

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

ЮФУ801.02.05,

созданного на базе Института нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южного федерального университета, по диссертации на соискание учёной
степени кандидата наук

*аттестационное дело № _____,
решение диссертационного
совета от 28 декабря 2023 № 17*

О присуждении Заиченко Александру Николаевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Физико-технологические основы термомиграционного легирования микрообластей в объёме кремния акцепторными примесями» по специальности 2.2.3 –Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники принята к защите 26 октября 2023 г. (протокол заседания № 14) диссертационным советом ЮФУ801.02.05, созданным на базе Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета приказом №235-ОД от 27 сентября 2022 г.

Соискатель Заиченко Александр Николаевич, 1983 года рождения.

В 2006 году Заиченко А.Н. окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

В 2016 году был прикреплен к федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени

М.И. Платова» (ЮРГПУ (НПИ)) соискателем для подготовки кандидатской диссертации по научной специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Заиченко А.Н. работает старшим преподавателем кафедры «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ). Диссертация выполнена на кафедре «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ).

Научный руководитель – Середин Борис Михайлович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ).

Официальные оппоненты:

Кожемякин Геннадий Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, Лаборатория космического материаловедения ИК РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук,

Спивак Юлия Михайловна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ по теме диссертации. Три из них в рецензируемых изданиях из Перечня научных изданий ЮФУ; две статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ; патент РФ на полезную модель; свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ; пять работ опубликованы в изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus; девять материалов опубликованы в трудах научных конференций.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных

соискателем учёной степени работах, виде, авторском вкладе и объёме научных изданий.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Термомиграционные *p*-каналы: реальная структура и электрические свойства / В. Н. Лозовский, А. А. Ломов, Б. М. Середин, С. Г. Симакин, А. Н. Заиченко, М. Б. Середина // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 29–38. (Список ЮФУ);

2. Структурное совершенство и состав легированных галлием термомиграционных слоев кремния / А. А. Ломов, Б. М. Середин, А. Н. Заиченко [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 6. – С. 27–30; (англ. перевод: Structural Perfection and Composition of Gallium-Doped Thermomigration Silicon Layers / A. A. Lomov, B. M. Seredin, A. N. Zaichenko [et al.] // Technical Physics Letters. – 2020. – Vol. 46, Is. 3. – P. 279–282. – DOI 10.1134/S1063785020030268). (Список ЮФУ, Scopus);

3. Формирование и структура термомиграционных кремниевых каналов, легированных Ga / А. А. Ломов, Б. М. Середин, А. Н. Заиченко [и др.] // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 467–474; (англ. перевод: The Formation and Structure of Thermomigration Silicon Channels Doped with Ga / A. A. Lomov, B. M. Seredin, A. N. Zaichenko [et al.] // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, No. 3. – P. 453–460. – DOI 10.1134/S1063784221030178). (Список ЮФУ, Scopus).

На диссертацию и автореферат поступило **семь** отзывов, отзывы дали:

- Сысоев И.А., д.т.н., директор центра фотовольтаики Северо-Кавказского федерального университета, отзыв содержит одно замечание;

- Руденко К.В., д.ф.-м.н., зам. директора по научной работе ФГБУН Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», отзыв содержит три замечания;

- Князев С.Ю., д.т.н., профессор кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВО ДГТУ и Щербакова Е.Е, к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ФГБОУ ВО ДГТУ, отзыв содержит два замечания;

- Юрасов Ю.И., д.т.н., зам. директора по научной работе ФГБН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН), отзыв содержит три замечания;

- Ивахнюк Г.К., д.х.н., профессор, заведующий кафедрой «Инженерной защиты окружающей среды» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технологического университета), лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, отзыв содержит четыре замечания;

- Григорьев М.Н., к.т.н., ведущий инженер-технолог АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи», отзыв содержит три замечания;

- Казакова А.Е., к.ф.-м.н. руководитель лаборатории радиофотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», отзыв не содержит замечаний.

Все отзывы **положительные**, во всех отзывах отмечено, что работа соответствует специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки).

Критические замечания:

1) Указанного на странице 10 автореферата значения температуры плавления галлиевого порошка в 80 °С явно недостаточно для значимого растворения кремниевой пластины. В связи с чем, утверждение о формировании таким способом кремний-галлиевых зон является весьма сомнительным;

2) В главе 3 приведено схематическое изображение охрannого кольца нагревателя, которое помогает компенсировать снижение температуры на периферии пластины кремния, способствуя повышению однородности температурного поля. Принцип выравнивания температурного поля состоит в создании кольцевой проточки на поверхности нагревателя, которая обеспечивает локальное по кольцу увеличение температуры. Компьютерным моделированием определены градиенты температуры в пластине кремния. Рисунок 3.7, б диссертации непонятен вследствие того, что в его подписи не указаны обозначения температурных полей или градиентов температуры.

3) Описание математической модели, используемой для построения распределения нормального G_n и тангенциального G_t градиентов температуры приведено очень кратко. Не указано, каким методом осуществлялся процесс моделирования, а также как осуществлялось построение сетки, используемой при моделировании. Как следствие, сложно оценить результат моделирования.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются ведущими специалистами в областях, рассматриваемых в диссертации.

Доктор технических наук Кожемякин Геннадий Николаевич является специалистом в области разработки технологий выращивания кристаллов и получения на их основе структур электронных приборов.

Доктор технических наук Спивак Юлия Михайловна является специалистом в области создания функционализированных наноструктур в кремнии.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны физико-технологические основы процесса создания методом термомиграции микрообластей в виде сквозных каналов на всю толщину кремниевой пластины, отличающихся уровнем легирования акцепторов $(1...4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ за счет использования алюминий-галлиевых

расплавов;

предложены методики проведения процесса термомиграции системы жидких зон на основе алюминия и галлия или их сплавов, обеспечивающие высокое качество микрообластей *p*-типа электропроводности; нагревательное устройство, обеспечивающее однородное поле градиента температуры в пластине кремния диаметром не менее 100 мм; режимы проведения процессов термомиграции жидких дискретных алюминий-галлиевых зон для создания структур кремниевых высоковольтных фотопреобразователей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

установлены закономерности термомиграционного легирования кремния алюминием, галлием или их сплавами, позволяющие создавать в монокристаллических пластинах диаметром не менее 100 мм систему микрообластей в виде сквозных каналов.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

предложены методики избирательного смачивания кремния алюминий-галлиевым расплавом, позволяющие сформировать систему дискретных зон толщиной (30...50) мкм и шириной (100...200) мкм, которые обеспечивают термомиграционное легирование на кремниевых пластинах диаметром не менее 100 мм;

разработан технологический процесс получения по методу термомиграции с использованием системы алюминий-галлиевых жидких зон в кремниевых пластинах *n*-типа структурно-совершенных микрообластей в виде сквозных *p*-каналов с объёмной концентрацией акцепторов в интервале $(1...4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

разработанные научные основы термомиграционного легирования

позволяют воспроизводимо получать в *n*-кремнии систему *p*-микрообластей виде сквозных каналов шириной (100...200) мкм. Установленные закономерности использованы ведущими производителями промышленной электроники ПАО «Сатурн» и АО «ВЗПП-Микрон», а также в ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) при выполнении государственного задания по НИР «Разработка физико-технических основ объемного легирования акцепторной примесью микрообластей кремниевых пластин методом термомиграции жидких зон» (шифр FENN-2023-0005);

установлена возможность регулирования объёмной концентрации акцепторов от $1 \cdot 10^{19}$ до $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в кремниевых термомиграционных каналах за счёт изменения состава алюминий-галлиевых зон;

определены условия для воспроизводимой термомиграции дискретных зон со скоростями от 400 до 1000 мкм/ч, достигаемыми при температурах (1320...1520) К.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теоретические результаты, а именно — закономерности термомиграционного легирования кремния алюминием, галлием и их сплавами — подтверждаются согласованием результатов компьютерного моделирования с данными натуральных экспериментов, с результатами исследований других авторов, с известными фактами о природе термомиграции, а также обусловлены применением современного оборудования для исследований.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном проведении диссертационных исследований на всех этапах: в получении основных научных результатов; в проведении расчётов и экспериментов, в обработке и интерпретации экспериментальных данных, в разработке основных теоретических положений и физических моделей, в апробации результатов исследований, а также в подготовке публикаций по материалам диссертационных исследований.

На заседании 28 декабря 2023 г. диссертационный совет отметил, что рассматриваемая диссертация соответствует критериям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет»», и принял решение **присудить** Заиченко Александру Николаевичу учёную степень кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

При проведении тайного голосования с использованием информационно-коммуникационных технологий диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 3 доктора наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники, участвовавших в заседании очно, 4 человека, из них 3 доктора наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники, участвовавших в заседании дистанционно, проголосовали: за – 12, против – нет, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета ЮФУ801.02.05 _____ В.В. Петров

Секретарь диссертационного совета ЮФУ801.02.05 _____ З.Е. Вакулов

