

УТВЕРЖДАЮ:
директор ФИЦ КазНЦ РАН
д.ф.-м.н., член-корр. РАН


Калачев А.А.

«30» июня 2026 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Диссертация **«Оптоэлектронные свойства сильнолегированных сурьмой слоев германия, полученных по ионно-лучевой технологии»** выполнена в лаборатории интенсивных радиационных воздействий в Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН).

В 2001 г. Новиков Герман Анатольевич окончил физический факультет Казанского государственного университета имени В. И. Ульянова-Ленина по специальности «Физика» с присвоением квалификации «Физик».

Соискатель прошел обучение в очной аспирантуре в Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН с 02.07.2001 г. по 02.07.2004 г. по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния». С 29.07.2004 г. по 31.05.2006 г. работал в должности младшего научного сотрудника в лаборатории молекулярной фотохимии, с 01.06.2006 г. переведён в лабораторию интенсивных радиационных воздействий младшим научным сотрудником. С 12.01.2008 г. по настоящее время – инженер-исследователь в Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского – обособленном структурном подразделении ФИЦ КазНЦ РАН.

В 2026 г. был прикреплен к ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» для сдачи экзамена по специальности 1.3.11. «Физика полупроводников».

Справка о сданных кандидатских экзаменах выдана в 2026 г. ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – Баталов Рафаэль Ильясович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории интенсивных радиационных воздействий.

По итогам обсуждения на Учёном совете КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН кандидатской диссертации «Оптоэлектронные свойства сильнолегированных

сурьмой слоев германия, полученных по ионно-лучевой технологии» принято следующее заключение:

1. Актуальность

Современные технологии оптоэлектроники требуют наличия светоизлучающих и свето-регистрирующих структур, размещенных непосредственно внутри электронных компонентов чипа. Как известно, основным материалом современной электроники – это кремний (Si), а его оксид (SiO_2), применяемый для изготовления волноводов, обладает минимумом оптических потерь в диапазоне длин волн 1.5-1.6 мкм. Определенный интерес для решения подобных задач представляет другой материал IV группы периодической таблицы – германий (Ge), а также различные сплавы на его основе, такие как SiGe и GeSn. Кроме того, квантовые точки Ge могут быть встроены в слои Si. Также возможно создание структур на основе псевдопрямозонного Ge связанное с ростом сплошных слоёв Ge на Si подложке, обладающих модифицированной зонной структурой с повышенной вероятностью излучательной рекомбинации (люминесценцией) по сравнению с объёмным кристаллом Ge. В обычном состоянии кристалл Ge является полупроводником с не прямой зонной структурой с низлежащей (по отношению к потолку валентной зоны) не прямой L-долиной в зоне проводимости. Ширина запрещенной зоны составляет $\Delta E_L = 0.664$ эВ, при этом дно прямой Γ -долины расположено выше дна L-долины на 0.13 эВ. Поэтому в Ge очень слабая прямозонная фотолюминесценция. Из литературы известно, что из-за различия в коэффициентах теплового расширения слоя Ge и подложки Si, циклический термический отжиг в диапазоне температур 700-900 °C приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, что вызвано увеличением растягивающей деформации пленки Ge до 0.15-0.23%. Известно, что дополнительное сужение энергетической щели в кристалле Ge можно достичь легированием донорными примесями (напр. сурьма) с концентрацией выше 10^{19} см^{-3} , что способствует заполнению электронами L-долины до уровня прямой Γ -долины.

Детальное исследование, проведенное в диссертационной работе, позволило разработать методику изменения зонной структуры p-Ge и наблюдать усиленную прямозонную фотолюминесценцию в диапазоне длин волн 1.55-1.65 мкм.

Актуальность данной тематики подтверждается поддержкой фондом РФФИ двух грантов, при поддержке которых выполнялись работы по диссертации.

2. Научная новизна результатов работы

1. В результате моделирования импульсного лазерного отжига (ИЛО) (нагрев, плавление, кристаллизация) и последующего экспериментального исследования динамики отражательной способности поверхности пленок Ge

на различных подложках (Si , Al_2O_3 , SiO_2) в процессе ИЛО, установлены предельные значения плотности энергии (W) лазерных импульсов, необходимых для плавления аморфного слоя Ge, при которых не наступает разрушение или эрозия поверхности плёнки Ge. Установлено, что оптимальные значения W лазерного излучения зависят от типа подложки и толщины плёнки.

2. На основе моделирования импульсного ионного отжига (ИИО) с различной W аморфного Ge, нелегированного и легированного примесью Sb, была установлена глубина расплава, температура на поверхности, а также концентрационное распределение примеси по глубине образца.
3. Установлена зависимость диффузионного перераспределения донорной примеси Sb в образцах Ge и степень её активации от величины W при ИИО.
4. Установлено, что ИИО имплантированных и осаждённых слоёв Ge:Sb приводит к усилению прямозонной ФЛ и расширению области фоточувствительности на диапазон 0.5-2 мкм при 300 К.

3. Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы состоит в получении методом моделирования расчетных данных о нагреве и плавлении поверхности объемного кристалла Ge и пленки Ge на различных подложках (Si , Al_2O_3 , SiO_2) в процессе ИЛО и ИИО, а также распределения по глубине примесных атомов Sb в образцах Ge под действием ИИО.

Практическая значимость работы заключается, во-первых, в разработке методики увеличения уровня легирования примеси Sb в Ge, более чем на порядок выше по сравнению с ее равновесным пределом растворимости, с использованием неравновесных методов (ионно-лучевое распыление и ИИО, ионная имплантация и ИИО). Во-вторых, в формировании тонкоплёночных структур толщиной 100-500 нм на основе монокристаллических сильнолегированных слоёв Ge:Sb, светоизлучающих в диапазоне длин волн 1.5-1.7 мкм, и обладающих фоточувствительностью в области 0.5-2 мкм, функционирующих при комнатной температуре. Новые экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, могут способствовать развитию технологии создания сильнолегированных Ge плёнок и их применению в оптоэлектронике.

4. Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

Основные эксперименты были спланированы автором совместно с научным руководителем. Автор принимал участие в моделировании нагрева и диффузии при импульсном отжиге. Автор самостоятельно проводил осаждение плёнок Ge методом магнетронного распыления, участвовал в осаждении плёнок Ge методом ионно-лучевого распыления и в экспериментах по ионной имплантации Ge примесью Sb. Автор участвовал в

работах по модернизации импульсного ускорителя ионов ТЕМП-2М, осуществлял на нём ИИО осаждённых и имплантированных образцов Ge в различных режимах. Автор участвовал в проведении измерений методами АСМ, СЭМ и РД, самостоятельно выполнял измерения ИК фотолюминесценции и фотопроводимости, электрофизических и вольтамперных характеристик. Анализ и интерпретация полученных результатов выполнялись автором совместно с научным руководителем.

5. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов работы определяется комплексным характером выполненных экспериментальных исследований, использованием современного оборудования, химически чистых реактивов, подложек и легирующих примесей, тщательным выбором образцов и всех деталей эксперимента, многократной повторяемостью экспериментальных результатов, теоретическим обоснованием экспериментальных результатов.

6. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 1.3.11. Физика полупроводников. Представленные в ней результаты соответствуют п.1 – Физические основы методов получения полупроводниковых материалов, композитных структур, структур пониженной размерности, п.2 – Структурные и морфологические свойства полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, п.3 – Примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах, п.4 – Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках и в композиционных полупроводниковых структурах, п.8 – Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых материалах и композитных структурах, полупроводниковые лазеры и светоизлучающие устройства.

7. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором

Результаты диссертационной работы представлены в 29 печатных работах, из которых 7 – статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus [1-А7], 1 статья в прочих рецензируемых изданиях [8] и 21 – тезисы и труды конференций [9-А29].

Работа по теме диссертации выполнялась диссертантом в рамках следующих научных проектов: «Исследование механизмов роста и оптоэлектронных свойств Si-Ge тонкопленочных структур, полученных сверхбыстрыми термическими воздействиями» (РФФИ, №13-02-00348, 2013-

2015), «Модифицирование зонной структуры тонкопленочного германия и исследование его оптических и электрофизических свойств» (РФФИ-БРФФИ, № 16-52-00021, 2016-2017 гг.) и в рамках гос. задания КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и SCOPUS и приравненных к публикациям в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Structural and optical properties of magnetron sputtered and pulsed beam annealed Ge/Si layers / K.N. Galkin, R.I. Batalov, R.M. Bayazitov, et al. // Phys. Status Solidi C– 2013. – Vol. 10. – P. 1824-1827. (10%)
2. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках германия на кремнии, сапфире и кварце / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, и др. // ЖТФ– 2015. – Т. 85. – Стр. 89-95. (20%)
3. Импульсная модификация пленок германия на подложках кремния, сапфира и кварца: Структура и оптические свойства / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, и др. // ФТП– 2015. – Т. 49. – Стр. 746-752. (20%)
4. Experimental Study and Simulation of the Structure-Phase Transitions in Deposited Ge Layers During Pulsed Laser Annealing / H.A. Novikov, R.M. Bayazitov, R.I. Batalov, et al. // Solid State Phenom. – 2016. – Vol. 249. – P. 24-29. (20%)
5. Наносекундный импульсный отжиг сильно легированных слоев Ge:Sb на Ge подложках / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Микроэлектроника – 2018. – Т. 47. – Стр. 74-82. (20%)
6. Импульсный ионный отжиг германия, имплантированного ионами сурьмы / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Автометрия – 2019. – Т. 55. – Стр. 5-13. (10%)
7. Оптоэлектронные свойства сильно легированных слоёв Ge:Sb, полученных ионно-пучковыми методами / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, И.А. Файзрахманов и др. // Оптика и спектр. – 2024.- Т.132, вып.11, с.1189-1195. (20%)

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

8. Воздействие импульсных лазерных и ионных пучков на вакуумно-осаждённые слои Ge:Sb на подложках Ge. расчёты и эксперимент / Г.А. Новиков, Р.М. Баязитов, Р.И. Баталов, и др. // КФТИ. Ежегодник – 2018. – Т. 2018. – С. 120-126. (20%)

Статьи в сборниках трудов конференций и тезисы докладов

9. Batalov, R.I. Pulsed beam modification of SiGe layers formed by ion implantation and magnetron sputtering / R.I. Batalov, R.M. Bayazitov, H.A. Novikov, et al. // Abstracts of 17th International summer school on vacuum, electron and ion technologies, Sunny beach, 19-23.09.2011, – Bulgaria, Ed. M. Dimitrova, Ch. Ghelev, P.I. Petrov, – P. 44. (10%)

10. Новиков, Г.А. Формирование гетероструктур FeSi_2/Si и SiGe/Si методами магнетронного распылением и импульсного отжига/ Г.А. Новиков, Р.М. Баязитов, Р.И. Баталов // Тезисы 13-й Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы», пос. Абрау-Дюрсо, 19-26.09.2011, – Россия, Изд. УлГУ, под ред. С.В. Булярского, – С. 14-15. (30%)
11. Баталов, Р.И. Формирование гетероструктур SiGe/Si методами магнетронного распыления и наносекундного ионного/лазерного отжига / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Тезисы IV Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Новосибирск 23-26.10.2012, – Россия, – С. 38. (20%)
12. Galkin, K. Structural and optical properties of magnetron sputtered and pulsed beam annealed Ge/Si layers / K. Galkin, R. Batalov, R. Bayazitov, et al. // Proceedings of Asia-Pacific Conference on Green Technology with Silicides and Related Materials (APAC-Silicide 2013). Tsukuba 27-29.07.2013, – Japan, poster report No.28-P17_C37. (10%)
13. Batalov, R.I. Pulsed laser/ion beam treatment of Ge/Si and $\text{Ge}/\text{Al}_2\text{O}_3$ thin film structures /. R.I. Batalov, R.M. Bayazitov, H.A. Novikov, et al. // Proceedings of International conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2013), Sudak 08-13.09.2013, – Ukraine, – P.342-343. (10%)
14. Баталов, Р.И. Вакуумное осаждение и импульсная модификация тонких пленок Ge на Si . Структура и фотолюминесценция / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Труды 10-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2013), Минск 24-27.09.2013, – Беларусь, – С.161-162. (20%)
15. Баталов, Р.И. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках германия на кремнии и диэлектрических подложках / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника», Минск 18-21.11.2013, – Беларусь, – С.199-201. (20%)
16. Новиков Г.А. Импульсная модификация пленок германия на подложках кремния, сапфира и кварца: Структура и оптические свойства / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, и др. // Сборник тезисов X Международной Конференции «Кремний-2014», Иркутск 7-12.07.2014, – Россия, – С.38. (30%)
17. Новиков, Г.А. Импульсно-лазерная модификация пленок германия на диэлектрических и полупроводниковых подложках / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, и др. // Труды XXIV Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь 7-12.07.2014, – Россия, – С.465-475. (30%)
18. Новиков, Г.А. Динамика фазовых переходов при лазерной обработке пленок германия, осажденных ионно-лучевым распылением. Эксперимент и моделирование / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, Р.М.

- Баязитов, и др. // Тезисы докладов V Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Нижний Новгород 27-31.10.2014, – Россия, – С.76-77. (30%)
19. Баталов, Р.И. Импульсная лазерная модификация пленок германия, осажденных ионно-лучевым распылением на подложки кремния, сапфира и кварца / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Труды 12-й Международной конференции «Пленки и покрытия-2015», С.-Петербург 19-22.05.2015, – Россия, Изд. Политехн. унив., под ред. В.Г. Кузнецова, – С.356-359. (устный) (10%)
 20. Novikov, H.A. Structure-phase transitions in deposited Ge layers during pulsed laser annealing. Experiment and simulation / H.A. Novikov, R.M. Bayazitov, R.I. Batalov, et al. // Proceedings of Third Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (ASCO-NANOMAT, Dalnauka), Vladivostok 19-26 August, 2015, – Russia, – P.255-256. (30%)
 21. Novikov, H. Pulsed beam modification of highly doped Ge:Sb layers deposited on the different substrates / H. Novikov, R. Batalov, R. Bayazitov, et al. // Abstracts of International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE-2016, Tomsk 2-7.10.2016, – Russia, – P.71. (30%)
 22. Баязитов, Р.М. Воздействие мощных импульсных ионных и лазерных пучков на гетероструктуру n^+ -Ge:Sb/p-Ge / Р.М. Баязитов, Р.И. Баталов, Г.А. Новиков, и др. // Труды XXVII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», Севастополь 10-15.07.2017, – Россия, – С.88-97. (20%)
 23. Баталов, Р.И. Создание напряженных и сильно легированных слоев n^+ -Ge:Sb с использованием мощных лазерных и ионных пучков / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Тезисы Российской конференции и Школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники «Фотоника-2017», Новосибирск 11-15.09.2017, – Россия, – С. 61. (20%)
 24. Баталов, Р.И. Структура и фотопроводимость сильно легированных слоев Ge:Sb, сформированных на подложках Si и Ge ионным распылением и импульсными обработками / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Материалы 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск 19-22.09.2017, – Беларусь, – С. 202-204. (20%)
 25. Баталов, Р.И. Импульсный отжиг сильно легированных слоев Ge:Sb, полученных методами вакуумного осаждения и ионной имплантации / Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков, и др. // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции и Школы молодых ученых «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Казань 7-9.11.2018, – Россия, Изд. ННГУ, – С.26-27. (20%)
 26. Баталов Р.И. Получение сильно легированных слоев Ge:Sb с использованием ионной имплантации и импульсного ионного отжига /

- Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков // Труды Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», ВИТТ-2019, Минск 30.09-03.10.2019, – Беларусь, – С.201-204. (20%)
27. Баталов, Р.И. Структурные, оптические и фотоэлектрические свойства германия, гипердопированного примесью сурьмы / Р.И. Баталов, Г.А. Новиков, Баязитов Р.М., и др. // Тезисы докладов 51-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва 24-26.05.20022, – Россия, – С. 143. (20%)
28. Новиков, Г.А. Импульсный ионный отжиг гипердопированных слоёв Ge:Sb, полученных ионным распылением / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, И.А. Файзрахманов, и др. // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Казань 11-14.10.2022, – Россия, – С.20. (30%)
29. Новиков, Г.А. Структура, оптические и фотоэлектрические свойства гиперлегированных слоёв Ge:Sb, полученных ионным распылением и импульсным отжигом / Г.А. Новиков, Р.И. Баталов, И.А. Файзрахманов // Сборник трудов III международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур», Казань 1-4.12.2022, – Россия, – С. 129-130. (30%)

В перечисленных работах Новиковым Г.А. лично получены следующие результаты:

– в работах [1, 9-14] было проведено вакуумное осаждение тонких пленок Ge на подложки Si методом магнетронного распыления с последующим наносекундным импульсным отжигом. Во время осаждения менялось время распыления и температура подложки. Во время импульсной обработки использовалось мощное лазерное излучение или мощные ионные пучки с различной плотностью энергии. Была исследована зависимость структурных и оптических свойств пленок Ge/Si от параметров магнетронного распыления и импульсной обработки. Исследована фотолюминесценция слоев Ge/Si при $T = 77$ К после импульсного ионного и термического отжигов. Определены оптимальные режимы осаждения и отжига, приводящие к получению светоизлучающих в области 1.5 мкм слоев.

– в работах [2-4, 15-20] методом ионно-лучевого распыления получены образцы тонких пленок Ge, осажденных на полупроводниковые и изолирующие подложки и модифицированных импульсным лазерным излучением, изучены их структурные и оптические свойства. Проведен расчет нагрева пленок Ge на различных подложках лазерными импульсами и сделано сравнение экспериментальных данных по времени жизни расплава Ge с расчетными данными, показавшее их хорошее соответствие.

– в работах [5,7,8 21-25, 27-29] проводилось вакуумное осаждение сильнолегированных примесью Sb аморфных плёнок Ge:Sb различной толщины на монокристаллических подложках p-Ge. Аморфные слои Ge:Sb были подвергнуты импульсному наносекундному воздействию мощными

лазерными или ионными пучками. С помощью структурных исследований обнаружено формирование поликристаллических либо эпитаксиальных слоев Ge:Sb/p-Ge в результате быстрой кристаллизации из расплава. Проводилось моделирование диффузионного перераспределения примеси Sb при импульсных воздействиях. Из сравнения с экспериментальными данными определены коэффициент диффузии в расплаве и коэффициент сегрегации Sb. С помощью химического травления получены мезо-структуры, на которых исследованы вольтамперные характеристики и фотоотклик при 300 К. Показано расширение области фотоотклика до 2 мкм.

– в работах [6, 25-27] с помощью методов ионной имплантации и последующей импульсной ионной обработки были получены сильно легированные слои Ge:Sb. После импульсной обработки исчезало почернение поверхности образцов, а их структура восстанавливалась до эпитаксиальной. Проведен расчет глубинных профилей внедрённых ионов Sb в Ge до и после ионного отжига. Из сравнения с экспериментом получено значение коэффициента диффузии Sb в расплаве Ge. Измерения фотолюминесценции при 300 К выявили усиление прямого вклада в сигнал.

Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 3 – в [1-4, 9-14, 15-20], по главе 4 – в [5,7,8, 21-25, 27-29], по главе 5 – в [6, 25-27].

В диссертационной работе не выявлено использования материалов или отдельных результатов без ссылок на автора или источник заимствования, включая работы, выполненные соискателем лично и/или в соавторстве.

8. Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались в виде устных и стендовых докладов на Международных и Российских конференциях, форумах и симпозиумах:

«17-я Международная летняя школа по вакуумным, электронным и ионным технологиям» (Болгария 2011),

13-й Международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Абрау-Дюрсо 2011),

IV Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Новосибирск 2012),

Азиатско-Тихоокеанской конференции по зеленым технологиям с использованием силицидов и родственных материалов (APAC-Silicide 2013) (Япония, Цукуба 2013),

Международная конференция по передовой оптоэлектронике и лазерам (CAOL-2013) (Судак 2013),

10 Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (ВИТТ-2013) (Минск 2013),

IX Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск 2013),

X Международной Конференции «Кремний-2014» (Иркутск 2014),
XXIV Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь 2014),
V Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород 2014),
12-й Международной конференции «Пленки и покрытия-2015» (С.-Петербург 2015),
III Азиатской школы-конференции по физике и технологии наноструктурированных материалов (ASCO-NANOMAT), (Владивосток 2015),
EFRE-2016, Международный конгресс по энергетическим потокам и радиационным эффектам (Томск 2016),
XXVII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь 2017),
Российской конференции и Школе молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2017» (Новосибирск 2017),
Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск 2017),
VII Всероссийской конференции и Школы молодых ученых «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Казань 2018),
Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», ВИТТ-2019 (Минск 2019),
51-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва 2022),
VIII Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Казань 2022),
III международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань 2022).

9. Ценность научных работ соискателя

Ценность научных работ соискателя состоит в том, что в них изложены следующие основные результаты диссертации:

- оригинальные методики обработки поверхности тонкопленочных полупроводников с модификацией их зонной структуры.
- новые экспериментальные результаты по фотолюминесценции и фотоотклику германиевых структур при 300 К.

10. Характер результатов

Характер результатов диссертации соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

11. Выводы

Диссертация Новикова Г.А. на тему «Оптоэлектронные свойства сильнолегированных сурьмой слоев германия, полученных по ионно-лучевой технологии» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение поставленных задач. В результате проведенной работы были получены следующие результаты, имеющие практическую значимость. Импульсные отжиги вакуумно-осаждённых структур Ge/Si переводят аморфный слой Ge в поликристаллическое ($d(\text{Ge}) > 120 \text{ нм}$) или эпитаксиальное ($d(\text{Ge}) \leq 120 \text{ нм}$) состояние в зависимости от начальной толщины слоя Ge. Полученные в результате импульсного ионного отжига эпитаксиальные слои SiGe/Si содержат протяжённые дефекты, такие как дислокации и дислокационные петли. Дополнительный термический отжиг приводит к уменьшению центров безызлучательной рекомбинации и возникновению дислокационной фотолюминесценции (1.54 мкм) при температуре 77 К.

С помощью методики регистрации отражательной способности $R(t)$ осажденных слоёв Ge на различных подложках (Si, SiO₂, Al₂O₃) во время их импульсного лазерного отжига изучены быстропротекающие фазовые переходы <аморфное состояние-расплав-кристалл> в зависимости от толщины аморфного слоя и теплопроводности подложек. Установлены характерные времена жизни расплава в таких образцах, которые согласуются с расчётными данными. Определен уровень деформации растяжения в слоях германия на различных подложках, составивший 0.7-0.96%.

Импульсный ионный отжиг аморфных слоёв Ge:Sb (толщина 150-300 нм, концентрация Sb выше 10^{20} см^{-3}), осаждённых на подложку p-Ge, приводит к образованию растянуто-напряжённых монокристаллических слоёв Ge:Sb толщиной до 1.5 мкм, с концентрацией электронов до $1.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, демонстрирующих исчезновение прозрачности для длин волн выше 5 мкм, прямозонную люминесценцию на 1.65 мкм при 300 К и фотоотклик до 2.0 мкм при 300 К.

Импульсный ионный отжиг имплантированной ионами Sb монокристаллической подложки Ge приводит к исчезновению пористой структуры слоя и связанное с ней почернение поверхности, образованию растянуто-напряжённых (до 0.26%) монокристаллических слоёв Ge:Sb толщиной до 0.5 мкм, с концентрацией электронов до $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, демонстрирующих прямозонную люминесценцию на 1.61 мкм при 300 К.

Данные результаты имеют значение для области фундаментальной и прикладной науки и техники, включающей экспериментальные и теоретические исследования физических свойств полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, а также происходящих в

них физических явлений, разработку и исследование технологических процессов получения полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание оригинальных полупроводниковых приборов и интегральных устройств.

Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Новиков Герман Анатольевич проявил себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

Работа соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, включая требования п. 14.

Диссертация «Оптоэлектронные свойства сильнолегированных сурьмой слоев германия, полученных по ионно-лучевой технологии» Новикова Германа Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Заключение принято на заседании научной сессии Ученого совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» и оформлено на основании протокола заседания научной сессии Ученого совета от 17.06.2026 г. (пр. № 19) рецензентом по диссертации, назначенным Ученым советом КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН, Фаттаховым Я.В.

Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол №19 от «17» июня 2026 г.



Фаттахов Яхъя Валиевич
к.ф.-м.н., в.н.с.
КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН



Савостина Людмила Ивановна
к.ф.-м.н., учёный секретарь
КФТИ – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН

Фаттахов Яхъя Валиевич: кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»,

420029, Республика Татарстан, г.Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

Тел.: +7(843) 272-12-41, e-mail: yfattakhov@yandex.ru

Савостина Людмила Ивановна: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», ученый секретарь

420029, Республика Татарстан, г.Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

Тел.: +7(843) 231-90-86, e-mail: l.savostina@knc.ru

Калачев Алексей Алексеевич: доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», директор

420111, Республика Татарстан, г.Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

Тел.: +7(843) 231-90-00, e-mail: a.kalachev@knc.ru