

“УТВЕРЖДАЮ”



Директор ИФТТ РАН

Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. А.А. Левченко

« 18 » ноября 2024г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Куланчикова Юрия Олеговича «Исследование влияния облучения электронным пучком на свойства полупроводниковых структур», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Диссертационная работа посвящена изучению влияния облучения электронами в РЭМ на свойства структур SiO_2/Si , монокристаллических пленок GaN и монокристаллов органо-неорганического перовскита MAPbBr_3 методами растровой электронной микроскопии и вольт-фарадных характеристик. Актуальность темы диссертации Ю.О. Куланчикова определяется тем, что вопросы радиационно-стимулированной модификации различных полупроводниковых структур под воздействием низкоэнергетических электронных пучков с подпороговыми значениями энергии остаются малоизученными. В то же время понимание процессов, протекающих при таком облучении, важно, как при исследовании полупроводниковых структур методами электронной микроскопии, так и для предсказания поведения полупроводниковых приборных структур в условиях космического пространства. Следует также подчеркнуть, что при облучении любыми быстрыми частицами большая часть энергии уходит на ионизирующие потери, а исследования в РЭМ позволяют выделить влияние этой компоненты на дефектообразование в различных материалах и структурах. Не смотря на то что исследования влияния различного вида облучений на пленки SiO_2 проводятся достаточно давно, влияние облучения электронами малой энергии на динамику дислокаций в нитриде галлия и стабильность органо-неорганических перовскитов исследовано очень мало.

Целью диссертации Ю.О.Куланчикова являлось изучение механизмов дефектообразования в материалах GaN, Si/SiO_2 , MAPbBr_3 при облучении низкоэнергетическим пучком с подпороговыми значениями энергии первичных электронов. Автором диссертации успешно решены следующие задачи: изучены механизмы образования дефектов в диэлектрическом слое и на границе раздела Si/SiO_2 под воздействием низкоэнергетического электронного пучка методами измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и катодолюминесценции; исследовано влияние низкоэнергетического электронного пучка на введенные дислокации в GaN в широком диапазоне температур; проведены сравнительные исследования движения дислокаций в GaN без возбуждения и под облучением электронным пучком; исследовано влияние низкоэнергетического электронного пучка на спектры катодолюминесценции MAPbBr_3 .

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемых источников. Список используемой литературы включает 167 наименований. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, 43 рисунка и 1 таблицу.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, обозначена цель исследований и сформулированы основные задачи. Также представлены ключевые положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы. Кроме того, приведены данные об апробации результатов диссертации и личном вкладе автора.

В первой главе приведен обзор литературных данных по тематике диссертационного исследования. Кратко рассматриваются основные механизмы накопления заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик в МОП-структурах на основе SiO_2/Si . Особое внимание уделяется механизмам и специфике движения дислокаций в GaN , в том числе под воздействием электронов с подпороговой энергией. Рассматриваются механизмы повреждения органо-неорганических перовскитов, вызванные воздействием пучков электронов при проведении исследований с использованием растрового или просвечивающего электронного микроскопа. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе описаны основные методы исследований и характеристики исследуемых образцов. Приведено описание исследуемых МОП-структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, различных вариантов пленок и кристаллов GaN , а также перовскитных структур MAPbBr_3 . Дано описание методики облучения исследуемых образцов электронным пучком растрового электронного микроскопа. Приведены методы измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МОП-структур, метод и аппаратура для исследования изображений и спектров катодолуминесценции, метод наведённого тока.

В третьей главе представлены результаты исследований воздействия низкоэнергетических электронов на электрические и оптические свойства МОП-структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Исследование проводилось путём измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и спектров катодолуминесценции до и после воздействия низкоэнергетических электронов на образцы с различными типами проводимости подложки. Также представлены результаты исследования изменения C - V характеристик и спектров катодолуминесценции после термического отжига.

В четвертой главе представлены результаты исследования движения введённых дислокаций в GaN под воздействием низкоэнергетического электронного пучка и термического отжига. Исследования проводились с помощью регистрации изображений дислокаций, полученных методом катодолуминесценции в панхроматическом и монохроматическом режимах. По результатам анализа полученных изображений были сделаны выводы об основных физических механизмах, определяющих динамику движения дислокаций в GaN . Показано, что на динамику дислокаций существенное влияние оказывают стопоры, одним из видов которых являются ростовые проникающие дислокации.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния облучения электронами с подпороговым значением энергии на органо-неорганический перовскит MAPbBr_3 . Исследовано влияние энергии электронов на спектры катодолуминесценции исходного материала, также приведены результаты измерения спектров катодолуминесценции в зависимости от дозы облучения низкоэнергетическими электронами. Приведены результаты разложения полученных спектров на кривые Гаусса. Обнаружено, что в результате облучения интенсивность исходных полос излучения уменьшается и возникают новые полосы с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны исходного кристалла, что свидетельствует об образовании новых фаз. На основании анализа полученных экспериментальных данных был сделан вывод о том, что пик люминесценции при энергии 2,26 эВ соответствует переходу зона-зона в данном материале, что позволяет использовать излучение при такой энергии для мониторинга модификации этого материала. Анализ результатов показал также, что наиболее вероятным механизмом повреждения перовскита электронным пучком является радиолиз.

В заключении приведены основные выводы по результатам исследования и сделан общий вывод о решении всех поставленных задач и достижении цели. Это позволяет объективно оценить значимость проведённых исследований.

Научная новизна полученных результатов В диссертационной работе на основе исследований методами растровой электронной микроскопии и вольт-фарадных характеристик продемонстрировано, что влияние низкоэнергетического электронного пучка на характеристики приборных МОП-структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ на подложках n - и p -типа различается.

Впервые показано, что воздействие электронного пучка способно вызвать смещение дислокаций в GaN при температурах, близких к азотной, причём энергия активации радиационно-стимулированного скольжения дислокаций не превосходит 10-20 мэВ. Было показано, что динамика перемещения дислокаций в GaN обусловлена совместным влиянием двух физических процессов: преодолением барьера Пайерлса и преодолением локализованных препятствий.

Продемонстрированы результаты исследования процесса деградации монокристаллов MAPbBr₃ под воздействием низкоэнергетических электронов посредством измерения спектров катодolumинесценции. Эти результаты позволили сделать вывод о том, что наиболее вероятным механизмом повреждения MAPbBr₃ электронным пучком является радиолиз, а излучение на энергии 2,26 эВ соответствует переходу зона-зона.

Практическая значимость результатов диссертации Ю.О.Куланчикова можно сформулировать так:

- Полученные результаты исследования влияния приложенного напряжения на радиационную стойкость МОП-структур на основе Si, а также результаты исследования отжига радиационных повреждений, имеют практическое значение для прогнозирования радиационного отклика приборов на основе данных структур.

- Полученные результаты исследования движения дислокаций в GaN под действием электронного пучка, а также выявленные механизмы, определяющие динамику движения дислокаций, могут быть использованы при разработке технологии создания приборных структур на основе GaN с заданными характеристиками стойкости к воздействию ионизирующих излучений.

- Результаты исследования влияния облучения электронами на органо-неорганические перовскиты имеют практическое значение для прогнозирования деградации приборных структур на основе данного материала в условиях воздействия ионизирующих излучений.

- Определены оптимальные значения энергии электронного пучка (не менее 20 кэВ) при исследовании органо-неорганических перовскитов методом растровой электронной микроскопии, что позволяет минимизировать повреждения исследуемого образца электронным пучком при проведении исследований и тем самым повысить достоверность получаемых результатов.

Достоверность и обоснованность полученных диссертантом результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современного научного оборудования и современных методов обработки результатов. Результаты работы докладывались на 6 Российских конференциях и опубликованы в 4 статьях, входящих в перечень ВАК, и одном препринте. Результаты, выводы и основные положения, выносимые на защиту, в достаточной степени обоснованы, базируются на всестороннем анализе исследуемой проблемы и сравнении результатов с литературными данными по теме работы.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы. Публикации соискателя полностью отражают наиболее значимые моменты проведённых исследований.

Результаты данной диссертации имеют значительный потенциал для практического применения в различных отраслях науки и народного хозяйства, что подтверждает их актуальность и необходимость дальнейших исследований.

Полученные результаты могут быть внедрены в компаниях, занимающихся производством светодиодов, микросхем и солнечных панелей, таких как «Оптрон», «Элма-Малахит», «Светлана-Рост», «Микрон» для улучшения характеристик их продукции.

Результаты работы можно также рекомендовать к использованию в исследовательской работе в научных и учебных заведениях, занимающихся полупроводниковыми структурами и применением их в различных областях науки и техники, в особенности в фотонике, оптоэлектронике и лазерной физике, таких, например, как ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ФИАН,

ИОФ РАН, ИРЭ, МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Томский Государственный Университет.

По материалу представленной диссертации и по оформлению работы имеется два технических замечания:

1. В диссертационной работе в качестве основного механизма изменения свойств, исследуемых материала называется радиолиз, и утверждается, что энергии первичных электронов недостаточно для выбивания атома из узла кристаллической решётки, но не приводится никаких данных об энергиях связи в исследованных материалах и энергиях образования вакансий, а также не описываются микроскопические механизмы разрыва связей под воздействием низкоэнергетичных электронов.
2. В работе при обсуждении влияния облучения электронным пучком с энергией 10 кэВ на вольт-фарадные характеристики структур Al/SiO₂/Si автор ссылается на рисунок 16, а в подписи к рисунку написано, что облучение проводилось с энергией 2,5 кэВ.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном и методическом уровне. Представленный в работе обширный экспериментальный материал получен с помощью современных методик. Полученные автором результаты являются новыми и имеют существенное теоретическое и практическое значение, достоверны, выводы и заключения обоснованы. Положения, выносимые на защиту, полностью обоснованы.

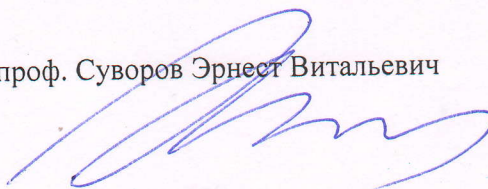
Рассматриваемая диссертационная работа является законченным исследованием и полностью соответствует требованиям ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Куланчиков Юрий Олегович, заслуживает присвоения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - «Физика полупроводников».

Диссертация рассмотрена и обсуждена на семинаре «Кристаллическая структура и фазовые превращения при атмосферном и высоких давлениях» протокол №15009 от 09 октября 2024 г.

Отзыв утвержден на заседании Ученого Совета ИФТТ РАН (протокол № 22 от 18 ноября 2024г.).

Отзыв составил:

Руководитель семинара, д.ф.-м.н., проф. Суворов Эрнест Витальевич
телефон: +7 (496) 522 83 03
e-mail: suvorov@issp.ac.ru



Подпись Суворова Э.В. удостоверяю:
Ученый секретарь ИФТТ РАН
к.ф.-м.н. Терещенко Алексей Николаевич
телефон: +7 (496) 522 46 85



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН).

Почтовый адрес:

142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

e-mail: adm@issp.ac.ru

Телефон: +7(496) 522 19 82