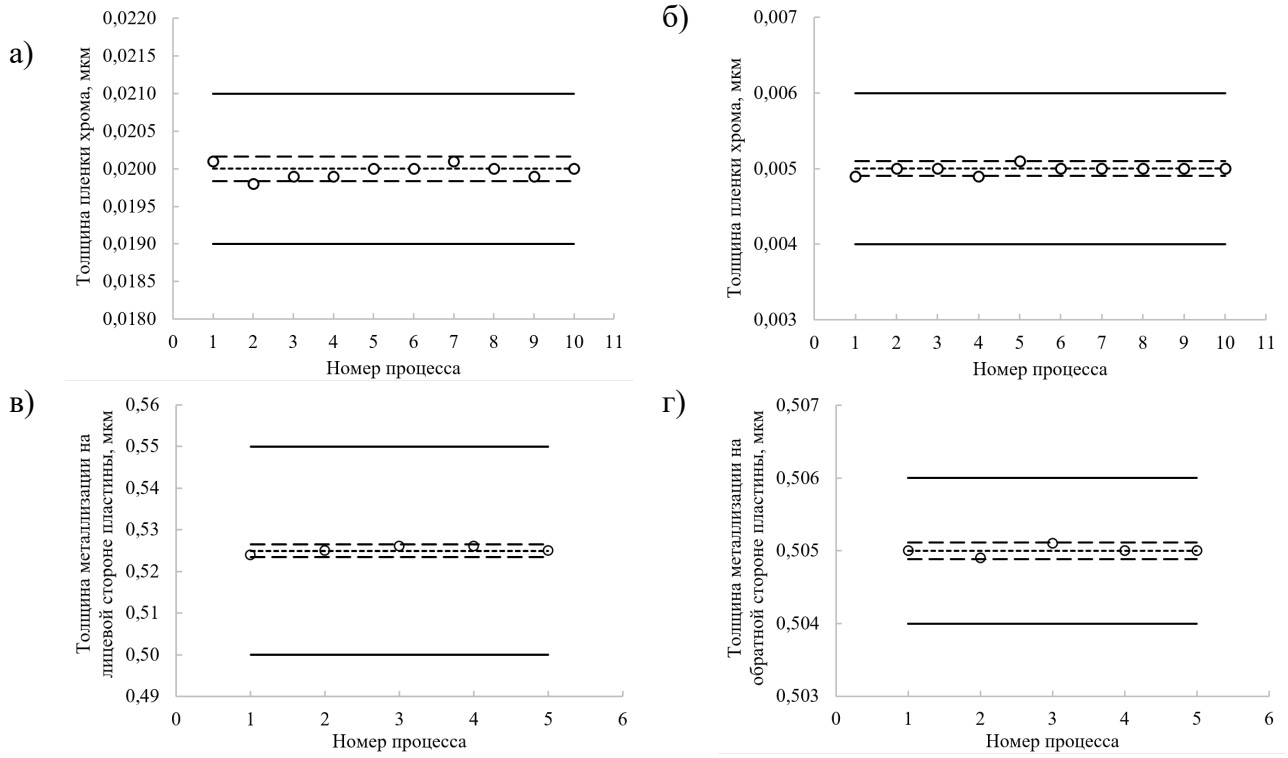


Рисунок 98 – Контрольные карты Шухарта для напыления металлизации:
а – напыление хрома толщиной 0,02 мкм; б – напыление хрома толщиной 0,005 мкм;
в – напыление двуслойной металлизации на лицевую сторону пластин;
г – напыление двуслойной металлизации на обратную сторону пластин.

Таблица 30 – Статистическая оценка технологических процессов напыления металлизации

№ п/п	Параметр	Расчет	Значение			
			0,02 мкм Cr	0,005 мкм Cr	Cr/Au (лиц. ст.)	Cr/Au (обр. ст.)
1	2	3	4	5	6	7
1	Центр рассеяния $\bar{X}$	по формуле (39)	0,0200	0,0050	0,525	0,5050
2	Среднеквадратичное отклонение S	по формуле (40)	0,0001	0,0001	0,001	0,0001
3	Поле рассеяния ω	по формуле (41)	0,0005	0,0003	0,005	0,0004
4	Коэффициент точности K_T	по формуле (42)	22,222	37,139	59,761	31,623
5	Коэффициент настроенности K_H	по формуле (43)	3,593	6,128	9,881	5,271

Полученные значения K_T и K_H позволяют вводить рассматриваемые технологические процессы в мелкосерийное производство в отсутствии стопроцентных отбраковочных испытаний на выходе.

3.6 Технологическая документация

Составление технологической документации является неотъемлемой частью разработки новой технологии изготовления изделия микроэлектроники. Оформление технологической документации проводится по стандартам ЕСТД, приведенным в [91]–[105].

Маршрутная карта включает состав и последовательность всех технологических операций, необходимых для изготовления изделия, в данном случае, фоточувствительного кристалла, а также сведения об оборудовании, технологической оснастке и материальных нормативов. Операционная карта включает описание последовательности переходов в рамках одной технологической операции и также содержит сведения о средствах технологического оснащения, режимах проведения конкретной операций и затратах материалов. Технологическая инструкция содержит задействованные в производстве технологические операции, их операционные параметры и требования к ним, а также условия безопасности, хранения как сырья и вспомогательных материалов, так и готовой продукции.

В соответствии с разработанным маршрутом изготовления кристалла линейки ЛФД была разработана эскизная технологическая документация, включающая следующие операционные карты (ОК) и технологические инструкции (ТИ), представленные в подразделах 3.1 и 3.7:

1. ОК защита лицевой стороны пластины ХВ-784;
2. ОК удаление сэндвич-слоя с обратной стороны;
3. ОК обработка пластин в деионизованной воде;
4. ОК сушка пластин на центрифуге;
5. ОК удаление пленки лака ХВ-784;
6. ОК химическая обработка в АПР;
7. ОК окисление термическое;
8. ОК нанесение фоторезиста;
9. ОК термообработка фоторезиста;
10. ОК совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А;
11. ОК совмещение и экспонирование на установке MDA-400M-6;
12. ОК проявление;
13. ОК контроль пластин после проявления;
14. ОК контроль маски фоторезиста;
15. ОК жидкостное травление пленки диоксида кремния с маской фоторезиста;
16. ОК жидкостное травление пленки диоксида с обратной стороны пластины;
17. ОК контроль травления;
18. ОК удаление фоторезиста в аммиачно-перекисном растворе;
19. ОК удаление фоторезиста в органических растворителях;
20. ОК контроль пластин после удаления фоторезиста;
21. ОК термическое осаждение пленки Si_3N_4;
22. ОК отжиг в азоте;
23. ОК отжиг в кислороде;
24. ОК контроль толщины и показателя преломления диэлектрических пленок;
25. ОК быстрый термический отжиг;
26. ОК обработка пластин в серной кислоте;
27. ОК напыление пленок хрома и золота;
28. ОК травление пленок золота и хрома;
29. ОК контроль толщины металлизации;
30. ОК контроль коэффициента лавинного умножения;
31. ОК контроль токовой монохроматической чувствительности;
32. ОК контроль темновых токов;

33. ОК дисковая резка на кристаллы;
34. ОК разделение пластин на кристаллы;
35. ОК контроль внешнего вида кристаллов;
36. ТИ Проведение процесса ионной имплантации на установке Scanibal SCI 218;
37. ТИ Приготовление раствора для травления пленки двуокиси кремния.

Для оценки ресурсоемкости данной технологии изготовления необходимо составление номенклатуры материалов, используемых в каждом технологическом процессе и операции, а также произведение расчета их расходов. Параметры режимов, оборудование, технологическая оснастка, химические реактивы, газы и другие расходные материалы, а также ход выполнения технологических процессов и операций в полной мере описаны в подразделе 3.1.

В таблице 31 приведена аккумуляция сведений о задействованном оборудовании, применяемой технологической оснастке и используемых материалах, а также их расходов на одну пластину для всех технологических процессов и операций в рамках маршрута изготовления фоточувствительного кристалла.

Таблица 31 – Сведения об оборудовании, технологической оснастке и материалах

№ п/п	Технологический процесс или операция	Оборудование	Технологическая оснастка	Материал	Расход
1	2	3	4	5	6
1	Защита лицевой стороны пластины лаком ХВ-784	— Рабочее место для защиты поверхности лаком ХВ-784, оборудованное вытяжной вентиляцией и инфракрасной лампой; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы механические ГОСТ 3145–84; — Капельница-дозатор с пипеткой ГОСТ 21400–75; — Лист винипласта ВН 1300 х 500 х 5 ГОСТ 9639–71; — Лезвие ТУ 3–1636–89; — Межоперационная тара TW-3; — ЕЖЯИ.296219.005–02 Кассета.	Лак ХВ-784 ГОСТ 4644-75	15 мл
2	Удаление сэндвич-слоя с обратной стороны	— Рабочее место для химико-динамического травления, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией и кислотно-щелочным сливом	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Бутыль полипропиленовая с навинчивающейся крышкой 1000 мл;	Кислота азотная х.ч. ГОСТ 4461–77	238,2 мл
				Кислота уксусная ледяная х.ч. ГОСТ 61–75	5,9 мл
				Кислота фтористоводородная ос.ч. 27–5 ТУ 2612–007–56853252–2010	5,9 мл

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
2	(продолжение)	— Установка динамического травления К92.145; — Центрифуга для сушки пластин ОПн-3 ТУ 5.375–4260–76.	— Мерный цилиндр 1–2000 ГОСТ 1770–74; — ЕЖЯИ.711125.003 Кассета; — ЕЖЯИ.711115.006 Крышка.	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298-2005	–
3	Обработка пластин в деионизованной воде	Рабочее место для отмывки пластин в деионизованной воде, оборудованное подводом деионизованной воды и трехкаскадной ванной	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Мерный цилиндр 1–2000 ГОСТ 1770–74; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3.	Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
4	Сушка пластин на центрифуге	Центрифуга вертикальной сушки в атмосфере азота	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3.	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
5	Удаление пленки лака ХВ-784	Рабочее место для удаления пленки лака ХВ-784, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной с нагревательным элементом и кислотно-щелочным сливом.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Лист винипласта ВН 1300 х 500 х 5 ГОСТ 9639–71; — Лезвие ТУ 3–1636–89; — ЕЖЯИ.296219.005-02 Кассета.	Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Спирт этиловый ректификованный, технический, высший сорт ГОСТ 18300–87	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
6	Химическая обработка в аммиачно-перекисном растворе	— Рабочее место для химической обработки, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной с нагревательным элементом, трехкаскадной ванной и кислотно-щелочным сливом; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Мерный цилиндр 1–2000 ГОСТ 1770–74; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3; — ЕЖЯИ.443119.002СБ Стакан — ЕЖЯИ.296219.005-02 Кассета.	Водорода перекись ос.ч. 8–4 ТУ 2013.63–207–44493179–2016	100 мл
				Аммиак водный ос.ч. 23–5 ГОСТ 24147-80	25 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	25 мл
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
7	Окисление термическое	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98; — Вольтметр АКИП-2101; — Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015; — Крючок К 991.114.000; — Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — ЕЖЯИ.443299.003 Реактор; — ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая; — ЕЖЯИ.296225.012 Пенал;	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74	75 700 л
				Кислород газообразный, технический, 1 сорт ГОСТ 5583–78	65 л
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
7	(продолжение)		— ЕЖЯИ.296219.016 Подставка.		
8	Нанесение фоторезиста	— Центрифуга SPIN-400A производства «Midas System» с автоматическим дозированием; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Стаканчик СВ 34/12 ГОСТ 25336–82; — Чашка ЧБН-1-100 Петри ГОСТ 23932–90; — Пипетка 1-1-50 ГОСТ 20292–74; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3.	ФП-9120-1 ТУ 2378–015–29135749–2015	0,27 мл
				ФП-3520 ТУ 20.59.12–017–18567185–2017	0,35 мл
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Ацетон ос.ч. 9-5 ОП-2 ТУ 2633–039–44493179–00	–
9	Термообработка фоторезиста	— Нагревательная плита HotPlate; — Шкаф сушильный SNOL 120/300	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001;	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
9	(продолжение)		— Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; Межоперационная тара TW-3.		
10	Совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А	Установка совмещения и экспонирования ЭМ-576А	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3.	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
11	Совмещение и экспонирование на установке MDA-400M-6	Установка совмещения и экспонирования MDA-400M-6	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3.	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
12	Проявление	Центрифуга SPIN-400A производства «Midas System» с автоматическим дозированием	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82.	Калия гидроксид ос.ч. 18-3 водный раствор 45 % СТП ТУ КОМП 3-088-09	6,5 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
13	Контроль пластин после проявления	Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Чашка ЧБН-1-100 Петри ГОСТ 23932–90; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
14	Контроль маски фоторезиста	Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Чашка ЧБН-1-100 Петри ГОСТ 23932–90; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
15	Жидкостное травление пленки диоксида кремния с маской фоторезиста	Рабочее место для травления двуокиси кремния с маской фоторезиста, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной, трехкаскадной ванной и	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3;	Кислота фтористоводородная ос.ч. 27–5 ТУ 2612–0087–56853252–2010	0,25 мл
				Аммоний фтористый ос.ч. 5–4 ТУ 6–09–01–646–83	68,93 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003–80	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
15	(продолжение)	кислотно-щелочным сливом	— Межоперационная тара TW-3; ЕЖЯИ.296219.005–02 Кассета.		
16	Жидкостное травление пленки диоксида кремния с обратной стороны пластины	— Рабочее место для травления двуокиси кремния с обратной стороны, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной, трехкаскадной ванной и кислотно-щелочным сливом; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3; — Межоперационная тара TW-3; — ЕЖЯИ.296219.005–02 Кассета.	Кислота фтористоводородная ос.ч. 27–5 ТУ 2612–0087–56853252–2010	0,25 мл
				Аммоний фтористый ос.ч. 5–4 ТУ 6–09–01–646–83	68,93 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003–80	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
17	Контроль травления	Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Чашка ЧБН-1-100 Петри ГОСТ 23932–90;	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
17	(продолжение)		— Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25.	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
18	Удаление фоторезиста в аммиачно-перекисном растворе	— Рабочее место для химической обработки, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией, фторопластовой ванной с нагревательным элементом, трехкаскадной ванной и кислотно-щелочным сливом; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Мерный цилиндр 1–2000 ГОСТ 1770–74; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Ручка для переноски пластин в кассетах WCH-PHA-3;	Водорода перекись ос.ч. 8–4 ТУ 2013.63–207–44493179–2016	100 мл
				Аммиак водный ос.ч. 23–5 ГОСТ 24147-80	25 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	25 мл
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
18	(продолжение)		— Межоперационная тара TW-3; — ЕЖЯИ.443119.002СБ Стакан; ЕЖЯИ.296219.005–02 Кассета.		
19	Удаление фоторезиста в органических растворителях	— Рабочее место для химической обработки, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией и кислотно-щелочным сливом; — Электроплитка EN-901; — Центрифуга для сушки пластин ОПн-3 ТУ 5.375-4260-76; — Шкаф межоперационного хранения пластин ШОС-Х.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Мерный цилиндр 1–2000 ГОСТ 1770–74; — Межоперационная тара TW-3; — ЕЖЯИ.443119.002СБ Стакан; — ЕЖЯИ.443129.003СБ Кассета.	Снимательь СПР-01Ф ТУ 2378-008-29135749-2007	48 мл
				Изопропанол ос.ч. 11-5 ОП-1 ТУ 2632-064-44493179-01	167 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
20	Контроль пластин после удаления фоторезиста	— Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78; — Стол лабораторный.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	4 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–
21	Термическое осаждение пленки Si_3N_4	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98; — Вольтметр АКИП-2101; — Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015; — Крючок К 991.114.000; — Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82;	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74	340 л
				Дихлорсилан ТУ 2435–002–16422443-2000	9,2 л
				Аммиак ГОСТ 6221–90 марка А	18,4 л
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
21	(продолжение)		— Межоперационная тара TW-3; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — ЕЖЯИ.443299.003 Реактор; — ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая; — ЕЖЯИ.296225.012 Пенал; — ЕЖЯИ.296219.016 Подставка.	Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–
22	Отжиг в азоте	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98; — Вольтметр АКИП-2101; — Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015; — Крючок К 991.114.000;	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74	340 л
				Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
22	(продолжение)		— Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — ЕЖЯИ.443299.003 Реактор; — ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая; — ЕЖЯИ.296225.012 Пенал; — ЕЖЯИ.296219.016 Подставка.	Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–
23	Отжиг в кислороде	Электропечь диффузионная однозонная СДОМ 3/100	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98; — Вольтметр АКИП-2101;	Азот газообразный, I сорт ГОСТ 9293–74	75 700 л
				Кислород газообразный, технический, 1 сорт ГОСТ 5583–78	85 л

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
23	(продолжение)		— Преобразователь термоэлектрический ТПР ТУ 4211–005–10854341–2015; — Крючок К 991.114.000; — Реактор (чехол для крючка) К 742.114.01; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — ЕЖЯИ.443299.003 Реактор; — ЕЖЯИ.296225.010 Кассета кварцевая; — ЕЖЯИ.296225.012 Пенал; — ЕЖЯИ.296219.016 Подставка.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
24	Контроль толщины и показателя преломления диэлектрических пленок	Эллипсометр ЛЭФ-3М-1	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	4 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–
25	Быстрый термический отжиг	Вакуумная печь оплавления RSO-650-200 NPO	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Часы-секундомер электронные Интеграл ЧС-01 ГОСТ 23350–98; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья марки «Люкс» ГОСТ 5962–2013	8 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
26	Обработка пластин в серной кислоте	Рабочее место для обработки пластин в серной кислоте, оборудованное подводом деионизованной воды и кислотно-щелочным сливом	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — ЕЖЯИ.443119.002СБ Стакан.	Кислота серная ос.ч. 11-5 ГОСТ 14262-78	2 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Перчатки резиновые технические типа II ГОСТ 20010–93	–
27	Напыление пленок хрома и золота	— Установка вакуумного напыления Leybold Heraeus L-560; — Стол монтажный; — Контактный профилометр Bruker Dektat XT; — Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Отвертка 7810–0352 2Н 12Х1 ГОСТ 17199–88; — Эксикатор 2–190 ГОСТ 25336–82; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336–82;	Мишень хрома	Лиц. сторона: 0,0028 г
					Обр. сторона: 0,0007 г
				Проволока Зл 99,99 0,3 мм ГОСТ 7222–2014	0,7608 г
				Аргон ТУ 6–21–12–94	–
				Воздух сжатый ГОСТ 17433–80	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
27	(продолжение)		— Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878–2013	8 мл
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
28	Травление пленок золота и хрома	— Рабочее место для травления пленок золота и хрома, оборудованное подводом деионизованной воды, вытяжной вентиляцией и кислотно-щелочным сливом; — Центрифуга для сушки пластин ОПн-3 ТУ 5.375–4260–76.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Секундомер СОПпр-2а-2–010 ТУ РБ 100231303.010–2001; — Бутыль полипропиленовая с навинчивающейся крышкой 1000 мл; — Кассета для обработки пластин в реактивах WC-PFA-3-25; — Межоперационная тара TW-3.	Хрома (VI) окись чда ГОСТ 3776-78	0,75 г
				Церий (IV) сернокислый 4-водный ч. ТУ 6-09-1646-77	1,35 г
				Кислота серная ос.ч. 11-5 ГОСТ 14262-78	0,23 мл
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–
				Кислота йодистоводородная ч. ГОСТ 4200-77	3,97 мл
				Йод кристаллический чда ГОСТ 4159-79	0,12 г
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
29	Контроль толщины металлизации	Контактный профилометр Bruker Dektak 3030	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–
30	Контроль коэффициента лавинного умножения	— Установка для характеризации параметров фоточувствительных элементов; — Стол лабораторный; — Цифровой осциллограф UNI-T; — Источник питания постоянного тока Б5-45 ТУ 3.233.219;	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 4644–75	–
				Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Перчатки из трикотажного полотна ГОСТ 5007–87	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
30	(продолжение)	— Генератор импульсов Г5-54 ТУ 3.269.076; — Излучатель лазерный на длину волны 0,85 мкм; — Зондовое устройство «Karl Suss»; — Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78.			
31	Контроль токовой монохроматической чувствительности	— Стол лабораторный; — Цифровой осциллограф UNI-T UTD2052CEX; — Источник питания постоянного тока Б5-45 ТУ 3.233.219; — Генератор импульсов Г5-54 ТУ 3.269.076; — Излучатель лазерный на длину волны 0,85 мкм;	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Эксикатор 2–240 ГОСТ 25336–82; — Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336–82; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878-2013	4 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ29298-2005	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
31	(продолжение)	— Зондовое устройство «Karl Suss»; — Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78.			
32	Контроль темновых токов	— Стол лабораторный; — Вольтметр В7-40/5 ТГ 2.710.016 ТУ; — Источник питания GW Instek GPR-730H10D; — Система многозондовая измерительная РМ-5 «Karl Suss»; — ЕЖЯИ.468349.003 Коммутатор.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Эксикатор 2–240 ГОСТ 25336–82; — Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336–82; — Бюкс с притертой крышкой ГОСТ 25336–82; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878-2013	4 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ29298-2005	–
				Ткань хлопчатобумажная (черная) ГОСТ 29298-92	–
33	Дисковая резка пластин на кристаллы	Установка полуавтоматической дисковой резки серии ADT 7100	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Перчатки резиновые технические тип II ТУ 6–02–570–75	–
				Вода деионизованная, марки А ОСТ 11.029.003-80	–

Продолжение таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
34	Разделение пластин на кристаллы	Стол лабораторный	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Ножницы 2809–0002 КД 21хр ГОСТ 7210–75; — Линейка ЛП-200 ГОСТ 17435–72; — Пластина (резина), лист ТКМЩ М 3х250х250 ТУ 38-105116-70; — Эксикатор 2–240 ГОСТ 25336–82; — Чашка Петри ЧБН-2 ГОСТ 25336–82; — ЕЖЯИ.304346.001 Валик для разделения пластин на кристаллы.	Пленка полиэтиленовая Н, полотно 0,200 х 1600, сорт 1 ГОСТ 18300-87	6 $см^2$
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				Фильтр обеззоленный ТУ 6–09–1678–95	–
				Силикагель-индикатор ГОСТ 8984–75	–
				х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298–2005	–
35	Контроль внешнего вида кристаллов	— Микроскоп МБС-9 ТУ 3–3.1210–78; — Стол лабораторный.	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878-2013	4 мл
				Ткань х/б (бязь, батист) ГОСТ 29298-2005	–

Окончание таблицы 31.

1	2	3	4	5	6
36	ТИ Ионная имплантация	— Установка ионно-лучевая Scanibal SCI 218; — Дозиметр рентгеновского излучения ДКР-АТ 1103М Атомтех	— Пинцет ГОСТ 21241–89; — Межоперационная тара TW-3.	Трехфтористый бор или флюбор BF3 ОСТ 6–02–4–83	0,6 г
				Треххлористый фосфор PCl_3 ЕТО.035.290 ТУ	1,6928 г
				Красный фосфор Р4 ОСЧ ТУ 6–09–3507–74	–
				Азот жидкий технический высший сорт ГОСТ 9293–74	–
				Аргон газообразный марки ОСЧ ТУ 6–21–12–94	11,3 г
				Спирт этиловый технический гидролизный ГОСТ Р 55878-2013	10 мл

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена топология и вертикальная архитектура фоточувствительного кристалла.

2. В рамках поиска технологических решений, применимых в разрабатываемой технологии изготовления фоточувствительного кристалла, изучено влияние низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на электрофизические параметры как диодных, так и фотодиодных структур.

3. Показано и подтверждено на примере серийно выпускаемого ограничительного диода p^+-n на основе кремния с малой площадью контакта, равной 0,002 мм^2, что импульсный термический отжиг в среде H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с позволяет снизить удельное контактное сопротивление диодных структур вследствие инициации образования низкотемпературных силицидов титана и повысить процент выхода годных кристаллов.

4. Показано и подтверждено на примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p*-*i*-*n* фотодиода, изготавливаемого на подложке высокоомного кремния *p*-типа проводимости, что импульсный термический отжиг в среде H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с позволяет снизить уровень темновых токов фотодиодных структур вследствие насыщения оборванных Si-связей водородом и повысить процент выхода годных кристаллов.

5. В рамках поиска технологических решений, применимых в разрабатываемой технологии изготовления фоточувствительного кристалла, изучены свойства пленки Al_2O_3, обладающей потенциалом для стабилизации зарядовых свойств на границе раздела кремния и пленки оксида кремния, а также предотвращения образования инверсного канала в приповерхностной области эпитаксиальной подложки.

6. Показано и подтверждено на примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p*-*i*-*n* фотодиода, изготавливаемого на подложке высокоомного кремния *p*-типа проводимости, что пленка Al_2O_3 толщиной 0,14 мкм, осажденной методом высокочастотного катодного распыления мишени в среде аргона, стабилизирует встроенный положительный заряд пленки SiO_2 толщиной 0,18 мкм на границе раздела с высокоомным кремнием *p*-типа проводимости, таким образом предотвращая образование канала инверсного типа проводимости, ухудшающего уровень темновых токов и сопротивление изоляции планарно расположенных фоточувствительных элементов.

7. Определены оптимальные параметры проведения технологических процессов и операций химической обработки, фотолитографии, жидкостного травления, ионной имплантации, термодиффузионных процессов, процессов формирования диэлектрических слоев, а также пооперационного технологического контроля и признаки годности.

8. Разработан технологический маршрут изготовления линейки лавинных фотодиодов с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм.

9. Изготовлены фоточувствительные кристаллы линейки лавинных фотодиодов с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм.

10. Проведена статистическая оценка точности и настроенности технологических процессов фотолитографии, жидкостного травления сэндвич-слоя эпитаксиальной пластины кремния и пленки SiO_2, термического окисления пленки SiO_2 и термического осаждения Si_3N_4 из газовой смеси Si_3N_4, а также формирования металлизации с обеих сторон пластин, допускающая их внедрение в мелкосерийное производство.

11. Составлена эскизная технологическая документация в виде операционных карт на технологические процессы и операции, применяемые в рамках маршрута изготовления фоточувствительного кристалла.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЛФД	–	лавинный фотодиод
Si	–	кремний
E	–	напряженность электрического поля или энергия ионов (ионная имплантация)
Ge	–	германий
ОПЗ	–	область пространственного заряда
α	–	коэффициент ударной ионизации электронов
β	–	коэффициент ударной ионизации дырок
ξ_n	–	пороговое значение ионизации электронов
ξ_p	–	пороговое значение ионизации дырок
ξ_ϕ	–	энергия оптического фонона
M	–	коэффициент лавинного умножения
ω, или ω_y	–	ширина области умножения
ω_i	–	толщина области поглощения
υ_n	–	скорость электронов
υ_p	–	скорость дырок
$h(t)$	–	импульсная характеристика ЛФД
$i(t)$	–	отклик ЛФД
PtSi	–	силицид платины
GaN	–	нитрид галлия
SiH_4	–	моносилан
$Mg(C_5H_5)_2Cp_2Mg$	–	бис-циклопентадиенил магния
ICP-RIE	–	травление в индуктивно-связанной плазме
Ti	–	титан
Al	–	алюминий
Au	–	золото
Ni	–	никель
Ag	–	серебро
EBPVD	–	электронно-лучевое осаждение из паровой фазы
N_2	–	азот
PECVD	–	плазмохимическое осаждение из газовой фазы
SiO_2	–	диоксид кремния
MOVPE	–	МОС-гидридная эпитаксия

Be	–	бериллий
H_3PO_4	–	ортофосфорная кислота
H_2O_2	–	перекись водорода
ФЧП	–	фоточувствительная площадка
CdZnTe	–	кадмий-цинк-теллур
Hg	–	ртуть
CdTe	–	теллурид кадмия
N_d	–	концентрация доноров
Cd	–	кадмий
SF_6	–	гексафторид
Si_3N_4	–	нитрид кремния
Al_2O_3	–	оксид алюминия
HfO_2	–	диоксид гафния
ZrO_2	–	диоксид циркония
ADL	–	атомно-слоевое осаждение
IBS	–	ионно-лучевое испарение
МДП-структура	–	структура металл-диэлектрик-полупроводник
CV	–	вольт-фарадная характеристика
U_{FB}	–	напряжение плоских зон
Q_{SS}	–	эффективная плотность поверхностного заряда
$R_{из}$	–	сопротивление изоляции
ПХО	–	плазмохимическая обработка
БТО	–	быстрый термический отжиг
LTLM-метод	–	метод длинной линии
ВАХ	–	вольт-амперная характеристика
ТКРЛ	–	тепловой коэффициент линейного расширения
ХСЛ	–	химико-стойкий лак
Cr	–	хром
КАРО	–	смесь перекиси водорода и серной кислоты
АПР	–	аммиачно-перекисный раствор
H_2SO_4	–	серная кислота
УФ-сушка	–	ультрафиолетовая сушка
lift-off	–	взрывная фотолитография
$C_6H_{19}NSi_2$	–	гексаметилдисилазан или ГМДС
KOH	–	гидроксид калия

СПР-01Ф – сниматель позитивных фоторезистов

HNO_3 – азотная кислота

CH_3COOH – уксусная кислота

HF – фтористоводородная кислота

NH_4F – фторид аммония

CrO_3 – оксид хрома (IV)

$Ce(SO_4)_2$ – сернокислый церий четырехводный

HI – йодистоводородная кислота

KI – йодид калия

Na – натрий

B^+ – ион бора

BF_3 – трифторид бора

P^+ – ион фосфора

PCl_3 – трихлорид фосфора

Ar^+ – ион аргона

n – показатель преломления диэлектрической пленки

k – коэффициент взаимосвязи

$M_{макс}$ – максимальное значение коэффициента лавинного умножения

$U_{макс}$ – максимальное напряжение, подаваемое на ЛФД, до возникновения микроплазмы

$U_{прокол}$ – напряжение прокола области поглощения

$U_{при\ M=100}$ – напряжение, при котором достигается максимальное значение коэффициента лавинного умножения

ВКГ – верхняя контрольная граница контрольной карты Шухарта

НКГ – нижняя контрольная граница контрольной карты Шухарта

ВПГ – верхняя предупреждающая граница контрольной карты Шухарта

НПГ – нижняя предупреждающая граница контрольной карты Шухарта

K_T – коэффициент точности технологического процесса

K_H – коэффициент настроенности технологического процесса

ЕСТД – единая система технологической документации

МК – маршрутная карта

ОК – операционная карта

ТИ – технологическая инструкция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завадовская Е. К. Результаты экспериментальных исследований подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках в сильных электрических полях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1956. – № 82. – С. 16–20.

2. Fang F.F., Fowler A.B. Hot Electron Effects and Saturation Velocities in Silicon Inversion Layers // Journal pf Applied Physics. – 1970. – vol. 41. – № 4. – P. 1825–1831.

3. Kaneda T. Silicon and Germanium Avalanche Photodiodes // Semiconductors and Semimetals. – 1985. – vol. 22. – P. 247–328.

4. Kindt W.J., Shahrjerdy N.H., Zeijl H.W. A silicon avalanche photodiode for single optical photon counting in the Geiger mode // Sensors and Actuators A: Physical. – 1997. – vol. 60. – № 1–3. – P. 98–102.

5. Huntington A.S. Types of avalanche photodiode // InGaAs Avalanche Photodiodes for Ranging and Lidar. – 2020. – P. 1–92.

6. Zedric R.M., Chirayath S.S., Marianno C.M., Diawara Ya., Skukan N. Bias-dependent displacement damage effects in a silicon avalanche photodiodes // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. – 2021. – vol. 507. – P. 42–45.

7. Khodin A., Shvarkov D., Zalesski V. Silicon avalanche photodiodes for particle detector: modelling and fabrication // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – vol. 465. – P. 253–256.

8. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Издательство Московского физико-технического института, 2011. – 448 с.

9. Tapan I., Gilmore R.S. Simulation of signal generation for silicon avalanche photodiodes (APDs) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2000. – vol. 454. – P. 247–251.

10. Ji M.-H., Kim J., Detchprohm T., Dupuis R.D. Uniform and reliable GaN p-i-n ultraviolet avalanche photodiode arrays // IEEE Photonics technology letters. – 2018. – vol. 28. – № 19. – P. 2015–2018.

11. Пономаренко В.П. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946–2016). – М.: Физматкнига, 2016. – 448 с.

12. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Издательство Московского физико-технического института, 2007. – 384 с.

13. Yoo D. $Al_XGa_{1-x}N$ ultraviolet avalanche photodiodes grown on GaN substrates // IEEE Photonics technology letters. – 2007. – vol. 19. – № 17. – P. 1313–1515.

14. Mclnctosh K.A. Ultraviolet photon counting with GaN avalanche photodiodes // Applied physics letters. – 2000. – vol. 76. – № 26. – P. 3938–3940.

15. Whitaker M.D.C., Lioliou G., Barnett A.M. $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 2×2 square pixel X-ray photodiode array // Nuclear inst. and methods in physics research. – 2018. – P. 106–114.

16. Barnett A.M., Lioliou G., Ng J.S. Characterization of room temperature AlGaAs soft X-ray mesa photodiodes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – vol. 774. – P. 29–33.

17. Whitaker M.D.C., Butera S., Lioliou G., Barnett M. Temperature dependence of $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ X-ray photodiodes for X-ray spectroscopy // Journal of Applied Physics. – 2017. – vol. 122.

18. Barnett A.M., Lees J.E., Bassford D.J. First spectroscopic X-ray and beta results from a 400 μm diameter $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ photodiode // Journal of Instrumentation. – 2013. – № 10.

19. Han X., Guo H., Yang L. and etc. Dark current and noise analysis for Long-wavelength infrared HgCdTe avalanche photodiodes // Infrared Physics and Technology. – 2022. – vol. 123.

20. Park S., Grein C.H. A Plausible SAM IR APD with HgCdTe Heterojunctions // Journal of Electronic Materials volume. – 2019. – vol. 48. – P. 8163–8171.

21. Romeo G., Bonanno G., Timpanaro M.C. Novel silicon photomultipliers suitable for dual-mirror small-sized telescopes of the Cherenkov telescope array // Nuclear inst. and methods in physics research. – 2018. – vol. 908. – P. 117–127.

22. Ambrosi G., Bissaldi E., Giordano F. and et. al. Silicon Photomultipliers and front-end electronics performance for Cherenkov Telescope Array camera development // Nuclear inst. and methods in physics research. – 2017. – vol. 845. – P. 8–11.

23. Xiong H., Zhou R., Chen J. and et. al. Design and performance of analog circuit for the wide field of view Cherenkov telescope array of LHAASO // Nuclear inst. and methods in physics research. – 2019. – vol. 925. – P. 156–163.

24. Britvitch I., Deiters K., Ingram Q., Kuznetsov A., Musienko Y., Renker D., Reucroft S., Sakhelashvili T., Swain J. Avalanche photodiodes now and possible developments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – vol. 535. – P. 523–527.

25. Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. – М.: Техносфера, 2007. – 176 с.

26. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа, 1979. – 368 с.

27. Мейер Дж., Эриксон Л. и Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. – М.: Мир. – 1973. – 296 с.

28. Асадчиков В.Е., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А. и др. Коррекция характеристик кремниевых фотодиодов путем применения ионной имплантации // Физика и техника полупроводников. – 2020. – т. 54. – выпуск 6. – С. 557–563.

29. Патент (СССР) № 1072666A1. Манжа Н.М, Кокин В.Н., Чистяков Ю.Д., Патюков С.И. Способ изготовления полупроводниковых приборов с пристеночным p-n-переходами. Заявл.: 02.12.1981; опубл. 27.03.1996.

30. Патент (РФ) № 174468U1, МПК H01L 31/028. Будтолаев А.К., Либерова Г.В. Многоплощадочный кремниевый p-i-n-фоточувствительный элемент. Заявл. 02.11.2016; опубл.: 16.10.2017.

31. Патент (РФ) № 181785U1, МПК H01L 31/028. Либерова Г.В., Хакуашев П.Е. Многоплощадочный кремниевый p-i-n-фотодиод. Заявл.: 19.02.2018; опубл.: 26.07.2018.

32. Миллер Ю. Г. Физические основы надежности интегральных. – М.: Советское радио, 1976. – 320 с.

33. Gorshkov D.V., Sidorov G.Yu., Sabinina I. V. et. al. The effect of the growth temperature on the passivating properties of the Al_2O_3 films formed by atomic layer deposition on the CdHgTe surface // Technical Physics Letters. – 2020. – vol. 46. – P. 741–744.

34. Arnold S.M., Cole B.E. Ion beam sputter deposition of low loss Al_2O_3 films for integrated optics // Thin Solid Films. – 1988. –vol. 165. – P. 1–9.

35. Singh M.P., Shivashankar S.A. Low-pressure MOCVD of Al_2O_3 films using aluminium acetylacetonate as precursor: nucleation and growth // Surface and Coatings Technology. – 2002. – vol. 161. – P. 135–143.

36. Arslambekov V.A., Kazarinova I.D., Gorbunova K.M. Oxidation of Silicon // Russian Chemical Reviews. – 1972. – vol. 41. – № 1. – P. 36–46.

37. Shamala K.S., Murthy L.C.S., Narasimha Rao K. Studies on optical and dielectric properties of Al_2O_3 thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method // Materials Science and Engineering: B. – 2004. – vol. 106. – P. 269–274.

38. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн., кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

39. Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. – СПб.: Специальная литература, 1998. – 232 с.

40. Бродский А.М., Гуревич Ю.Я., Плесков Ю.В., Ротенберг З.А. Современная фотоэлектрохимия. Фотоэмиссионные явления. – М.: Наука, 1974. – 167 с.

41. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.

42. Патент (РФ) № 205303 U1, МПК H01L 31/028. Ким А.С., Колкий А.Н. Многоплощадочный кремниевый p-i-n-фотодиод с двухслойной диэлектрической пленкой. Заявл.: 10.03.2021; опубл.: 08.07.2021.

43. Kim A.S., Serko N.A., Khakuashev P.E., et.al. Application of Al_2O_3 film for stabilization of the charge properties of the SiO_2/*p*-Si interface // Russian Microelectronics. – 2023. – vol. 52. – № 8. – P. 83–841.

44. Гриценко В.А. Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 9. – С. 921–930.

45. Вавилов К., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. – М.: Наука, 1990. – 216 с.

46. Chen L. J. Silicide technology for integrated circuits. – London: Institution of Electrical Engineers, 2004. – 279 p.

47. Gambino J. P., Colgan E. G. Silicides and ohmic contacts // Materials chemistry and physics. – 1998. – vol. 52. – № 2. – P. 99–146.

48. Бурлаков Р.Б. К вопросу об определении удельного контактного сопротивления TLM-методом с прямоугольными контактами к полупроводникам // Вестник Омского университета. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 78–86.

49. Андреев А.Н., Растегаева М.Г., Растегаев В.П., Решанов С.А. К вопросу об учете растекания тока в полупроводнике при определении переходного сопротивления омических контактов // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 7. – С. 832–838.

50. Holland A. S. et al. Circular test structures for determining the specific contact resistance of ohmic contacts // Facta universitatis-series: Electronics and Energetics. – 2017. – vol. 30. – № 3. – P. 313–326.

51. Aldosari H. M. et al. Very low-resistance Mo-based ohmic contacts to GeTe // Journal of Applied Physics. – 2017. – vol. 122. – № 17.

52. Патент (РФ) № 2015630066 Либерова Г.В., Маркова Т.Л., Рыбаков А.В. Кристалл кремниевого ограничительного диода. Заявл.: 16.04.2015; опубл.: 20.07.2015.

53. Andreev A.N., Rastegaeva M.G., Rastegaev V.P., Reshanov S.A. Allowing for current spreading in semiconductors during measurements of the contact resistivity of ohmic contacts // Semiconductors. – 1998. – vol. 32. – № 7. – P. 832–838.

54. Дриц М. Е., Будберг П. Б., Бурханов Г. С., Дриц А. М., Пановко В. М. Свойства элементов. Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.

55. Березин Б. Я., Кац С. А., Кенисарин М. М., Чеховской В. Я. Теплота и температура плавления титана // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12. – № 3. – С. 524–529.

56. Патент (РФ) № 2790272, МПК H01L 21/28, H01L 31/18. Ким А.С., Серко Н.А. Способ формирования омических контактов к кремнию на основе двухслойной системы металлизации Ti/Au. Заявл.: 03.08.2022; опубл.: 15.02.2023.

57. Ким А.С., Переведенцева Н.А., Юрчук С.Ю., Коржов Ф.Д. Быстрый термический отжиг в технологиях изготовления диодных и фотодиодных структур на основе кремния // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2025. – Т. 28. – № 1.

58. Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. – М.: Техносфера, 2007. – 176 с.

59. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: в 2 ч. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 400 с.

60. Патент (РФ) № 173385, МПК B08B 3/17. Белоусов В.С., Звероловлев В.М., Климова О.А. и др. Устройство мегазвуковой очистки полупроводниковых пластин. Заявл.: 27.01.2017; опубл.: 24.08.2017.

61. Маслов А.А. Технология и конструкции полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1970. – 296 с.

62. Патент (РФ) № 2565380, МПК H01L 21/30. Исмаилов Т.А., Шангереева Б.А. и др. Метод обработки поверхности эпитаксиальных кремниевых пластин для формирования активных областей. Заявл.: 31.01.2014; опубл.: 20.10.2015.

63. Красников Г. Я. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. – М.: Микрон-пресс, 1998. – 809 с.

64. Зацепин Д.А. Физические основы технологий микро- и наноэлектроники: учебное пособие. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 236 с.

65. Родионов Ю.А. Технологические процессы в микро- и наноэлектронике. – Вологда: Инфра-инженерия, 2019. – 352 с.

66. Бодров Е.Э. Основы технологии электронной компонентной базы. – Вологда: Инфра-инженерия, 2016. – 179 с.

67. Patent (UK) № 4767721. Liao K.Y., Lee W. Double layer photoresist process for well self-align and ion implantation. – 1986.

68. Патент (СССР) № 668510, МПК H01L 21/311. Глущенко В.Н., Косенко А.Н. Способ вскрытия локальных участков в окисленной поверхности полупроводниковой пластины. Заявл.: 19.05.1977; опубл.: 30.10.1993.

69. Патент (СССР) № 1074327, МПК H01L 21/306. Бакланов М.Р., Свешникова Л.Л., Репинский С.М. и др. Травитель для кремния. Заявл.: 30.12.1981; опубл.: 30.09.1986.

70. Патент (РФ) № 2615596, МПК H01L 21/306. Коссов В.Г., Горохов Л.В., Серушкин К.И. Состав селективного травителя для химических процессов утонения кремниевых пластин. Заявл.: 08.04.2015; опубл.: 27.10.2016.

71. Боровкова А.Ю., Гришина Т.Н., Матюхина Е.С. Прецизионное травление тонких легированных слоев кремния // Прикладная физика. – 2017. – № 2. – С. 47–49.

72. Nagasubramanian G. et al. Semiconductor electrodes: XLII. Evidence for Fermi level pinning from shifts in the flatband potential of p-type silicon in acetonitrile solutions with different redox couples // Journal of The Electrochemical Society. – 1982. – Т. 129. – №. 8. – P. 1742–1745.

73. Патент (РФ) № 2447196, МПК H01L 21/304. Красников Г.Я., Тадевосян С.Г., Ранчин С.О. и др. Способ химико-динамической полировки. Заявл.: 19.04.2010; опубл.: 10.04.2012.

74. Parisi G. I., Haszko S. E., Rozgonyi G. A. Tapered windows in SiO_2: The effect of NH_4F: HF dilution and etching temperature // Journal of the Electrochemical Society. – 1977. – Т. 124. – №. 6. – P. 917–921.

75. Патент (СССР) № 1630564, МПК H01L 21/18. Асессоров В.В., Велигура Г.А. Способ изготовления мощных многоэмиттерных СВЧ-транзисторов с балластными резисторами. Заявл.: 28.09.1988; опубл.: 20.10.1995.

76. Green T.A. Gold etching for microfabrication // Gold Bulletin. – 2014. – vol. 47. – P. 205–216.

77. Gabette L., Segaud R., Fadloun S. et. al. Gold wet etch on 200 nm substrates for MEMS applications // ECS Transactions. – 2009. – vol. 25. – № 5. – P. 337–344.

78. Арсламбеков В.А., Казаринова И.Д., Горбунова К.М. Окисление кремния // Успехи химии. – 1972. – Т. 41. – выпуск 1. – С. 64–83.

79. Патент (РФ) № 2325001, МПК H01L 21/318. Исмаилов Т.А., Шенгереева Б.А., Шахмаева А.Р. Способ получения пленок нитрида кремния (Si_3N_4). Заявл.: 25.07.2005; опубл.: 20.05.2008.

80. Arslambekov V.A., Kazarinova I.D, Gorbunova K.M. Oxidation of Silicon // Russian Chemical Reviews. – 1972. – vol. 41. – № 1. – P. 36–46.

81. Arbabi A., Goddard L.L. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si_3N_4 and SiO_x using microring resonances // Optics letters. – 2013. – vol. 38. – № 19. – P. 3878–3881.

82. Шахмаева А.Р. Технология получения пленок нитрида кремния // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – № 5. – С. 49–53.

83. Патент (СССР) № 1083137, МПК G01R 31/26. Свечников С.В., Шапарь В.Н., Иевский А.В., Афанасьев В.А. Устройство для контроля качества лавинных фотодиодов. Заявл.: 04.03.1982; опубл.: 30.03.1984.

84. ГОСТ 15467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 22 с.

85. ГОСТ 15895–77 Статистические методы управления качеством продукции. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 49 с.

86. Р 50–601–20–91 ВНИИС. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологического процесса. – М.: Госстандарт России, 1991. – 31 с.

87. ГОСТ 27.202–83 Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 53 с.

88. Коуден Д. Статистические методы контроля качества. – М.: Физматгиз, 1961. – 624 с.

89. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. – М.: Мир, 1970. – 368 с.

90. ОСТ 11 14.330–87 об основных технических требованиях электронной гигиены в чистой зоне. – М.: Каталог ОСТ, 1979.

91. ГОСТ 3.1001–81 ЕСТД. Общие положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

92. ГОСТ 3.1102–81 ЕСТД. Стадии разработки и виды документов. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с.

93. ГОСТ 3.1103–82 ЕСТД. Основные надписи. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.

94. ГОСТ 3.1109–82 ЕСТД. Термины и определения основных понятий. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

95. ГОСТ 3.1118–82 ЕСТД. Формы и правила оформления маршрутных карт. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.

96. ГОСТ 3.1119–83 ЕСТД. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на единичные технологические процессы. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

97. ГОСТ 3.1121–84 ЕСТД. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции). – М.: Стандартинформ, 2012. – 48 с.

98. ГОСТ 3.1123–84 ЕСТД. Формы и правила оформления технологических документов, применяемых при нормировании расхода материалов. – М.: Стандартинформ, 2012. – 27 с.

99. ГОСТ 3.1127–93 ЕСТД. Общие правила выполнения текстовых технологических документов. – М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.

100. ГОСТ 3.1129–93 ЕСТД. Общие правила записи технологической информации в технологических документах на технологические процессы и операции. – М.: Стандартинформ, 2020. – 26 с.

101. ГОСТ 3.1201–85 ЕСТД. Система обозначения технологической документации. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 11 с.

102. ГОСТ 3.1404–86 ЕСТД. Формы и правила оформления документов на технологические процессы и операции обработки резанием. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 60 с.

103. ГОСТ 3.1405–86 ЕСТД. Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы термической обработки. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 9 с.

104. ГОСТ 3.1502–85 ЕСТД. Формы и правила оформления документов на технический контроль. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 15 с.

105. ГОСТ 3.1901–74 ЕСТД. Нормативно-техническая информация общего назначения, включаемая в формы технологических документов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 7 с.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

№ п/п	Рисунок, таблица	Наименование	Страница
1	2	3	4
1	Рисунок 1	Зависимости коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок для кремния при 300 К	14
2	Рисунок 2	Область умножения и распределение дырочного и электронного токов вдоль нее	15
3	Рисунок 3	Развитие односторонней лавины	19
4	Рисунок 4	Развитие двусторонней лавины	20
5	Рисунок 5	Распределение концентраций и напряженности электрического поля	21
6	Рисунок 6	Структура ЛФД и различные положения электронов и дырок в i-области в различные моменты времени	24
7	Рисунок 7	Импульсная характеристика	26
8	Рисунок 8	Примеры карты Шухарта	27
9	Рисунок 9	Архитектура фоточувствительного элемента	30
10	Рисунок 10	Топология p-i-n массива ЛФД на основе GaN	30
11	Рисунок 11	Плотность темнового тока p-i-n ЛФД на основе GaN	31
12	Рисунок 12	Архитектура фоточувствительного элемента	33
13	Рисунок 13	Топология p-i-n массива ЛФД на основе $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$	33
14	Рисунок 14	Характеристики в диапазоне температур от 100 °С до минус 20 °С	34
15	Рисунок 15	Вольтаическая зависимость токов утечки при рабочих температурах от 100 °С до минус 20 °С одного ФЧЭ	34
16	Рисунок 16	Эффективность обнаружения фотонов в диапазоне напряжений (0–30) В	35
17	Рисунок 17	Архитектура фоточувствительного элемента	36
18	Рисунок 18	Плотность темновых токов при различных температурах	38
19	Рисунок 19	Основные механизмы темнового тока в диапазоне температур от 55 К до 80 К при напряжении минус 2 В	38
20	Рисунок 20	Топология массива ЛФД S8550-02	40
21	Рисунок 21	Характеристики массива ЛФД S8550-02	40

1	2	3	4
22	Рисунок 22	Топология массива ЛФД SAH1L12	41
23	Рисунок 23	Характеристики массива ЛФД SAH1L12	42
24	Рисунок 24	Линейка ЛФД на основе эпитаксиального кремния	48
25	Рисунок 25	Схема однозонной диффузионной печи СДОМ-3/100	51
26	Рисунок 26	Схема установки Leybold Heraeus Z-400	52
27	Рисунок 27	Нормированные высокочастотные CV-характеристики образцов № 1–5	52
28	Рисунок 28	Нормированные высокочастотные CV-характеристики образцов № 6–10	53
29	Рисунок 29	Топология многоэлементного p-i-n фотодиода	55
30	Рисунок 30	Вертикальная архитектура многоэлементного p-i-n фотодиода	56
31	Рисунок 31	Топология образца для LTLM-метода	60
32	Рисунок 32	Топология ограничительного диода p^+-n	61
33	Рисунок 33	Вертикальная архитектура ограничительного диода p^+-n	61
34	Рисунок 34	Типичный вид ВАХ образцов	63
35	Рисунок 35	Типичный вид прямой ветви ВАХ ограничительного диода	64
36	Рисунок 36	Эскиз технологического маршрута изготовления	69
37	Рисунок 37	Эскиз технологического маршрута изготовления с пассивацией Al_2O_3	70
38	Рисунок 38	Химическая обработка пластин в аммиачно-перекисном растворе	75
39	Рисунок 39	ОК Химическая обработка пластин в аммиачно-перекисном растворе	76
40	Рисунок 40	ОК Обработка пластин в деионизованной воде	77
41	Рисунок 41	ОК Сушка пластин на центрифуге	77
42	Рисунок 42	ОК Обработка пластин в серной кислот	78
43	Рисунок 43	Эскизы фотошаблонов для формирования фоточувствительной структуры	80
44	Рисунок 44	Эскизы фотошаблонов для формирования контактов	81
45	Рисунок 45	Оборудование для фотолитографии	84
46	Рисунок 46	Дефекты маски фоторезиста	87
47	Рисунок 47	ОК Нанесение фоторезиста	89

1	2	3	4
48	Рисунок 48	ОК Термообработка фоторезиста	90
49	Рисунок 49	ОК Совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А (1)	91
50	Рисунок 50	ОК Совмещение и экспонирование на установке ЭМ-576А (2)	92
51	Рисунок 51	ОК Проявление фоторезиста	93
52	Рисунок 52	ОК Удаление фоторезиста в аммиачно-перекисном растворе	94
53	Рисунок 53	ОК Удаление фоторезиста в органических растворителях	95
54	Рисунок 54	Схема установки для химико-динамического полирования пластины	97
55	Рисунок 55	ОК Защита лицевой стороны пластины ХВ-784	99
56	Рисунок 56	ОК Удаление сэндвич-слоя с обратной стороны пластины (1)	100
57	Рисунок 57	ОК Удаление сэндвич-слоя с обратной стороны пластины (2)	101
58	Рисунок 58	ОК Удаление пленки лака ХВ-784	101
59	Рисунок 59	Жидкостное травление диоксида кремния через маску фоторезиста	102
60	Рисунок 60	ОК Жидкостное травление пленки диоксида кремния через маску фоторезиста	103
61	Рисунок 61	ОК Жидкостное травление пленки диоксида кремния с обратной стороны пластины	104
62	Рисунок 62	Жидкостное травление металлизации Cr/Au через маску фоторезиста	105
63	Рисунок 63	ОК Травление пленок золота и хрома (1)	106
64	Рисунок 64	ОК Травление пленок золота и хрома (2)	107
65	Рисунок 65	Распределение концентраций в пластине	112
66	Рисунок 66	Общий вид ионно-лучевой установки	113
67	Рисунок 67	Схема измерения четырехзондовым методом	117
68	Рисунок 68	Функциональная схема эллипсометра ЛЭФ-3М-1	118
69	Рисунок 69	ОК Контроль пластин после проявления	119
70	Рисунок 70	ОК Контроль маски фоторезиста	120
71	Рисунок 71	ОК Контроль пластин после травления	121
72	Рисунок 72	ОК Контроль пластин после удаления фоторезиста	122
73	Рисунок 73	Контактный профилометр Bruker Dektak 3030	123

1	2	3	4
74	Рисунок 74	Функциональная схема установки для контроля коэффициента взаимосвязи k	123
75	Рисунок 75	Функциональная схема установки для характеризации параметров фоточувствительных элементов	124
76	Рисунок 76	Функциональная схема установки для определения токовой монохроматической чувствительности	125
77	Рисунок 77	ОК Контроль токовой монохроматической чувствительности (1)	126
78	Рисунок 78	ОК Контроль токовой монохроматической чувствительности (2)	127
79	Рисунок 79	Измерительная система Karl Suss PM-5	127
80	Рисунок 80	ОК Контроль темновых токов	130
81	Рисунок 81	ОК Контроль внешнего вида кристаллов	130
82	Рисунок 82	Коэффициент умножения M	131
83	Рисунок 83	Партия фоточувствительных кристаллов № 6	133
84	Рисунок 84	«Сшивки» изображений линейки ЛФД	134
85	Рисунок 85	ОК Окисление термическое (1)	137
86	Рисунок 86	ОК Окисление термическое (2)	138
87	Рисунок 87	ОК Окисление термическое (3)	139
88	Рисунок 88	ОК Отжиг в азоте (1)	139
89	Рисунок 89	ОК Отжиг в азоте (2)	140
90	Рисунок 90	ОК Отжиг в азоте (3)	141
91	Рисунок 91	ОК Отжиг в кислороде (1)	141
92	Рисунок 92	ОК Отжиг в кислороде (2)	142
93	Рисунок 93	ОК Отжиг в кислороде (3)	143
94	Рисунок 94	Примеры типовых контрольных карт Шухарта	148
95	Рисунок 95	Контрольные карты Шухарта для фотолитографии	151
96	Рисунок 96	Контрольные карты Шухарта для жидкостного травления	152
97	Рисунок 97	Контрольные карты Шухарта для термических процессов	154
98	Рисунок 98	Контрольные карты Шухарта для напыления металлизации	156
99	Таблица 1	Параметры моделирования	36
100	Таблица 2	Электрооптические характеристики	40
101	Таблица 3	Электрооптические характеристики	41

1	2	3	4
102	Таблица 4	Образцы	50
103	Таблица 5	Электрофизические параметры диэлектрических пленок	54
104	Таблица 6	Типовые значения	57
105	Таблица 7	Расстояния между контактными площадками	60
106	Таблица 8	Типовые значения	66
107	Таблица 9	Характеристики фоторезиста марки ФП-9120-1	81
108	Таблица 10	Характеристики фоторезиста марки ФП-3520	82
109	Таблица 11	Параметры режимов фотолитографии с применением фоторезиста марки ФП-9120-1	84
110	Таблица 12	Параметры режимов фотолитографии с применением фоторезиста марки ФП-3520	85
111	Таблица 13	Определение угла наклона	98
112	Таблица 14	Термическое осаждение пленки Si_3N_4 из газовой смеси	109
113	Таблица 15	Термическое окисление в O_2	110
114	Таблица 16	Разгонка примеси бора в N_2	110
115	Таблица 17	Разгонка примеси бора в сухом и влажном O_2	111
116	Таблица 18	Требования к параметрам процесса	113
117	Таблица 19	Режимы ионной имплантации	114
118	Таблица 20	Типовые электрофизические характеристики фоточувствительных кристаллов из партий № 1–5	132
119	Таблица 21	Типовые электрофизические характеристики фоточувствительных кристаллов из партий № 7–11	135
120	Таблица 22	Типовые электрофизические характеристики фоточувствительных кристаллов из партий № 12–16	135
121	Таблица 23	Результаты контроля для технологических процессов фотолитографии	150
122	Таблица 24	Статистическая оценка технологического процессов фотолитографии	151
123	Таблица 25	Результаты контроля для технологических процессов жидкостного травления	152
124	Таблица 26	Статистическая оценка технологических процессов жидкостного травления	153

1	2	3	4
125	Таблица 27	Результаты контроля для термических технологических процессов	153
126	Таблица 28	Статистическая оценка термических технологических процессов	154
127	Таблица 29	Результаты контроля для технологических процессов напыления металлизации	155
128	Таблица 30	Статистическая оценка технологических процессов напыления металлизации	157
129	Таблица 31	Сведения об оборудовании, технологической оснастке и материалах	160

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Акт внедрения

Защита от шума и вибрации

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»

127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, помещение 3/1/3
www.dsystems.su, e-mail: ds@dsystems.su
тел.: +7(495)-419-32-44
ОГРН 1177746689251 ИНН 7713444474

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Динамические Системы»
_____ К.С. Фисенко
«22» _____ 2025 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ким Александры Сергеевны на тему: «Разработка технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов на основе эпитаксиальной структуры p/p^+-Si»

Комиссия в составе Смолякова М.Ю., Смирнова В.А., Малова Д.Д. и Гарбер Е.В. настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы на тему «Разработка технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов на основе эпитаксиальной структуры p/p^+-Si», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности ООО «Динамические системы» в виде технических предложений по проведению низкотемпературных отжигов в инертной среде и осуществлению пооперационного технологического контроля при изготовлении приборов электронной техники в рамках разработок, проводимых за счет собственных средств организации.

Использование данных результатов позволило повысить качество проектирования приборов электронной техники, а также сократить трудозатраты на проведение работ.

Руководитель отдела изысканий _____ (подпись) Смоляков М.Ю.

Руководитель проектно-конструкторского бюро _____ (подпись) Смирнов В.А.

Ведущий технический специалист _____ (подпись) Малов Д.Д.

Младший инженер-исследователь _____ (подпись) Гарбер Е.В.