

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

Ким Александра Сергеевна

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

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 сцинтилляционных детекторов в рентгеновских сканерах, что в не меньшей степени обуславливает значимость и высокий спрос на данный тип твердотельных фотопреобразователей.

Несмотря на существование основных принципов выстраивания производственных линий для изготовления многих типов твердотельных фотопреобразователей разработка новых технологий, обладающих высоким потенциалом ввода в серийное производство, по-прежнему актуальна. С одной стороны, в полупроводниковой промышленности фотоэлектронных устройств существует множество известных методов и технологических процессов и операций, но применяемое оборудование, его технологические ограничения и используемые материалы оказывают значительно влияние на конечный выход годных. В то же время стандартные технологии изготовления типовых полупроводниковых приборов на практике не претерпевают значительных изменений. Это зачастую связано с возникающей сопутствующей необходимостью в изменении несущих конструкций, дооснащении дорогостоящим оборудованием и расширением площадей для его размещения за счет создания новых цехов и участков, а также с необходимостью проведения трудоемкой технологической подготовки серийного производства при сохранении действующих мощностей по выпуску других серийных изделий. Тем не менее, высокий спрос на конкретные фотоприемные устройства определяет

потребность в проведении комплексных исследовательских и практических работ, нацеленных на поиск новых технологических приемов, устойчивых в условиях серийного выпуска и потенциально пригодных и эффективных для типовых производств определенного класса приборов.

Целью исследования является разработка технологии изготовления кристалла линейки лавинных фотодиодов для длины волны 0,85 мкм на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости, жизнеспособной и устойчивой 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 новых технологических решений и изучить влияние их внедрения в технологию изготовления;
4. определить способ пассивации изолирующей пленки SiO₂ 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, разработать технологический процесс и установить режим проведения;
5. определить способ снижения уровня темновых токов фоточувствительных элементов на основе кремния *p*-типа проводимости, разработать технологический процесс и установить режим проведения;
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. Разработана новая топология линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами с фронтальной засветкой излучением с длиной волны 0,85 мкм.

2. Разработана новая планарная технология изготовления линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами с фронтальной засветкой излучением с длиной волны 0,85 мкм на основе эпитаксиального кремния p -типа проводимости, отличающаяся совмещением диффузии имплантированных примесей и формирования диэлектрических слоев в одном термическом процессе и проведением низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 .

3. Впервые показано, что применение процесса низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре 450 °С в течение 5 с в технологии изготовления фотодиодов на основе кремния p -типа проводимости позволяет снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов.

4. Впервые показано, что формирование дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3 методом ВЧ-катодного распыления в среде Ag при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности ВЧ-разряда 300 Вт в фотодиодах на основе высокоомного кремния p -типа проводимости позволяет стабилизировать зарядовые состояния на границе раздела $SiO_2/p-Si$, а именно снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов и повысить сопротивление изоляции планарно расположенных фоточувствительных площадок в многоэлементных структурах.

5. Впервые показано, что применение процесса низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре 340 °С в течение 20 с в технологии изготовления кремниевых диодов позволяет снизить их последовательное сопротивление.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана новая топология линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния p -типа проводимости с фронтальной засветкой излучением с длиной 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.

2. Разработана новая планарная технология изготовления линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния p -типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм, позволяющая получить устойчивую 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.

3. 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.

4. 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.

5. В фотодиодных структурах на основе высокоомного кремния p -типа проводимости зачастую наблюдается образование инверсного канала, электрически связывающего планарно расположенные фоточувствительные элементы. Разработанный и настроенный процесс получения пленки Al_2O_3 методом ВЧ-катодного распыления в среде Ag при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности ВЧ-разряда 300 Вт в качестве пассивирующей изолирующей пленки позволяет стабилизировать зарядовые состояния границы на границе 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.

6. 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 $0,002 \text{ мм}^2$, определены оптимальные температура и длительность процесса и показано повышение выхода годных кристаллов на 15 % за счет улучшения последовательного сопротивления изготовленных диодов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложена планарная технология изготовления линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния p -типа проводимости с фронтальной засветкой излучением с длиной волны 0,85 мкм, отличающаяся совмещением

диффузии имплантированных примесей и формирования диэлектрических слоев в одном термическом процессе и проведением низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 .

2. Предложен способ снижения уровня темновых токов для многоэлементных фотодиодных структур на основе p -Si посредством низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре $450\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 с, демонстрирующий высокую технологическую применимость по сравнению с традиционными длительными термическими обработками.

3. Предложен способ снижения уровня темновых токов фоточувствительных элементов и повышения сопротивления изоляции планарно расположенных фоточувствительных площадок для многоэлементных структур посредством формирования дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3 методом ВЧ-катодного распыления в среде Ar при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности разряда 300 Вт, обладающий высокой эффективностью по сравнению с распространенным технологическим приемом создания высоколегированных стоп-областей.

4. Предложен способ формирования омических контактов с малым удельным сопротивлением на основе двухслойных металлизаций Ti/Au и Cr/Au к кремнию посредством низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 при температуре $340\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 с.

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 характеристики 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 зарубежных научных изданиях, представлением результатов на конференциях и наличием акта об использовании результатов 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 опубликованы 2 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, 2 тезиса докладов 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 188 страницах и содержит 98 рисунков, 31 таблиц, 43 формулы и 1 приложение. Список используемой литературы включает 106 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены цель и задачи темы исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сформулирована степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе приведен аналитический обзор литературы, содержащий сведения о физических принципах работы и основных электрофизических параметрах лавинного фотодиода, а также изучены механизм возникновения ударной ионизации носителей заряда в полупроводнике и предельные случаи развития односторонней и двусторонней лавин, инициируемых одним или обоими типами носителей заряда. К тому же, рассмотрен ряд типовых топологий фоточувствительных структур, выполненных в виде барьера Шоттки, меза-структуры, структуры с охранным элементом и структуры, освещаемой оптическим излучением с боковой стороны. Отдельное внимание в разделе уделяется фоточувствительным структурам с отдельными областями поглощения и умножения, микроплазменному явлению в них и технологическим сложностям, возникающим при выстраивании производственного цикла их изготовления. Кроме того, в данном разделе рассмотрены вертикальные архитектуры, топологии и технологии изготовления некоторых известных массивов лавинных фотодиодов, созданных на полупроводниковых материалах, таких как GaN, $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$, $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$ и Si для различных областей применения.

Проведенный анализ литературных данных позволил определить цель и основные задачи диссертационной работы, задающих последовательность технологических работ, направленных на разработку новой технологии изготовления фоточувствительного кристалла на имеющейся производственной линии.

Во втором разделе подробно описаны технологические особенности, значительно влияющие на процент выхода годных фоточувствительных кристаллов, и изложены некоторые требования, выполнение которых необходимо для дальнейшего введения разрабатываемой технологии в устойчивое серийное производство. Вследствие этого была выбрана фронтальная засветка фоточувствительной структуры, не требующая утонения полупроводниковой подложки посредством химико-механического полирования, локального вытравливания слоя полупроводника или проведения технологически трудоемкого процесса фотолитографии с двусторонним совмещением топологических рисунков на обеих сторонах пластины. При этом каждый из приведенных способов утонения подложки значительно повышает сложность последующих технологических процессов и операций и заведомо снижает процент выхода годных кристаллов. Помимо этого определен материал подложки разрабатываемой структуры, а

именно пластина эпитаксиального кремния p/p^+ типа диаметром 76 мм марки 50КДБ/380КДБ0,01(100) производства АО «ЭПИЭЛ», величина удельного сопротивления эпитаксиального слоя которого более 1 кОм·см. Данный выбор обусловлен широкой номенклатурой кремниевых приборов, изготавливаемых на имеющейся 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.

Также приведены методы и особенности формирования различных высоколегированных областей в полупроводниковой пластине, диэлектрических и металлических контактных слоев, с учетом технической и технологической базы производственной линии.

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 пленкой 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.

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. 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 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.

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. 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 . Следовательно, 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.

На основе сформулированных сведений были определены методы получения основных слоев фоточувствительной структуры и определены вертикальная архитектура и топология линейки лавинных фотодиодов в двух вариациях, различаемых наличием дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3 . Таким образом архитектура структуры включает полупроводниковую пластину эпитаксиального кремния p/p^+ -типа проводимости в качестве подложки, легированные карман и стоп-области p -типа проводимости, легированная область n^+ -типа проводимости. В качестве пассивирующей, изолирующей и просветляющей пленок применяются диэлектрические пленки диоксида и нитрида кремния, при этом формирование пленки Si_3N_4 предполагается только во второй вариации фоточувствительной структуры. Металлические слои к фоточувствительным площадкам и тыльному контактному слою наносятся в виде двухслойной композиции хром-золото. Топология фоточувствительного кристалла содержит 12 планарно расположенных фоточувствительных элементов размером 0,12 мм². Схематичное отображение полученных архитектуры и топологии представлено на рисунке 1.

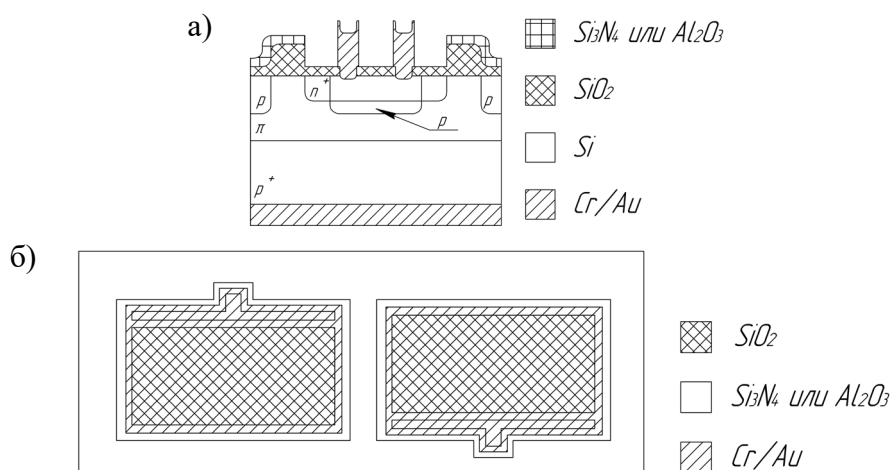


Рисунок 1 – Линейка ЛФД на основе эпитаксиального кремния:

а – вертикальная архитектура; б – топология.

Помимо этого, в данном разделе проведен поиск технологических решений, направленных на потенциальное улучшение электрофизических параметров фоточувствительного кристалла, и исследовано влияние их внедрения в стандартный цикл изготовления посредством апробации на серийно выпускаемых приборах, характеризующихся устойчивыми производственными коэффициентами. В рамках проведенного поиска изучались способы как снижения темновых токов, так и дополнительной изоляции элементов фотодиодных структур на основе высокоомного кремния. Последнее является одной из часто встречающихся в изготовлении многоэлементных структур особенностей, для которых взаимосвязь соседних фоточувствительных элементов и утеkanie токов по периферии кристалла имеют высокую вероятность. 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. Также предотвращение взаимосвязи фоточувствительных элементов в объеме структуры и утекания токов по периферии кристалла достигается за счет формирования высоколегированных стоп-областей или планарных охранных элементов, располагаемых на периферии кристалла или между ФЧЭ и ограничивающих распространение электрического поля в рабочем режиме. Однако применение упомянутых технологических приемов не всегда достаточно. По этой причине, несмотря на заданные стоп-области в фоточувствительной структуре, необходим поиск альтернативных мер по предотвращению электрической взаимосвязи рядом расположенных фоточувствительных элементов.

В результате было выявлено, а затем подтверждено на примере серийно выпускаемого многоплощадочного *p-i-n* фотодиода на основе высокоомного кремния *p*-типа проводимости, положительное влияние низкотемпературного импульсного термического отжига в среде H_2 на уровень темновых токов фотодиодных структур вследствие насыщения оборванных Si-связей водородом. Сравнение типовых показателей кристаллов показало снижение нижней границы диапазона темновых токов внешних фоточувствительных площадок в 1,5 раза, внутренних фоточувствительных площадок – в 1,6 раза в сравнении с аналогичными параметрами изготовленных по стандартной технологии фотодиодов, а повышение процента выхода годных кристаллов составляло 15 %, из чего следует практическая применимость процесса в технологиях изготовления фотодиодных структур.

Помимо этого, было выдвинуто предположение о благотворном влиянии низкотемпературного импульсного термического отжига на свойства омического контакта диодов на основе кремния, для чего сначала были изготовлены и изучены тестовые LTLM-образцы с линейной геометрией контактов к полупроводнику, что позволило определить

оптимальные температуру и длительность процесса, а именно 340 °С в течение 20 с. В данном операционном режиме величина удельного контактного сопротивления достигает своего минимума – $7 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². На практике данное влияние подтверждалось на примере серийно выпускаемого ограничительного диода $p^+ - n$ с малой площадью контакта к области p^+ -типа проводимости, равной 0,002 мм². Сравнение типовых показателей диодов показало достижение величины последовательного сопротивления в диапазоне (1,2–1,3) кОм, что полностью соответствует выдвигаемому к нему требованию, и повышение процента выхода годных диодов на 15 %, из чего можно сделать вывод о применимости процесса в технологиях изготовления диодных структур.

Также изучены свойства пленки Al₂O₃, полученной методом высокочастотного катодного (ВЧ) распыления мишени в среде аргона при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности ВЧ-разряда 300 Вт, и ее потенциал для стабилизации зарядовых состояний на границе раздела SiO₂/ p -Si, а именно предотвращения образования инверсного канала в приповерхностной области эпитаксиальной подложки. Зачастую в фоточувствительных структурах на основе высокоомного кремния p -типа проводимости с пленками SiO₂, обладающих встроенным положительным зарядом, в качестве изолирующих и просветляющих покрытий наблюдается возникновение электрической взаимосвязи между планарно расположенными фоточувствительными элементами, что является следствием образования канала инверсионного типа проводимости. Распространенным технологическим приемом для решения данной проблемы является создание стоп-областей высокой концентрации, ограничивающих распространение электрического поля и таким образом уменьшающих коэффициент взаимосвязи отдельных элементов структуры, однако не во всех случаях этого достаточно. Были изготовлены и исследованы электрофизические параметры образцов с однослойными и двухслойными диэлектрическими пленками SiO₂, Al₂O₃ и их композициями на низкоомной и высокоомной подложках кремния. Результаты показали образование инверсионного канала в приповерхностной области образца, изготовленного на низкоомной подложке с толщиной пленки SiO₂, равной 0,36 мкм, при этом дополнительное формирование пленки Al₂O₃ толщиной 0,14 мкм позволяет скомпенсировать положительный заряд в пленке SiO₂. Одновременно с этим, на образцах, изготовленных на высокоомной подложке с пленкой SiO₂, образование канала инверсионного типа проводимости наблюдалось уже при толщине диэлектрика, равной 0,10 мкм. При этом пассивация поверхностей SiO₂, имеющих толщину как 0,10 мкм, так и 0,36 мкм, пленкой Al₂O₃ толщиной 0,14 мкм также приводила к стабилизации границы раздела SiO₂/ p -Si. Апробация полученных результатов на примере серийно выпускаемого многоплощадочного $p - i - n$ фотодиода на основе высокоомного кремния p -типа проводимости и сравнение его типовых параметров показали снижение нижней границы темновых токов внешних и внутренних фоточувствительных площадок в 2 раза и 2,6

раз, соответственно, улучшение темнового тока охранного кольца в 3,5 раза и увеличение сопротивления изоляции между фоточувствительными элементами до (110–130) МОм, а также повышение процента выхода годных кристаллов на 18 %, чем подтверждается применимость данного технологического приема в технологиях изготовления многоэлементных фотодиодных структур.

Введение новых технологических приемов в стандартную технологию изготовления лавинных фотодиодов, а именно совмещение диффузии имплантированных примесей и формирования диэлектрических слоев в одном термическом процессе, низкотемпературный импульсный отжиг в среде H_2 и дополнительная пассивация просветляющего покрытия пленкой Al_2O_3 , позволяет потенциально повысить применимость разрабатываемой технологии изготовления для серийного производства.

Третий раздел посвящен составлению эскизного технологического маршрута изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД и определению операционных режимов проведения технологических процессов и операций, входящих в него. Поскольку во втором разделе были выбраны две вариации вертикальной архитектуры и топологии кристалла, различаемые наличием дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3 , преимущества которой исследовались в том же разделе, было решено сформировать два маршрута изготовления, а выбор оптимального из них определить по электрофизическим параметрам изготовленных партий фоточувствительной структуры. Схематичные отображения обоих технологических маршрутов приведены на рисунках 2 и 3.

В соответствии с рисунками 2 и 3 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

з – создание контактов к ФЧЭ и тыльному контактному слою; и – расшифровка слоев.

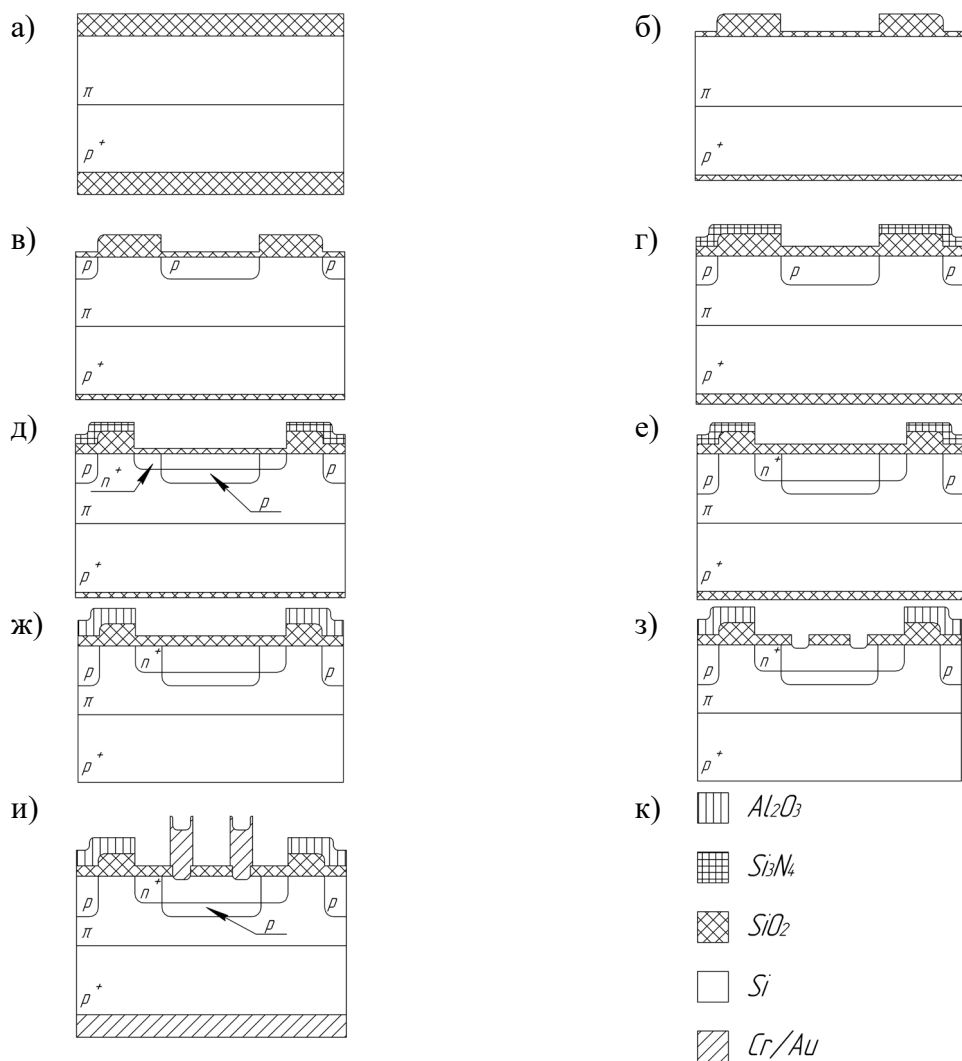


Рисунок 3 – Эскиз технологического маршрута изготовления с пассивацией Al_2O_3 :

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.

Завершается цикл 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.

Кроме того, в третьем разделе приведены технологические работы, связанные с определением операционных режимов ряда технологических процессов и операций, условно разделяемые на следующие группы: химическая обработка, фотолитография, жидкостное травление, термические процессы, ионная имплантация, напыление металлизации и пооперационный технологический контроль. Результатом проведенных изысканий являются задание параметров режимов основных технологических процессов и операций, опробованных посредством проведения на достаточном количестве как подложек монокристаллического кремния, так и многослойных структур, что позволило убедиться в достоверности подобранных режимов. Режимы процессов ионной имплантации примесей и термических процессов были определены ориентировочно, требовали уточнения уже по результатам исследования изготовленных партий фоточувствительных кристаллов и соответствовали следующим: ионная имплантация с энергией ускоренных ионов 100 кэВ и дозой облучения $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для примеси бора и 100 кэВ и $5,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для примеси фосфора, времена разгонок примесей 7,7 ч и 2,0 ч, соответственно. Также на этом этапе был разработан и изготовлен комплект светлопольных фотошаблонов, эскизы которых на примере одного фоточувствительного кристалла представлены на рисунках 4 и 5.

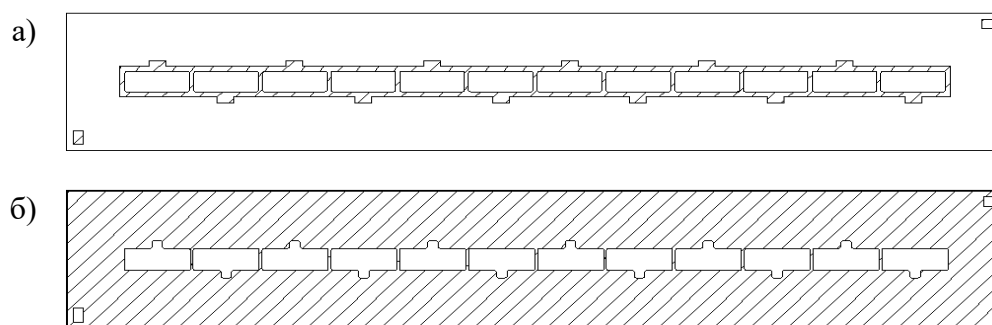


Рисунок 4 – Эскизы фотошаблонов на примере одного фоточувствительного кристалла (1):

а – формирование кармана и стоп-областей p -типа проводимости (фотошаблон № 01);

б – создание активной области n^+ -типа проводимости (фотошаблон № 02).

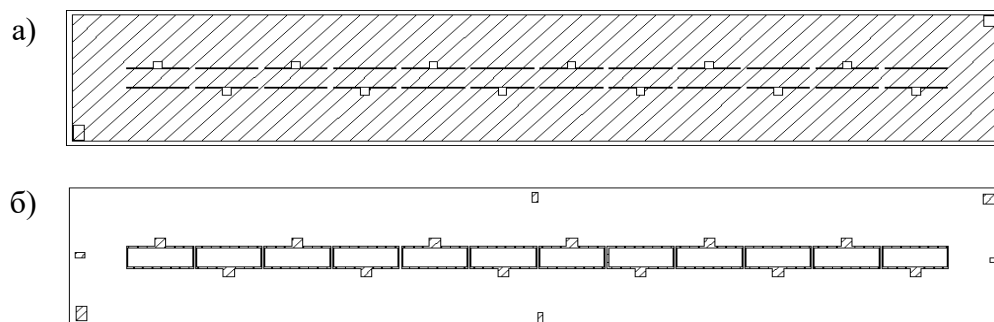
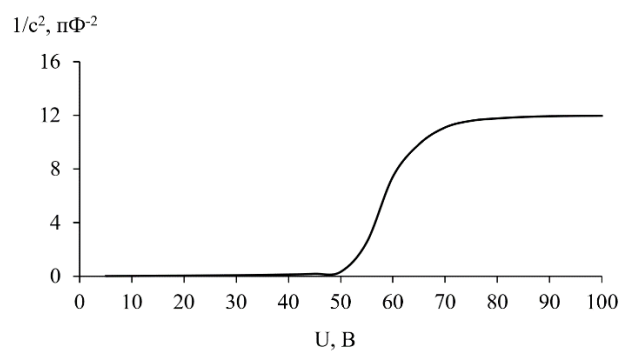


Рисунок 5 – Эскизы фотошаблонов на примере одного фоточувствительного кристалла (2):

а – вскрытие контактных окон (фотошаблон № 03);

б – создание контактных площадок (фотошаблон № 04).

Для уточнения режимов проведения процессов ионной имплантации примесей и термических процессов было изготовлено 5 партий фоточувствительных кристаллов линейки лавинных фотодиодов. Изготовленные партии подвергались исследованию некоторых фотоэлектрических параметров, наиболее важных для определения факта получения требуемой структуры n^+p-i-p^+ , а именно зависимости коэффициента умножения и $1/c^2$ от напряжения. Полученные зависимости показали, что ранее установленные режимы разгонки имплантированных примесей позволяют получить n^+p структуру и необходимо увеличение длительности разгонки примеси фосфора. Требуемая фоточувствительная структура была получена на партии № 6 при разгонке фосфора в течение 4 ч 40 мин.



На рисунках

Рисунок 6 и 7 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.

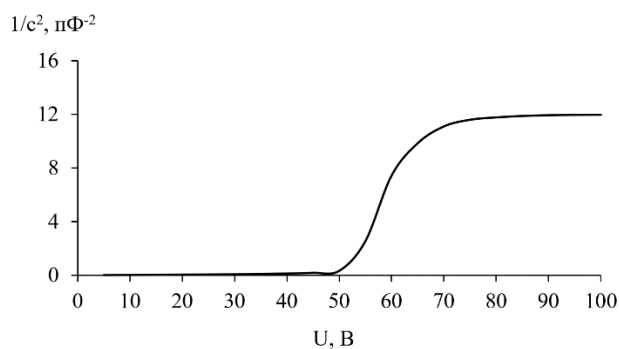


Рисунок 6 – Емкостная характеристика для партии фоточувствительных кристаллов № 6

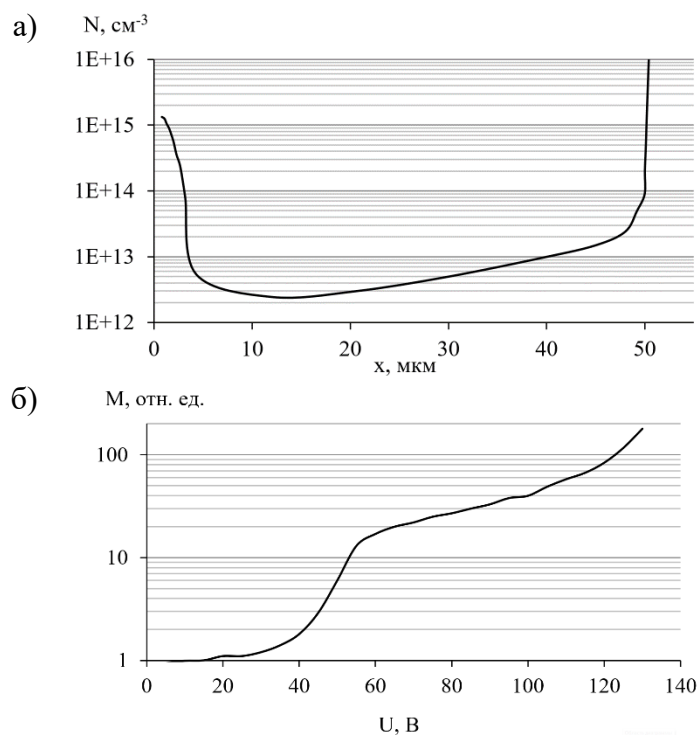


Рисунок 7 – Партия фоточувствительных кристаллов № 6:

а – распределение концентрации в эпитаксиальном слое;

б – коэффициент умножения M .

Анализ полученных зависимостей показывает, что 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 режимов термических процессов можно считать установленными.

Поскольку в разделе 2 был произведен поиск технологических решений для снижения темновых токов и дополнительной электрической изоляции фоточувствительных элементов структуры, который определил возможность применения пленки Al_2O_3 для компенсации

встроенного положительного заряда в пленках SiO_2 , необходимо исследовать и сравнить фотоэлектрические параметры кристаллов, изготовленных по обоим эскизным маршрутам изготовления. Для этого были изготовлены партии фоточувствительных кристаллов: партии № 7–11, изготовленные в отсутствие пассивирующей пленки Al_2O_3 , и партии № 12–16, изготовленные с дополнительной пассивирующей пленкой Al_2O_3 . В таблицах 1 и 2 приведены типовые значения электрофизических параметров. Представленные электрофизические характеристики включают: напряжение прокола области поглощения, $U_{\text{прокол}}$; напряжение, при котором достигается коэффициент умножения, равный 100, $U_{\text{при } M=100}$; максимальный коэффициент умножения до возникновения микроплазмы, $M_{\text{макс}}$; напряжение, при котором достигается максимальный коэффициент умножения, $U_{\text{макс}}$; уровень темнового тока отдельных фоточувствительных элементов по достижению коэффициента умножения M , равного 100, на длине волны 0,85 мкм I_T ; сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$.

Таблица 1 – 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	$U_{\text{прокол}}$, В	52	50	50	51	50
2	$U_{\text{при } M=100}$, В	145	130	142	140	132
3	$M_{\text{макс}}$, отн. ед.	195,0	180,8	190,0	193,0	188,8
4	$U_{\text{макс}}$, 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 2 – 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	$U_{\text{прокол}}$, В	50	50	53	51	50
2	$U_{\text{при } M=100}$, В	150	155	158	143	170

3	$M_{\text{макс}}$, отн. ед.	190,0	190,5	192,0	189,4	194,1
4	$U_{\text{макс}}$, В	190	198	187	175	189
5	I_T , нА	(5–9)	(6–9)	(5–8)	(7–13)	(6–8)
6	Процент выхода годных, %	11,8	12,5	12,9	10,8	15,6

Оказалось, что применение пассивирующей пленки оксида алюминия не привело к значительным улучшениям диапазона темнового тока отдельных фоточувствительных элементов линейки ЛФД или повышению процента выхода годных в целом. В связи с этим, в данном случае необходимость во введении дополнительных технологических процессов формирования диэлектрической пленки Al_2O_3 для стабилизации зарядовых состояний на границе раздела изолирующей пленки SiO_2 и слоя кремния отсутствует.

Таким образом определен маршрут изготовления фоточувствительного кристалла линейки ЛФД, соответствующий рисунку 2 и 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. термическое 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 N_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 монохроматической 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 монохроматической чувствительности на отдельных кристаллах;
47. контроль темновых токов на отдельных кристаллах.

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. Различают три группы нормативов дефектов: незначительный дефект, значительный дефект и критический дефект. К группе незначительных дефектов относят малые отклонения в габаритных размерах, не имеющие негативное влияние на безопасность или надежность производимой продукции. Нарушение требований группы значительных дефектов потенциально может привести к ухудшению надежности работы и внешнего вида производимой продукции. Несоответствие требованиям группы критический дефект в свою очередь может привести к небезопасности работы производимой продукции.

Анализ и классификация параметров продукции определяет следующие границы для упомянутых групп нормативов дефектов:

- группе незначительных дефектов допускается включать не более (60–85) % от общего числа параметров продукции. Такие дефекты относятся к третьей группе нормативов;
- группе значительных дефектов допускается включать не более (15–25) % от общего числа параметров продукции. Такие дефекты относятся ко второй группе нормативов;
- группе критических дефектов допускается включать не более 5 % от общего числа параметров продукции. Такие дефекты относятся к первой группе нормативов.

Статистическая оценка точности и настроенности в основном применяется для групп нормативов дефектов, относящихся к незначительным и значительным дефектам, а именно для первой и ко второй групп. 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. Контрольные карты Шухарта используются для управления производственным процессом и оценки его возможностей статистическим подходом, за счет чего широко распространены на предприятиях, выпускающих различную продукцию.

Фотолитография применяется 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 выбранных фоторезистов марок ФП-9120-1 и ФП-3520 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. На рисунке 8 приведен внешний вид контрольных карт, построенных для каждой марки фоторезиста, а в таблице 3 – рассчитанные параметры статистической оценки.

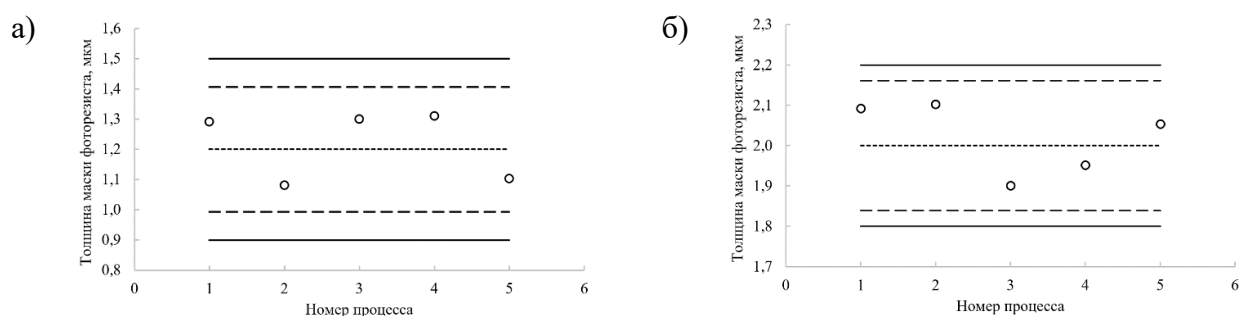


Рисунок 8 – Контрольные карты Шухарта для фотолитографии:

а – фотолитография с использованием фоторезиста марки ФП-9120-1;

б – фотолитография с использованием фоторезиста марки ФП-3520.

Таблица 3 – Статистическая оценка технологического процессов фотолитографии

№ п/п	Параметр	Значение, мкм	
		ФП-9120-1	ФП-3520
1	2	3	4
1	Центр рассеяния \bar{X}	1,218	2,020
2	Среднеквадратичное отклонение S	0,115	0,089
3	Поле рассеяния ω	0,689	0,537
4	Коэффициент точности K_T	5,225	4,469
5	Коэффициент настроенности K_H	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.

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. 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. На рисунке 9 приведен внешний вид контрольных карт, а в таблице 4 – рассчитанные параметры их статистической оценки.

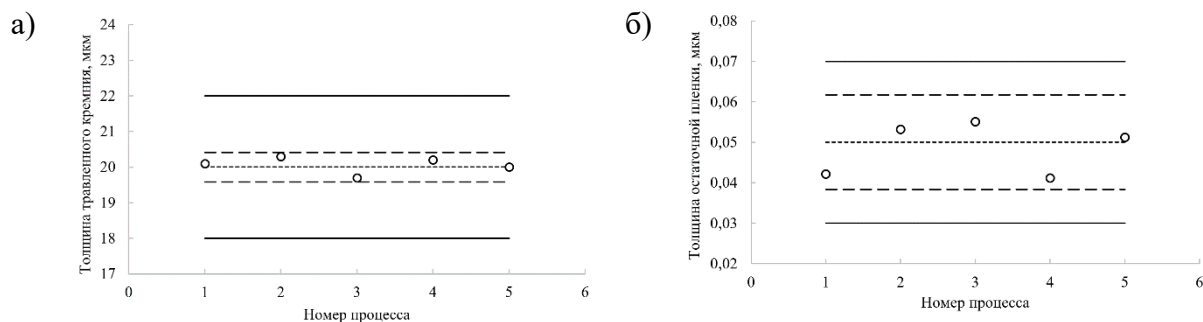


Рисунок 9 – Контрольные карты Шухарта для жидкостного травления:

а – удаление сэндвич-слоя; б – травления SiO_2 .

Таблица 4 – Статистическая оценка технологических процессов жидкостного травления

№ п/п	Параметр	Значение	
		травление Si	травление SiO_2
1	2	3	4
1	Центр рассеяния \bar{X}	20,060	0,049
2	Среднеквадратичное отклонение S	0,230	0,006
3	Поле рассеяния ω	1,381	0,039
4	Коэффициент точности K_T	17,375	6,160
5	Коэффициент настроенности K_H	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.

Далее была проведена статистическая оценка возможностей следующих термических 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. На рисунке 10 приведен вид контрольных карта, а в таблице 5 – рассчитанные параметры статистической оценки.

Контроль толщин выращенных диэлектрических пленок проводился на оптическом профилометре ЛЭФ-3М-1.

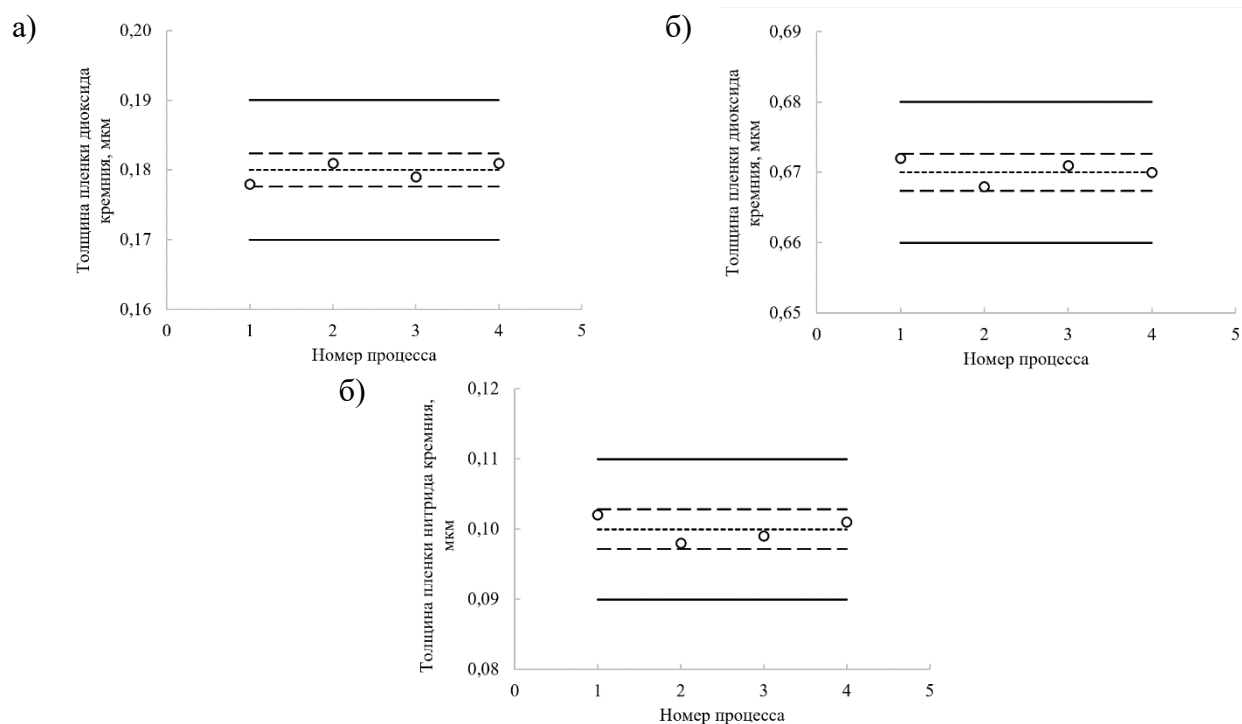


Рисунок 10 – Контрольные карты Шухарта для термических процессов:

а – окисление SiO₂ толщиной 0,18 мкм;

б – окисление SiO₂ толщиной 0,67 мкм;

в – осаждение Si₃N₄ толщиной 0,10 мкм.

Таблица 5 – Статистическая оценка термических технологических процессов

№ п/п	Параметр	Значение		
		0,18 мкм SiO ₂	0,67 мкм SiO ₂	0,10 мкм Si ₃ N ₄
1	2	3	4	5
1	Центр рассеяния \bar{X}	0,180	0,670	0,100
2	Среднеквадратичное отклонение S	0,001	0,001	0,002
3	Поле рассеяния ω	0,008	0,009	0,009
4	Коэффициент точности K_T	15,396	13,522	12,649
5	Коэффициент настроенности K_H	2,502	2,197	2,108

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

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 в количестве 10 шт. на каждую сторону образцов. Для процесса напыления обеих пленок металла изучались экспериментальные партии фоточувствительных кристаллов № 7–11. На рисунке 11 приведен вид контрольных карт, а в таблице 6 – рассчитанные параметры 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.

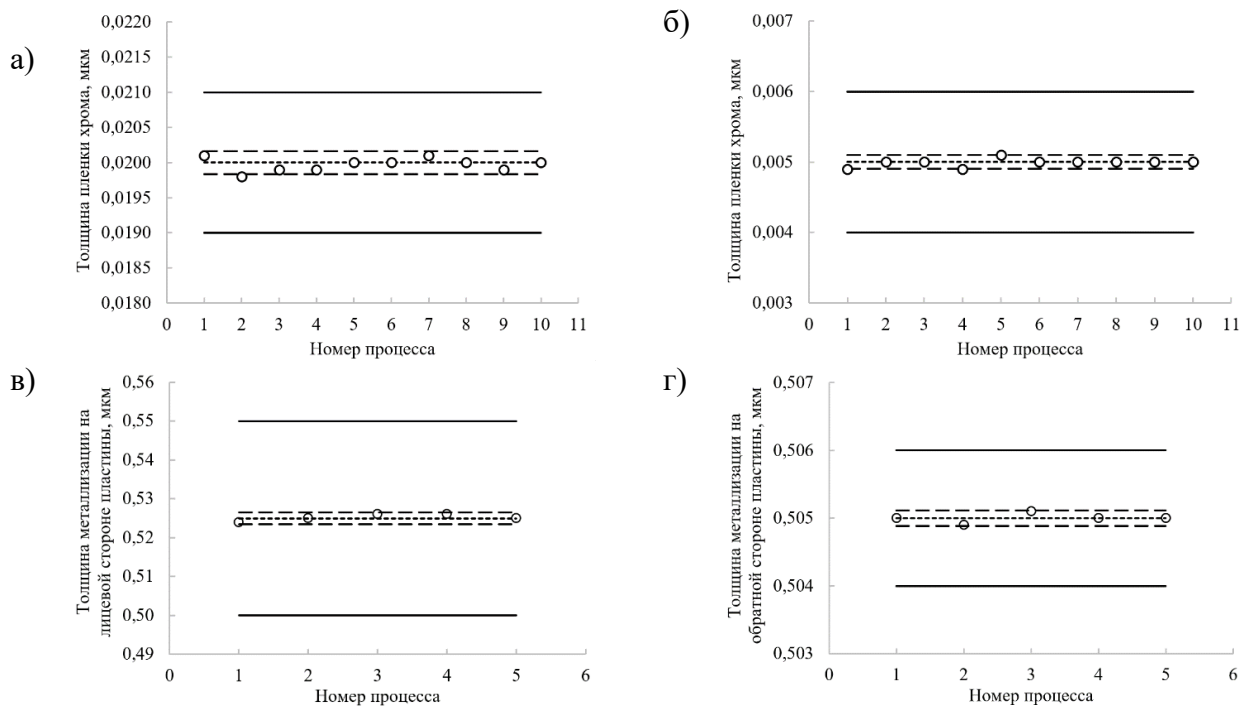


Рисунок 11 – Контрольные карты Шухарта для напыления металлизации:

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 6 – Статистическая оценка технологических процессов напыления металлизации

№ п/п	Параметр	Значение			
		0,02 мкм Cr	0,005 мкм Cr	Cr/Au (лиц. ст.)	Cr/Au (обр. ст.)
1	2	3	4	5	6
1	Центр рассеяния \bar{X}	0,0200	0,0050	0,525	0,5050

2	Среднеквадратичное отклонение S	0,0001	0,0001	0,001	0,0001
3	Поле рассеяния ω	0,0005	0,0003	0,005	0,0004

Окончание таблицы 6.

1	2	3	4	5	6
4	Коэффициент точности K_T	22,222	37,139	59,761	31,623
5	Коэффициент настроенности K_H	3,593	6,128	9,881	5,271

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

Составление технологической документации также является неотъемлемой частью разработки новой технологии изготовления изделия микроэлектроники. Оформление технологической документации проводится по стандартам ЕСТД.

В соответствии с разработанным маршрутом изготовления кристалла линейки ЛФД была разработана эскизная технологическая документация, включающая ряд операционных карт. 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. Вид операционных карт для ряда технологических процессов и операций представлен в разделе 3. Помимо этого, была проведена оценка ресурсоемкости разработанной технологии изготовления, содержащая номенклатуру материалов, используемых в каждом технологическом процессе и операции, а также их расходы. Также в разделе 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 разработанного маршрута изготовления фоточувствительного кристалла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы следующие:

1. Определена топология и вертикальная архитектура фоточувствительного кристалла.
2. В рамках поиска новых технологических решений, применимых в разрабатываемой технологии изготовления фоточувствительного кристалла, изучено влияние низкотемпературного импульсного отжига в среде H_2 на электрофизические параметры как диодных, так и фотодиодных структур, исследован и настроен новый процесс термической обработки с устойчивыми операционными режимами.
3. В рамках поиска новых технологических решений, применимых в разрабатываемой технологии изготовления фоточувствительного кристалла, исследован и настроен новый процесс формирования пленки Al_2O_3 методом ВЧ-катодного распыления в среде Ar при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности ВЧ-разряда 300 Вт, изучены свойства получаемой пленки и подтвержден потенциал ее применения для стабилизации зарядовых состояний на границе раздела кремния и пленки оксида кремния, а также предотвращения образования инверсного канала в приповерхностной области эпитаксиальной подложки.
4. 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.
5. Показано и подтверждено на примере серийно выпускаемого ограничительного диода p^+-n на основе кремния с малой площадью контакта, равной 0,002 мм², 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.
6. 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.

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. Разработана технология изготовления линейки лавинных фотодиодов с 12 фоточувствительными элементами на основе эпитаксиального кремния *p*-типа проводимости с фронтальной засветкой для длины волны 0,85 мкм. Предложенная технология изготовления обладает принципиальными отличиями по сравнению со стандартной технологией, а именно совмещением диффузии имплантированных примесей и формирования диэлектрических слоев в одном термическом процессе и проведением низкотемпературного импульсного отжига в среде N_2 .

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 дихлорсилана и аммиака, 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.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 2 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, 2 тезиса докладов 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:

1. **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. – Т. 52. – № 8. – С. 835–841. DOI: 10.1134/S1063739723080012

2. **Kim A.S.**, Perevedentseva N.A., Yurchuck S. Yu., Korzhov F.D. Rapid thermal annealing in silicon diode and photodiode technologies // Modern Electronic Materials. – 2025. – Т. 11. – № 4. – С. 209–215. DOI: 10.3897/j.moem.11.4.175359

3. **Ким А.С.** Разработка технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов n^+p - p/p^+ на основе эпитаксиальной структуры p/p^+ -Si для длины волны 0,85 мкм / XI научно-

практическая конференция молодых ученых и специалистов АО «НПО «Орион» – 2022. – С. 35–37.

4. **Ким А.С.**, Либерова Г.В. Разработка технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов n^+p/p^+ на основе эпитаксиальной структуры p/p^+Si для длины волны 0,85 мкм / XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тезисы докладов. – Москва. – 2022. – С. 320–322.

5. Патент (РФ) № 205303, МПК H01L 31/028. **Ким А.С.**, Колкий А.Н. Многоплощадочный кремниевый $p-i-n$ -фоточувствительный элемент с двухслойной диэлектрической пленкой. Заявл.: 10.03.2021; опубл.: 08.07.2021.

6. 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.

7. Патент (РФ) № 2022630062. Либерова Г.В., **Ким А.С.** Кристалл линейки лавинных фотодиодов. Заявл.: 05.04.2022; опубл.: 18.05.2022.