



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «НИИП»

А.П. Лапшин

«26» 03 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборов»
(АО «НИИП»)

на диссертацию Ким Александры Сергеевны
**«Разработка основ технологии изготовления линейки лавинных
фотодиодов на основе эпитаксиальной структуры p/p^+ -Si»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства
материалов и приборов электронной техники»

Актуальность темы диссертации

Массивы лавинных фотодиодов (ЛФД) активно используются в составе лазерных дальномеров, волоконно-оптических линий связи, систем лазерной локации и других фотоприемных устройствах. Это определяет потребность в организации производства рассматриваемого класса фотопреобразователей на площадках, прежде не специализирующихся на их выпуске. Для этого требуется создать условия для технического перевооружения этих площадок с целью освоения выпуска востребованных приборов. При этом техническое перевооружение производств зачастую не предполагает внесение изменений в несущие конструкции, дооснащение площадок дорогостоящим технологическим оборудованием и расширение площадей для его размещения за счет создания новых цехов и участков. Поэтому несмотря на существование стандартных технологических подходов к производству как одиночных ЛФД, так и их массивов различной конфигурации, создание новых основ технологий изготовления, жизнеспособных на заданной группе оборудования с применением доступных материалов и характеризуемых допустимым уровнем выхода годных, однозначно необходимо. В этом ключе диссертация Ким А.С. посвящена решению актуальной научно-технической задачи по разработке технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов с n^+ - p - i - p^+ структурой для ближнего ИК-диапазона.

Целью диссертации Ким А.С. являлась 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 поставленной цели в

диссертации были решены следующие основные задачи: определена топология и вертикальная архитектура фоточувствительного кристалла (ФК); составлен эскизный маршрут изготовления ФК; определён способ пассивации изолирующей плёнки SiO_2 на подложке высокоомного p-Si; определён способ снижения темновых токов фоточувствительных элементов на основе p-Si; определены оптимальные операционные параметры проведения технологических процессов и операций для получения ФК с заданными характеристиками; сформулированы признаки годности на этапах изготовления ФК; проведена статистическая оценка возможностей технологических процессов в рамках маршрута изготовления ФК; составлена эскизная технологическая документация в виде операционных карт на технологические процессы и операции, применяемые в рамках маршрута изготовления ФК.

Оценка научной новизны результатов диссертации

В диссертации Ким А.С. был получен ряд результатов, характеризующихся научной новизной.

- Во-первых, показано, что низкотемпературный импульсный отжиг в водородной среде при температуре 450°C в течение 5 с в технологии изготовления фотодиодов на основе p-Si позволяет снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов.

- Во-вторых, обоснована эффективность использования дополнительной пассивирующей пленки Al_2O_3 , формируемой методом ВЧ-катодного распыления в аргоновой среде (давление $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар, мощность разряда 300 Вт) для стабилизации зарядового состояния на границе раздела $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ в фотодиодах на основе высокоомного p-Si. Данное решение позволяет снизить уровень темновых токов фоточувствительных элементов и повысить сопротивление изоляции между планарно расположенными фоточувствительными площадками в многоэлементных структурах.

- В-третьих, разработаны новая планарная технология изготовления и новая топология линейки ЛФД с 12 фоточувствительными элементами для длины волны 0,85 мкм на основе эпитаксиального p-Si. Разработанная технология отличается совмещением диффузии имплантированных примесей и формирования диэлектрических слоёв в одном термическом процессе, а также применением низкотемпературного импульсного отжига в среде водорода.

Полученные результаты способствуют развитию технологической базы и открывают новые перспективы для промышленного производства различных полупроводниковых приборов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается корректностью формулировки цели и постановки задач, достаточным объемом полученных экспериментальных

данных и их согласованием с представленными в литературных источниках, применением известных методов исследования параметров как отдельных слоев, так и в целом фоточувствительных структур с использованием аттестованного и поверенного технологического и измерительного оборудования. Результаты диссертации отражены в 2 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в МБД Scopus, подтверждены 3 патентами, а также апробированы на научных-практических и научно-технических 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.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертации Ким А.С. определяется следующим.

- Разработана и реализована линейка ЛФД с 12 фоточувствительными элементами для фронтальной засветки излучением длиной волны 0,85 мкм.

- Показано, что улучшение уровня темновых токов полупроводниковых приборов может быть достигнуто посредством проведения низкотемпературного быстрого термического отжига в водородной среде. При этом установлен оптимальный режим для снижения уровня темновых токов фоточувствительных элементов (при температуре 450 °С в течение 5 с). На примере серийно выпускаемого многоплощадочного р-і-п фотодиода продемонстрировано повышение выхода годных кристаллов на 15 % за счет улучшения уровня темновых токов фоточувствительных площадок и охранного элемента.

- Показано, что нанесение пленки Al_2O_3 методом высокочастотного катодного распыления в среде Ag при давлении $0,5 \cdot 10^{-2}$ бар и мощности разряда 300 Вт в качестве слоя, пассивирующего широко используемый в кремниевых приборах SiO_2 , способствует качественному повышению сопротивления изоляции между планарно расположенными фоточувствительными элементами структуры на подложке р-типа проводимости. На примере серийно выпускаемого многоплощадочного р-і-п фотодиода продемонстрировано повышение выхода годных кристаллов на 18 % за счет улучшения уровня темновых токов фоточувствительных площадок и охранного элемента и повышения сопротивления изоляции между фоточувствительными площадками.

- Показано, что улучшение контактных свойств полупроводниковых приборов может быть достигнуто посредством проведения низкотемпературного быстрого термического отжига в водородной среде. При этом установлен оптимальный режим для снижения контактного сопротивления структур (при температуре 340 °С в течение 20 с). На примере серийно выпускаемого ограничительного диода р⁺-п с малой площадью

контакта продемонстрировано повышение выхода годных кристаллов на 15 % за счет улучшения последовательного сопротивления изготовленных диодов.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 106 источников, изложена на 188 страницах машинописного текста, содержит 98 рисунков и 31 таблицу. Оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Во введении сформулированы цель работы и задачи диссертации, обозначены ее актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и апробация результатов, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел содержит аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы. Приведены сведения о физических принципах работы и основных электрофизических параметрах ЛФД. Рассмотрены ряд типовых топологий ЛФД и технологии изготовления некоторых массивов ЛФД на основе различных полупроводниковых подложек помимо кремния, таких как GaN, Al_{0,2}Ga_{0,8}As и Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te.

Второй раздел посвящен определению топологии и архитектуры разрабатываемой фоточувствительной структуры, изучению технологических особенностей формирования полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев и определению методов их получения, применимых в технологии изготовления. Рассмотрена стандартная технология изготовления лавинных фотодиодов и обсуждены пути её оптимизации. Рассмотрены альтернативные технологические приемы снижения темновых токов и повышения сопротивления изоляции между фоточувствительными областями в многоэлементных фотодиодных структурах на основе высокоомного кремния р-типа проводимости. Исследовано влияние быстрого термического отжига в среде H₂ на уровень темновых токов на серийно выпускаемом многоплощадочном кремниевом р-і-п фотодиоде. Автором определен оптимальный режим отжига (450 °С в течение 5 с), при котором достигалось снижение параметра в 1,5–1,6 раз и повышение процента выхода годных фотодиодов. Исследован вклад процесса и в снижение последовательного сопротивления. Проведённые измерения LTLM-методом с линейной геометрией контактов образцов и апробация результата на серийно выпускаемом кремниевом ограничительном диоде с малой площадью контакта определили оптимальный режим при температуре 340 °С в течение 20 с, при котором диапазон значений параметра сместился от 1,2–13 кОм до 0,6–0,7 кОм и благодаря чему было достигнуто повышение выхода годных диодов. Также посредством измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик исследованы электрофизические характеристики пленок Al₂O₃, полученных методом ВЧ-катодного распыления в среде Ar при давлении 0,5·10⁻² бар и мощности разряда 300 Вт на подложках высокоомного и низкоомного кремния р-типа с предварительно выращенными пленками SiO₂.

Это позволило изучить образование инверсного канала в приповерхностной области подложек, создающего взаимосвязь между планарно расположенными фоточувствительными областями *n*-типа, и определить толщины диэлектрических пленок, при которых его возникновение не наблюдается. Апробация результатов проводилась на ранее рассмотренном многоплощадочном *p-i-n* фотодиоде и подтвердила эффективность данного способа. Сравнение полученных результатов с выходными параметрами фотодиодов, содержащих стандартные высоколегированные стоп-области показало не только улучшение параметра σ (95–110) МОм до (100–130) МОм, что полностью соответствует распространяемому на данный фотодиод требованию, но и значительное снижение темновых токов отдельных элементов структуры в (2–3,5) раза, за счет чего было достигнуто повышение выхода годных фотодиодов.

Третий раздел посвящен составлению эскизного технологического маршрута линейки ЛФД, установлению режимов проведения технологических процессов и операций, изготовлению и сравнению фотоэлектрических параметров партий кристаллов фоточувствительных кристаллов, проводимых разными маршрутами изготовления, выбору оптимального. Также проведена статистическая оценка возможностей ряда технологических процессов и операций с использованием широко применяемых на производственных линиях карт Шухарта, позволяющих оценить их точность и настроенность. Полученные результаты свидетельствуют о допустимости их внедрения в мелкосерийное производство с установленными для получения заданной структуры технологическими режимами.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Результаты диссертационного исследования представляют интерес для специалистов, занимающихся разработками твердотельных фотопреобразователей. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы на предприятиях, занимающихся серийным производством полупроводниковых фотоприемных приборов и аппаратуры на их основе, таких, как АО «МЗ «Сапфир», АО «НЗПП Восток», АО «ОКБ «Астрон».

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации выявлено положительное влияние импульсного отжига в среде водорода на уровень темновых токов фотодиодных структур за счёт насыщения оборванных Si-связей водородом. Однако насыщение оборванных связей водородом может быть нестабильным и, в частности, привести к существенному росту плотности поверхностных состояний (по сути — оборванных связей), например, в условиях радиационного воздействия. Данный вопрос в диссертации не рассмотрен.

2. В таблице 5 приведены отрицательные значения плотности поверхностных состояний (ПС). Плотность ПС должна быть положительной, а отрицательным может быть заряд ПС.

3. На стр. 87 (предпоследний абзац) сказано, что для фоторезиста ФП-9120-1 оптимальным режимом, позволяющим получить равномерные маски с заданными топологическими рисунками, является режим № 2. Однако ранее (стр. 86–87), говорилось, что при использовании режима № 2 наблюдались области не проэкспонированного или недопроявленного фоторезиста, а также зачатки отслоения металлизации, связанные с недостаточной термообработкой перед осаждением пленки Cr/Au, а оптимальное качество маски фоторезиста достигалось при использовании режима № 3.

4. В п. 3.6 отсутствует информация о том, входит ли в состав разработанной эскизной технологической документации маршрутная карта (технологический маршрут описан в п. 3.4). Приведены сведения только о разработанных операционных картах и технологических инструкциях.

5. На стр. 122 (предпоследний абзац) особое внимание уделено контролю адгезии металлизации Cr/Au на обратной стороне пластины, поскольку там толщина адгезионного слоя хрома крайне мала и составляет всего 0,005 мкм. Возникает вопрос: почему её нельзя было сделать больше, например, как на лицевой стороне 0,02 мкм? Поскольку в диссертации отсутствует обоснование выбора толщины слоёв металлизации, этот момент остается непонятным.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации Ким А.С.

Заключение

Диссертация Ким Александры Сергеевны «Разработка основ технологии изготовления линейки лавинных фотодиодов на основе эпитаксиальной структуры p/p⁺-Si» является завершённой научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание работы полностью соответствует специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники». Представленные автором результаты обладают научной новизной, отличаются практической значимостью и характеризуются достаточным уровнем достоверности. Цель диссертации достигнута, все поставленные задачи выполнены, а выносимые на защиту положения получили убедительное экспериментальное обоснование. Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы. Опубликованные по теме диссертации печатные работы отражают сущность диссертации и основные научные результаты.

Соискатель, Ким Александра Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Отзыв обсужден и утвержден на заседании научно-технического совета АО «НИИП». Протокол № 2 от 26.03.2026.

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов» (АО «НИИП»).

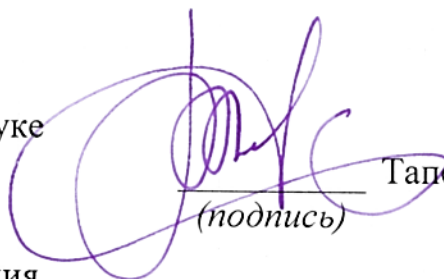
Адрес: 140080, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8.

Телефон: +7 (495) 663-90-95

E-mail: niip@rosatom.ru

Сайт: <http://niipribor.ru/>

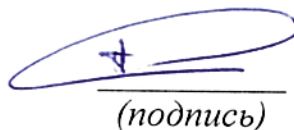
Заместитель генерального
директора АО «НИИП» по науке
и инновациям, д.т.н., с.н.с.



Таперо К.И. 26.03.2026

дата

Начальник отдела 82 управления
радиационных испытаний
АО «НИИП», к.т.н.



Петров А.С. 26.03.2026

дата

Таперо Константин Иванович: доктор технических наук (специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»), заместитель генерального директора по науке и инновациям, АО «НИИП» (предприятие Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»). Адрес: 140080, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, строение 8. Телефон (рабочий): 8-495-663-90-95. Адрес электронной почты: KITapero@rosatom.ru. Сайт организации: <http://www.niipribor.ru/>.

Петров Александр Сергеевич: кандидат технических наук (специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»), начальник отдела 82 управления радиационных испытаний, АО «НИИП» (предприятие Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»). Адрес: 140080, Московская обл., г. Лыткарино, промзона Тураево, строение 8. Телефон (рабочий): 8-495-663-90-95. Адрес электронной почты: ASPetrov@niipribor.ru. Сайт организации: <http://www.niipribor.ru/>.

Подписи д.т.н. Таперо К.И. и к.т.н. Петрова А.С. заверяю:

Заместитель генерального директора АО «НИИП»

по управлению персоналом



/ Л.А. Чернякова