МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Куланчиков Юрий Олегович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧ-КОМ НА СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Специальность 1.3.11 Физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Якимов Евгений Борисович

Москва – 2024

ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Бурное развитие современных технологий и микроэлектроники, приводит к уменьшению топологических размеров приборов и структур, а это в свою очередь приводит к тому, что для проведения исследований таких структур необходимо применять методы с высоким пространственным разрешением, например, растровую электронную микроскопию. Но увеличение разрешения приводит к тому, что происходит рост дозы облучения, а при высоких дозах облучения могут происходить изменения в свойствах исследуемого материала, даже при низкой энергии (подпороговой энергии) первичных электронов, которой недостаточно для выбивания элементов из узлов кристаллической решётки. Поэтому вопрос влияния облучения электронами подпороговой энергии является важным направлением исследований для исследовательских и технологических задач. Обычно рассматриваются четыре основных механизма изменения свойств материала под воздействием облучения: смещение атомов, нагрев образца, электростатический заряд, ионизационное повреждение или радиолиз. Однако, в случае исследований в растровом электронном микроскопе, можно исключить первые три механизма, так как энергии первичных электронов недостаточно для смещения атомов из узлов кристаллических решёток, локальный нагрев, как правило, достигает небольших значений, а существенное накопление заряда возможно только в диэлектрических материалах. Следовательно, одним из основных механизмов изменения свойств материала электронами с подпороговой энергией в РЭМ является радиолиз. На данный момент, микроскопические механизмы радиолиза практически не изучены, за исключением случая рекомбинационно стимулированной реакции, когда энергия, выделяемая при рекомбинации, идет на преодоление потенциального барьера, как например, в случае движения дислокаций. Исходя из этого, для получения дополнительной информации о микроскопических механизмах изменения свойств материала радиолизом, были подобраны структуры, на которых возможны различные проявления данного механизма. Это структура Al\SiO₂\Si, плёнки и кристаллы GaN, а также органо-неорганический перовскит CH₃NH₃PbBr₃ (MAPbBr₃). Кроме того, полученные данные о влиянии электронного пучка низкой энергии на выбранные структуры, могут быть полезными для понимания механизмов ионизационных потерь для других ионизирующих излучений.

В связи с широкой областью применения приборов на основе систем металл-диэлектрикполупроводник (МДП-структур), исследование влияния электрического пучка на их свойства представляет большой интерес. Несмотря на долгую историю изучения влияния ионизирующих излучений на SiO₂, на данный момент вопросы образования дефектов в SiO₂ остаются до конца невыясненными. Из вышесказанного следует, что исследование механизмов влияния облучения электронным пучком в растровом микроскопе на свойства SiO₂ может помочь в изучении влияния ионизационных потерь на характеристики полупроводниковых приборов и, соответственно, их долговечность и радиационную стойкость.

Для GaN и гетероструктур на его основе исследования влияния ионизирующего излучения являются важными, так как в настоящее время они широко используются при изготовлении радиочастотных, оптоэлектронных, мощных электронных устройств и светодиодов.

Большинство исследований этого соединения было сосредоточено на изучении его электрических и оптоэлектронных характеристик, а исследованиям дефектов, в том числе и дислокациям, уделялось мало внимания, несмотря на тот факт, что дислокации могут быть введены в GaN при комнатной температуре [1-11] в отличии от других широкозонных материалов группы A³B⁵. Также было показано, что дислокации в GaN могут смещаться под воздействием электронного пучка [7,12,13], но механизмы движения дислокаций остаются недостаточно изученными.

В последнее время органо-неорганические перовскиты становятся всё более востребованными благодаря своим уникальным и перспективным свойствам. Они могут использоваться при создании светодиодов, транзисторов, детекторов ионизирующего излучения и солнечных батарей.

Создание эффективных и долговечных солнечных элементов на основе перовскита MAPbBr₃ привлекло внимание множества исследовательских групп, так как они имеют серьезные преимущества перед классическими кремниевыми солнечными пластинами: проще в изготовлении, дешевле и имеют возможность использования методов печати на различных типах подложек. Но, как и у любого материала есть и недостатки, например, нестабильность при длительном воздействии ионизирующего излучения и влаги. Если учесть, что солнечные элементы на основе перовскитов могут использоваться в космосе для обеспечения энергией спутников и космических станций, вопрос их радиационной стойкости становится особенно важным для прогнозирования работоспособности этих солнечных элементов в экстремальных условиях.

Учитывая все вышеперечисленные факты, проведение комплексных исследований влияния облучения низкоэнергетическим электронным пучком на генерацию дефектов в SiO₂, динамику дислокаций в GaN и деградацию органо-неорганического перовскита MAPbBr₃, является важным и актуальным направлением исследований. Также, данные исследования могут помочь в понимании эффектов деградации для других схожих материалов.

Исследования были проведены в лаборатории локальной диагностики полупроводниковых материалов ИПТМ РАН.

3

Цель диссертационной работы заключалась в получении дополнительных сведений о механизмах дефектообразования в материалах GaN, Si\SiO₂, MAPbBr₃ при облучении низкоэнергетичным электронным пучком с подпороговыми значениями энергии первичных электронов.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи.

1. Прояснить механизмы образования дефектов в диэлектрическом слое и на границе раздела Si\SiO₂ под воздействием низкоэнергетического электронного пучка, методами измерения вольтфарадных характеристик и катодолюминесценции;

2. Исследовать влияние низкоэнергетического электронного пучка на введённые дислокации в GaN в широком диапазоне температур;

3. Провести сравнительные исследования движения дислокаций в GaN без возбуждения и под облучением электронным пучком;

4. Исследовать влияние низкоэнергетического электронного пучка на спектры катодолюминесценции MAPbBr₃.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлено существенное различие в чувствительности к облучению для образцов Al\SiO₂\Si на подложках р и п-типа проводимости;

2. Впервые исследовано влияние приложенного при облучении напряжения, что позволило выявить роль электронов в образовании ловушек на интерфейсе SiO₂\Si;

3. Впервые показано, что дислокации в GaN под воздействием электронного пучка двигаются при низких температурах, близких к температуре жидкого азота. Оценена энергия активации рекомбинационно-ускоренного движения дислокаций, которая не превышает 10-20 мэВ;

4. Впервые показано, что в GaN динамикой дислокации управляют два механизма, преодоление барьера Пайерлса и преодоление локализованных препятствий, которые работают одновременно;

5. Исследована трансформация спектров катодолюминесценции MAPbBr₃ под воздействием облучения низкоэнергетичным электронным пучком. Разложение спектров позволило выявить зависимость отдельных компонент спектра от дозы облучения;

 Установлено, что использование больших энергий электронного пучка (> 20 кэВ) предпочтительно для минимизации повреждения MAPbBr₃ при изучении методами растровой электронной микроскопии.

<u>Объекты и методы исследований.</u> В качестве объектов исследований были использованы образцы GaN, выращенные разными методами с различными концентрациями легирующей примеси и плотностями дислокаций.

| Номер об- | Толщина | Метод произ- | Концентрация доно- | Плотность дислокаций |
|-----------|---------|--------------|--|---|
| разца | | водства | ров | |
| A1 | 400мкм | HVPE | (4-5) ×10 ¹⁶ см ⁻³ | 10 ⁷ см ⁻² |
| A2 | Змкм | MOCVD | 10 ¹⁷ см ⁻³ | 10 ⁹ см ⁻² |
| A3 | 4мкм | MOCVD | 2×10 ¹⁷ см ⁻³ | 10 ⁸ см ⁻² |
| A4 | 1,6мкм | MOCVD | 5×10 ¹⁹ см ⁻³ | 10 ⁸ см ⁻² |
| A5 | бмкм | ELOG | 10 ¹⁷ см ⁻³ | 10 ⁸ см ⁻² над окнами в маске |
| | | | | SiO_2 и ~ 10^6 см ⁻² в крыльях |
| A6 | 60мкм | HVPE | 10 ¹⁷ см ⁻³ | 10^8 cm^{-2} |

Таблица 1 – Образцы GaN используемые в исследованиях

В работе исследовались структуры Al\SiO₂\Si на подложке Si n-типа с концентрацией легирующей примеси фосфора около $4,6 \times 10^{14}$ см⁻³ и толщиной диэлектрического слоя SiO₂ порядка 300 нм, а также несколько структур на подложке Si p-типа проводимости с концентрацией легирующей примеси бора около 3×10^{14} см⁻³, и толщиной диэлектрического слоя SiO₂ 200 и 250 нм. Оксидный слой получали термическим окислением кремния.

Монокристаллы MAPbBr₃ были выращены методом кристаллизации при обратной температуре из эквимолярного раствора.

В исследовании применялись два растровых электронных микроскопа (РЭМ) Jeol-840A и JSM-6490 (Jeol). Облучение электронным пучком осуществлялось в обоих РЭМ при ускоряющих напряжениях от 2,5 до 30 кВ и токах пучка от 10^{-10} до 10^{-7} А. Надо отметить, что в таких условиях локальным разогревом исследуемых структур можно пренебречь, так как повышение температуры при возбуждении сфокусированным электронным пучком можно оценить как $\Delta T = 3E_bI_b/2\pi\lambda R$, где λ – теплопроводность (Вт см⁻¹К⁻¹), R – размер области генерации электрон-дырочных пар(см), E_b – ускоряющее напряжение(В), I_b – ток пучка(А). При оптимальный значениях тока и ускоряющего напряжения, локальный нагрев для SiO2, GaN и MAPbBr3 составляет 2,5, 5 и 19 градусов соответственно.

Во всех экспериментах по исследованию влияния пучка на электрические свойства SiO₂ образцы были заземлены, поэтому накопленный в SiO₂ заряд компенсировался зарядом на металлическом контакте.

Для получения информации об эффектах переноса и зарядки внутри диэлектрика применялся метод измерения вольт-фарадных характеристик, которые измеряли с помощью С—Vплоттера PAR Model 410 на частоте 1 МГц. Изображения в режиме катодолюминесценции (КЛ) были получены в РЭМ JSM-6490, оборудованном системой регистрации катодолюминесценции Gatan MonoCL3 с фотоумножителем Hamamatsu в качестве детектора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Чувствительность структур Al\SiO₂\Si к ионизирующему излучению зависит от типа проводимости подложки.

2. Вопреки сложившимися представлениям, электроны тоже участвуют в механизме образования дефектов на интерфейсе SiO₂\Si.

3. В GaN дислокации могут смещаться под воздействием низкоэнергетичного электронного пучка при низкой температуре, близкой к температуре жидкого азота.

4. На динамику дислокаций в GaN влияют два механизма, преодоление барьера Пайерлса и преодоление локализованных препятствий, которые работают одновременно.

5. Радиолиз является наиболее вероятным механизмом повреждения MAPbBr₃ при облучении электронным пучком.

6. Для минимизации повреждения органо-неорганического галогенидного перовскита MAPbBr₃, необходимо применять электронный пучок с энергией более 20 кэВ.

7. Пик катодолюминесцентного излучения на энергии 2,26 эВ в MAPbBr₃ является излучением, соответствующим переходу зона-зона, а излучения на более высоких энергиях являются результатом изменения материала под воздействием электронного пучка.

Теоретическое и практическое значение полученных результатов

1. Исследование влияния низкоэнергетического электронного пучка на дефектообразование в SiO₂ может быть полезно при создании приборов для космической отрасли, а также учёта радиационной стойкости материала при создании защитного покрытия;

2. Исследование движения дислокаций в GaN при облучении электронным пучком, может быть полезно для понимания механизмов деградации оптоэлектронных приборов. Механизмы, стимулирующие движение дислокаций, могут быть подобны проявляющимся при работе мощных светоизлучающих приборов;

3. При усовершенствовании методик выращивания плёнок и кристаллов GaN, будет уменьшаться количество локализованных препятствий, следовательно, введённые при корпусировании или шлифовке дислокации будут перемещаться на большее расстояние, что будет приводить к быстрой деградации прибора;

6

4. Исследование влияния электронного пучка на органо–неорганические галогенидные перовскиты, необходимо для понимания механизмов деградации материала, а также для прогнозирования стойкости к другим ионизирующим излучениям.

<u>Личный вклад автора</u>

В диссертационной работе представлены результаты исследований, выполненных автором в лаборатории локальной диагностики полупроводниковых материалов на базе института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов.

Личный вклад автора в настоящую работу состоит в анализе литературных данных, реализации основных экспериментальных подходов, анализе и обработке полученных результатов, формировании основных положений и выводов, участии в написании и подготовке к публикации статей, представлении результатов на конференциях.

Публикации по теме диссертационной работы.

По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ: 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 1 препринт и 6 тезисов в материалах международных и российских конференций.

Апробации работы.

Результаты исследований были представлены на всероссийских конференциях и форуме.

1. Постерный доклад. Ю.О. Куланчиков, П.С. Вергелес, Е.Б Якимов. Исследование влияния облучения низкоэнергетичным электронным пучком на вольт-фарадные характеристики SiO₂. XXVIII Российская конференция по электронной микроскопии. 7-10 сентября, 2020, г. Черноголовка, Россия.

2. Постерный доклад. Ю.О. Куланчиков, П.С. Вергелес, Е.Б Якимов, В.И. Орлов, А.Я. Поляков. Исследование свойств дислокаций в GaN методом катодолюминесценции в РЭМ. Объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике». 13-17 сентября, 2021, г. Черноголовка, Россия.

 Постерный и устный доклад. Ю.О. Куланчиков, Исследование влияния облучения электронным пучком на электрические свойства SiO₂. VII Всероссийский молодежный форум Наука будущего – Наука молодых. 23-26 августа, 2022, Новосибирск, Россия.

4. Постерный доклад. Ю.О. Куланчиков, П.С. Вергелес, Е.Б Якимов. Исследование влияния облучения низкоэнергетическим электронным пучком на люминесцентные характеристики SiO₂. XXIX Российская конференция по электронной микроскопии(онлайн). 29 – 31 августа, 2022, г. Черноголовка, Россия.

5. Устный доклад. П.С. Вергелес, Ю.О. Куланчиков, Е.Б Якимов. Исследование влияния облучения низкоэнергетичным пучком на свойства свежевведенных дислокаций GaN. III Международная конференция «Физика конденсированных состояний». 29-ое мая - 3-е июня, 2023, г. Черноголовка, Россия.

6. Устный доклад. Ю.О. Куланчиков, П.С. Вергелес, Е.Б Якимов. Исследования влияния облучения электронным пучком на электрические свойства SiO₂. Вторая объединённая конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике». 13 – 16 ноября, 2023, г. Черноголовка, Россия.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, 5 глав, заключения и списка используемых источников. Работа содержит 43 рисунка и 1 таблицу. Список используемой литературы включает 167 наименований. Общий объём диссертационной работы составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность исследований, указана цель и определены основные задачи, описана научная новизна и значимость полученных результатов.

В первой главе обоснована мотивация проведения исследований по теме диссертационной работы. На основе изученной литературы, представлен обзор информация о воздействии ионизирующего пучка на структуры металл-диэлектрик-полупроводник, описаны основные виды зарядов в объёме диэлектрика. Для GaN описаны свойства, на которые могут влиять дислокации, а также рассмотрены литературные данные о движении дислокаций в GaN. Для MAPbBr₃ проведён анализ последних исследований, посвящённых радиационной стойкости гибридных органо–неорганических галогенидных перовскитов, а также рассмотрены возможные механизмы повреждения перовскита под воздействием электронного пучка. По итогам первой главы был проведен анализ и определены основные задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе приведена информация об исследованных образцах GaN, структурах Al\SiO₂\Si и перовските MAPbBr₃, описан процесс введения дислокаций в образцы GaN, кратко описан метод выращивания MAPbBr₃, приведена физико-математическая модель расчёта идеальной вольт-фарадной характеристики для определения объёмного заряда и плотности поверхностных состояний.

8

Описаны методы исследований, используемые в данной работе: метод облучения низкоэнергетичным электронным пучком, катодолюминесценция, наведённый ток, метод измерения вольт-фарадных характеристик, высокотемпературный отжиг. Для каждого метода указаны условия проведения эксперимента. Также перечислены все используемые установки и их характеристики.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследований структуры Al\SiO₂\Si.

В первом разделе **третьей главы** изучено влияние облучения низкоэнергетичным электронным пучком на образцы с подложками р и п-типа проводимости, полученных в одинаковых условиях термического окисления, а также сравнение с предыдущими результатами, полученными для образца на подложке p-типа.

На рисунке 1 представлены C-V характеристики до и после облучение, образцов на подложке п-типа проводимости, 1(а), и на подложках р-типа проводимости рисунок 1(б,в), выполненных при разных условиях окисления. Облучение проводилось с ускоряющим напряжением 2,5 кВ и током пучка 1нА. Видно, что влияние облучения низкоэнергетичным электронным пучком на образцы б и в схоже, в обоих случаях наблюдается изменение наклона кривой, без существенного смещения всей кривой в область отрицательных напряжений, что объясняется образованием ловушек на границе раздела Si/SiO₂ [14,15]. Как и в работе [16] стоит отметить, что после облучения низкоэнергетическим электронным пучком с энергией 2,5 кэВ кривая C-V в точке инверсии практически не смещается. Таким образом, представляется обоснованным предположить, что в структурах, облученных электронами с энергией 2,5 кэВ, сдвиг напряжения, определяемый "объемным" зарядом, достаточно мал и основные изменения заключаются в образовании ловушек на границе раздела Si/SiO₂. Эти ловушки могут захватывать дырки из Si (или инжектировать электроны в Si) при измерениях C-V характеристик. Однако при используемых в данной работе параметрах электронного пучка, первичные электроны не должны достигать границы раздела SiO₂/Si. Следовательно, образование ловушек на границе раздела Si/SiO₂ можно объяснить только переносом носителей заряда в объеме оксидного слоя и/или обменом носителями заряда с кремниевой подложкой [14].

В случае образца на подложке n-типа проводимости, облучение не оказывает влияния на изменение наклона вольт-фарадных характеристик, даже при дозах облучения в разы больше, чем для образцов на подложке p-типа. Но стоит отметить уменьшение ёмкости в области инверсии для образца на подложке n-типа. Данный эффект можно объяснить стимулированной диффузией водорода, из оксидного слоя, с дальнейшей пассивацией фосфора. Этим же можно объяснить и уменьшение емкости в области обогащения, поскольку полная пассивация фосфора вблизи поверхности может приводить к образованию высокоомного слоя.



Рисунок 1 – C-V характеристики до и после облучение, структуры на подложке n-типа проводимости (а), и двух структур на положках p-типа проводимости произведённых при разных условиях окисления (б,в). Облучение проводилось с ускоряющим напряжением 2,5 кВ и током пучка 1нА

Также были проведены исследования влияния приложенного напряжения при облучении структур. В работе [17] было показано, что если во время облучения к структуре на подложке ртипа приложить напряжение, то это может существенным образом повлиять на эффекты накопления заряда как в объеме оксидного слоя, так и на интерфейсе SiO₂/Si. Поэтому представляло интерес сравнить влияние напряжения, приложенного во время облучения, на эффект накопления заряда в структурах с подложкой п-типа проводимости. На рисунке 2 представлены C–Vхарактеристики, демонстрирующее влияние приложенного в процессе облучения напряжения для структур n- и p-типа проводимости. Прежде всего, следует отметить, что качественно влияние приложенного напряжения в обоих типах структур подобно. Следует отметить, что, если на образце с подложкой n-Si приложенное положительное напряжение в основном изменяло наклон C–V-кривых, т.е. увеличивало плотность состояний на границе раздела, то на подложке p-Si такое напряжение приводило к существенному сдвигу C–V-кривых в сторону отрицательных напряжений, т.е. к увеличению положительного заряда в оксиде. Повышение эффективности процесса генерации ловушек на границе раздела SiO₂/n-Si можно объяснить инжекцией горячих электронов из подложки n-типа [18, 19]. Действительно, поскольку, согласно [20], пленка SiO₂ при облучении становится проводящей, доля напряжения, приложенная к полупроводнику, увеличивается. А деградация полевых транзисторов наблюдалась уже при приложенных к затвору напряжениях порядка нескольких вольт [18, 19]. Генерация неравновесных носителей заряда электронным пучком и их последующая диффузия, и дрейф приводят к тому, что распределение электрических полей в SiO₂ может отличаться от сформировавшегося после окончания облучения, что существенно усложняет анализ результатов, особенно результатов с приложенным внешним полем.

Также данные результаты указывают на то, что при облучении с положительным напряжением, когда дырки отталкиваются к интерфейсу, эффект облучения усиливается. А при облучении с отрицательным напряжением, электроны отталкиваются к интерфейсу, влияние облучения также присутствует. Данный результат указывает на то, что и электроны, и дырки участвуют в образовании состояний на интерфейсе.



Рисунок 2 – Изменение С–V-характеристик исследуемой структуры при облучении с напряжением смещения +10, 0, -10 В. а – подложка Si p-типа (доза облучения 6.25 × 10⁻² мкКл/см²); б – подложка Si n-типа (доза облучения 100 мкКл/см²). Энергия падающего пучка Eb = 10 кэВ

Для исследования стабильности дефектов, образуемых в результате облучения низкоэнергетичным электронным пучком, была исследована релаксация C-V кривых при термическом отжиге. С-V кривые измерялись после 10 минут изохронного отжига структур, облучённых электронами с энергией 10 кэВ дозой 90 мкКл/см². Как и в работе [14] для МДП-структур на подложке р-типа, вольт-фарадные характеристики структуры n-типа при температуре 483 К полностью восстанавливались до исходного состояния и соответственно происходила, как релаксация накопленного объемного заряда, так и отжиг или пассивация образованных при облучении состояний на границе раздела (рисунок 3). Похожие температуры отжига наблюдались и в других работах [21,22]. В то же время для восстановления емкости в режиме инверсии достаточно было отжига при 393 К. Что подтверждает предположении про уменьшение ёмкости в области инверсии за счёт пассивации фосфора водородом.



Рисунок 3 – C-V характеристики после изохронного термического отжига при различных температурах для образца на подложке n-типа.

Во втором разделе **третьей главы** представлены результаты изучения влияния облучения низкоэнергетическим электронным пучком на люминесцентные свойства SiO₂.

На рисунке 4 приведены спектры исследуемых структур до и после облучения. После часового облучения с током пучка 1нА в спектре образца на подложке р-типа проводимости, произошли следующие изменения. Интенсивность линии 1,9 эВ увеличилась, и появились два новых пика на 2,1-2,2 эВ и 2,6-2,7 эВ. На рисунке 4 (б) приведены спектры образца на подложке n-типа с доминирующей полосой люминесценции на энергии 2,6 эВ. После часового облучения с током пучка 1нА интенсивность основной линии образца и линии на энергии 2,2 эВ увеличились, при этом не произошло изменений для линии люминесценции 1,9 эВ рисунок 4 (б). Также стоит отметить, что интенсивность люминесценции с энергией 1,9 эВ на втором образце ниже, чем на первом. Ответственным за полосу люминесценции 1,9 эВ, является немостиковый кислород [14, 23-24].

Полученные спектры катодолюминесценции указывают на то, что при облучении происходит увеличение концентрации немостикового кислорода, а также некоординированного Si. Это говорит о том, что при облучении, электронами низкой энергии, происходит разрыв связей, следовательно, могут рождаться новые дефекты. А рост пика люминесценции на энергии 2,2 эВ подтверждает высказанное нами предположение в статье [14], что в структурах, облученных электронами с низкой энергией основные изменения заключаются в образовании ловушек на границе раздела Si/SiO₂. Данный вывод можно сделать, опираясь на результаты работы [25], так как в ней утверждается, что пик люминесценции на энергии 2,2 эВ соответствует ненасыщенным связям в кремнии, расположенным на границе раздела Si-SiO₂.



Рисунок 4 – Спектры исследуемых структур и разложение по Гауссу после часа облучения. а – образец 1 кремний на подложке р-типа, б – образец 2 кремний на подложке п-типа

Также представляло интерес исследовать влияние температурного отжига на спектры люминесценции. На рисунке 5 представлены спектры до облучения, после облучения электронным пучком с энергией 10 кэВ и после отжига при температуре 483 К. Данный эксперимент проводился по аналогии с отжигом вольт-фарадных характеристик, но исходя из спектров можно сделать вывод, что отжиг при данной температуре никак не влияет на спектр люминесценции.

Полученные данные вольт-фарадных измерений и катодолюминесценции качественно совпадают, но картина оказалась намного сложней. По всей видимости, дефекты, которые влияют на изменения вольт-фарадных характеристик в основном являются безизлучательными, что делает невозможным их определение методом катодолюминесценции, поскольку C-V метод определяет все электрически активные дефекты, а катодолюминесценция только центры, на которых происходит излучательная рекомбинация.



Рисунок 5 – Спектры образца на подложке n-типа проводимости после изохронного термического отжига.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты исследований GaN.

В главе представлены результаты исследований движения введённых дислокаций под воздействием низкоэнергетического электронного пучка. На рисунке 6 представлены изображения дислокаций от царапины до облучения и после облучения при температуре жидкого азота. Длина пробега дислокации, после облучения, около 10 мкм. Оценка энергии активации рекомбинационно-ускоренного скольжения дислокаций дала величину не более 0,01 эВ.



Рисунок 6 – Панхроматические КЛ-изображения дислокаций до облучения (слева) и после облучения электронным пучком при низкой температуре (справа).

Облучение низкоэнергетическим электронным пучком увеличивает подвижность дислокаций (так называемое рекомбинационно-ускоренное скольжение дислокаций (recombinationenhanced dislocation glide – REDG)) в GaN. Следует отметить, что в GaN при всех измерениях REDG подвижными становится лишь небольшое количество дислокаций, что позволяет предположить, что закрепление на препятствиях существенно влияет на движение дислокаций. Таким образом, представляется, что для описания динамики дислокаций в GaN следует оценить влияние, как барьера Пайерлса, так и препятствий. Поэтому в главе рассмотрена роль локализованных препятствий как эффективных стопоров дислокаций. При используемой энергии пучка 10 кэВ, размер области генерации избыточных носителей, как следует из моделирования методом Монте-Карло, составляет около 0,5 мкм [26], длина диффузии в исследуемом образце составляет ≈ 0.6 мкм [7]. Таким образом, разумно предположить, что концентрация неравновесных носителей на расстояниях от положения пучка электронов, превышающих несколько микрон, пренебрежимо мала. Обнаружено, что дислокации распространяются на расстояния на порядок большие. Следовательно, рекомбинация носителей не может способствовать их скольжению. Другим возможным предположением может быть то, что дислокации захватывают неосновные носители (дырки), и изменение их зарядового состояния может способствовать их скольжению. Однако при 300 К скорость дислокации меньше, чем 1×10^{-4} см·с⁻¹ [8], следовательно, потребуется более 10 с, чтобы преодолеть расстояние 10 мкм. Это маловероятно, поскольку без возбуждения электронным пучком дислокация должна перезаряжаться за счет захвата электронов в течение времени, меньшего, чем 1 мкс. Таким образом, можно сделать вывод, что энергия, выделяющаяся при рекомбинации избыточных носителей, перенаправляется на открепление дислокаций от стопоров, и стопоры, но не барьер Пайерлса, являются основной причиной, ограничивающей расстояние перемещения дислокаций в GaN в области сравнительно низких напряжений.

Поскольку количество и мощность препятствий должны зависеть от метода выращивания и концентрации дефектов, для этой цели полезно сравнить динамику дислокаций в разных слоях GaN. Далее будет рассмотрена зависимость длины пробега дислокаций от метода получения плёнок и кристаллов GaN, без воздействия электронного пучка. Поскольку переход от механизма движения дислокаций с образованием двойного перегиба к преодолению локализованных препятствий должен зависеть от плотности и мощности препятствий [27], можно ожидать, что скорость перемещения дислокаций и расстояние перемещения дислокаций могут значительно варьироваться от кристалла к кристаллу в зависимости от плотности и/или мощности препятствий. КЛ-изображения дислокаций, возникших при нагрузке 1 Н в образцах А1–А4, показаны на рисунке 7. Можно видеть, что, несмотря на использование одинаковой нагрузки и схожих концентраций легирующей примеси в образцах А1–А3, размер розеток отличается в несколько раз. Более того, в то время как в образцах А1 и А3, в которых расстояния перемещения дислокаций больше, чем в других образцах, можно легко увидеть дислокационные ветви, идущие от углов отпечатка, в образцах А2 и А4 дислокационные розетки, похожие на звезды Давида, образуются из-за поперечного скольжения (смещения винтовой дислокации из первичной плоскости скольжения в другую), даже при деформации при комнатной температуре. Для сравнения, в образце АЗ розетки дислокаций, похожие на звезду Давида, наблюдались только после деформации при T> 573 К [8].



Рисунок 7 – КЛ - изображения розеток дислокаций, сформированных при нагрузке 1 Н при комнатной температуре в образцах A1 (a), A2 (б), A4 (в) и A3 (г). Eb = 10 кэВ.

Далее были проведены исследования влияния термического отжига на движение введённых дислокаций. Типичные модификации розетки дислокаций, образованной в результате отжига в образцах A1 и A6, показаны на рисунках 8 и 9 соответственно. Можно видеть, что даже в образце, наиболее близком к совершенству, A1, лидирующие дислокации, по существу, не изменяются до 473 K, хотя плотность дислокаций в области с высоким сдвиговым напряжением увеличивается. Отжиг при 573 K дополнительно приводит к заметному увеличению числа дислокаций, но расстояние перемещения от центра отпечатка существенно не изменяется. Увеличение расстояния перемещения происходит только при повышении температуры отжига выше 623 K. В образце A6, выращенном с использованием того же метода с почти такой же концентрацией доноров, но с более высокой плотностью ростовых дислокаций, расстояние перемещения дислокаций практически не меняется вплоть до 773 K, хотя количество дислокаций и событий поперечного скольжения заметно увеличивается (рисунок 9). В качестве объяснения можно предположить, что дислокации, образовавшиеся при деформировании, закрепляются на ростовых дислокациях и не могут преодолеть данный барьер, из-за чего увеличивается вероятность поперечного скольжения дислокаций.



Рисунок 8 – Фрагмент розетки дислокаций в образце A1, измеренный при 365 нм после деформации (а) и последующего отжига при 473 (б), 573 (в) и 673 К (г) в течение 10 мин. Eb = 10 кэВ.



Рисунок 9 – Фрагмент розетки дислокаций в образце А6, измеренный в панхроматическом режиме после деформации (а) и последующего отжига при 473 (б), 573 (в), 673 (г) и 773 К (д) в течение 10 мин. Eb = 10 кэВ.

В пятой главе приведены экспериментальные результаты исследования влияния облучения на MAPbBr₃.

В главе представлены результаты изучения зависимости спектров КЛ от энергии пучка E_b (т.е. от глубины проникновения электронного пучка). Как видно на рисунке 10, на котором показаны спектры, нормализованные на максимальную интенсивность пика, положение максимума смещается в сторону более низких энергий при увеличении E_b , с 2,31 эВ при 2,5 кэВ до 2,26 эВ при 30 кэВ. Аналогичное красное смещение пика излучения с 2,317 при $E_b = 2$ кэВ до 2,271 эВ при $E_b = 30$ кэВ ранее наблюдалось в [28]. Кроме того, спектры, наблюдаемые в [28], были асимметричными с резким краем на стороне высоких энергий, а ширина пика на половине максимума уменьшалась от 100 при 2 кэВ до приблизительно 78 мэВ при 30 кВ. Такое поведение было объяснено реабсорбцией фотонов высокой энергии, когда глубина выхода КЛ увеличивается с увеличением E_b . Это означает, что пик излучения, измеренный при 2 кэВ, соответствует реальному излучению зона-зона, в то время как спектры, измеренные при больших энергиях пучка, изменяются из-за реабсорбции. В нашем исследовании, помимо красного смещения максимума КЛ при снижении E_b , ширина пика на половине максимума также снижается с 90-95 мэВ при 2,5 и 5 кэВ до 80 мВ при 30 кэВ. Однако и красное смещение, и уменьшение ширины пика на половине максимума меньше, чем в [28]. При разложении спектров, измеренных в настоящей работе, пик излучения 2,26 эВ определяется при всех E_b . Принимая во внимание, что интенсивность этого пика быстро уменьшается с увеличением дозы LEEBI, разумно предположить, что именно этот пик связан с переходом зона-зона в MAPbBr₃, а его затухание с увеличением дозы указывает на разложение MAPbBr₃.



Рисунок 10 – Нормированные спектры КЛ, измеренные при различных энергиях пучка.

Если это так, то наблюдаемое красное смещение пика КЛ при изменении E_b в основном определяется не реабсорбцией, хотя полностью исключить ее нельзя, а разложением MAPbBr₃. Приведённые в литературе значения запрещенной зоны в MAPbBr₃ варьируются от 2,24 [29] до 2,344 [30] эВ, поэтому литературные данные не могут пролить свет на реальную энергию излучения перехода зона-зона. Однако следует отметить, что в [31] пик фотолюминесценции монокристалла MAPbBr₃ также наблюдался при 2,259 эВ, в то время как пик фотолюминесценции тонкой пленки смещен до значения 2,312 эВ.

Разложение спектров, измеренных при 2,5 и 30 кэВ, показывает, что, в то время как спектр, измеренный при 30 кэВ, может быть хорошо аппроксимирован двумя полосами излучения с энергиями 2,23 и более интенсивным 2,26 эВ (рисунок 11(а)), то в спектре, измеренном при 2,5 кэВ, полоса 2,23 эВ практически исчезает, относительная интенсивность полосы 2,26 эВ уменьшается и появляется новая интенсивная полоса излучения с энергией 2,309 эВ (рисунок 11(б)).



Рисунок 11 – Спектры КЛ при комнатной температуре, полученные при энергии пучка 30 кэВ (а) и 2,5 кэВ (б) (синие открытые круги). Подгоночные кривые и отдельные гауссовы полосы показаны зелеными и пурпурными линиями, соответственно.

На рисунке 12 представлена трансформация спектров КЛ, полученная при Eb= 30 (а) и 2,5 кэВ (б) после серии последовательных LEEBI. Видно, что при обеих энергиях спектры значительно смещаются в сторону более высоких энергий с увеличением дозы. Качественно изменения спектров схожи для обеих энергий. То же самое наблюдается и при других энергиях в диапазоне 5-25 кэВ. Однако, как видно из рисунка 12, при 2,5 кэВ соответствующие изменения спектров происходят при существенно меньших дозах облучения. Как показано выше, небольшое изменение спектров КЛ при энергии 2,5 кэВ и дозе 120 мкКл/см² может быть обнаружено даже при первом измерении спектра, в то время как при энергиях выше 10 кэВ оно не наблюдается. Так как изменение спектров качественно одинаково для всех энергий пучка, детальные исследования преобразования спектра КЛ, обусловленного LEEBI, были проведены при 30 кэВ, при которых изменение происходит медленнее.



Рисунок 12 – Эволюция спектров КЛ в зависимости от дозы облучения при Eb=30 (a) и

2,5 кэВ (б).

Как видно из рисунка 12, LEEBI приводит к существенным изменениям как интегральной интенсивности, так и формы спектров КЛ, и качественно такое поведение очень похоже на то, которое ранее наблюдалось на других перовскитных материалах, то есть заметное снижение интенсивности излучения и сдвиг максимума излучения в область больших энергий [32]. Следует отметить, что эффект LEEBI на спектры КЛ MAPbI₃ наблюдался при близких дозах облучения, однако зависимость от E_b обратная, т.е. LEEBI был более выражен при 10 кэB, чем при более низких энергиях [33].

Изменение энергии спектров излучения в зависимости от дозы облучения, является довольно необычным явлением, о котором ранее не сообщалось в исследованиях эффекта LEEBI на перовските или других полупроводниковых материалах. Для объяснения появления таких полос можно рассмотреть следующий вариант — это формирование промежуточных фаз с переменным составом [33]. Как показано в [34], на поверхности может образовываться поликристаллическая фаза, которая также может приводить к синему смещению излучения [31]. Образование новых фаз в условиях LEEBI может приводить к высоким упругим напряжениям, которые также могут смещать полосу излучения. Наличие таких напряжений проявляется в растрескивании поверхности при высокодозном облучении. Такие изменения вероятнее всего происходят благодаря радиолизу, поскольку он является наиболее вероятным механизмом повреждения при LEEBI. Следует также отметить, что, как показано в [35], разложение приповерхностных слоев на начальной стадии LEEBI может происходить за счет десорбции CH₃NH₂ в присутствии гидроксильных радикалов (OH) и гидроксид-ионов (OH-), образующихся при стимулированном LEEBI разложении воды, адсорбированной на поверхности. Возможность разложения воды под воздействием LEEBI с последующей диффузией водорода уже была продемонстрирована на примере Si [36].

Если основным механизмом повреждения MAPbBr₃ при LEEBI действительно является радиолиз, то скорость разложения должна зависеть от концентрации неравновесных носителей, генерируемых электронным пучком. Эта концентрация может быть оценена как $B \times G/(D \times R)$, где G - общая скорость генерации носителей, D - коэффициент диффузии носителей и B - параметр (0,1 < B < 0,4) [37]. G может быть рассчитано как общая внесённая энергия, деленная на энергию ионизации Ei, которая может быть оценено как $E_i = 2,8 \times E_g + 0,6$ эB, где E_g - ширина запрещенной зоны [38,39]. Таким образом, G пропорционален общей внесённой энергии, то есть к произведению I_b×E_b, и поскольку R пропорционально $E_b^{1,75}$, при фиксированном I_b избыточная концентрация носителей пропорциональнаEb^{-0,75}. Эта зависимость близка к экспериментально полученной зависимости (D₀ ~ $E_b^{0,7}$) для затухания полосы излучения 2,26 эB, что позволяет сделать вывод о

том, что скорость разложения MAPbBr₃ пропорциональна избыточной концентрации носителей, что хорошо коррелирует с механизмом радиолиза.

В результате радиолиза происходит разложение MAPbBr₃, и образующиеся летучие продукты могут диффундировать из образцов. Такой механизм широко обсуждается, и в качестве возможных путей разложения рассматривались следующие процессы: диссоциация иона метиламмония ((CH₃NH₃+) на CH₃NH₂ и водород, которые оба являются высокоподвижными при комнатной температуре [40]; и диссоциация MAPbBr₃ на MABR, Br₂ и Pb. Предполагалось, что MAPbI₃ для диссоциации через промежуточную надстройку MAPbI_{2.5} в конечный PbI₂ [34] или путем разрыва связей C-N, что приводит к образованию газообразных продуктов NH₃ и HI [41].

Общие выводы по работе

В процессе подготовки диссертационной работы были выполнены и достигнуты все поставленные задачи и цели.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Тип проводимости подложки структуры Al\SiO₂\Si влияет на чувствительность оксидного слоя к облучению.

2. Электроны, так же как и дырки, участвуют в дефектообразовании в оксиде кремния.

3. Введённые дислокации в GaN могут смещаться под воздействием электронного пучка при температуре, близкой к температуре жидкого азота.

4. Динамикой дислокаций в GaN управляют два механизма, преодоление барьера Пайерлса и преодоление локализованных препятствий, которые работают одновременно.

5. Радиолиз является наиболее вероятным механизмом повреждения MAPbBr₃ при облучении электронным пучком подпороговой энергии.

6. Для минимизации повреждения материала MAPbBr₃, необходимо использовать электронный пучок с энергией более 20 кэВ.

23

Список цитируемой литературы

- Bradby E. et al. Indentation-induced damage in GaN epilayers // Appl. Phys. Lett. 2002, 80, 383– 385.
- 2 Jahn U. et al. Indentation of GaN: A Study of the Optical Activity and Strain State of Extended Defects // Phys. Status Solidi A 2002, 192, 79–84.
- Jian S.R. Berkovich indentation-induced deformation behaviors of GaN thin films observed using cathodoluminescence and cross-sectional transmission electron microscopy // Appl. Surf. Sci. 2008, 254, 6749–6753.
- Huang J. et al. Dislocation cross-slip in GaN single crystals under nanoindentation // Appl. Phys.
 Lett. 2011, 98, 221906.
- Ratschinski I. et al. Dislocations and cracks at vickers indentations in (0001) GaN single Crystals
 // Philos. Mag. Lett. 2011, 90, 565–571.
- 6 Medvedev O.S., Vyvenko O.F., Bondarenko, A.S. On the luminescence of freshly introduced ascrew dislocation in low-resistance GaN // Semiconductors 2015, 49, 1181–1186.
- 7 Vergeles P.S. et al. Recombination and optical properties of dislocations gliding at room temperature in GaN under applied stress // J. Alloys Compd. 2019, 776, 181.
- 8 Orlov V.I. et al. Estimations of Low Temperature Dislocation Mobility in GaN. Phys // Status Solidi A 2019, 216, 1900163.
- 9 Vergeles P.S., Yakimov E.B., Orlov V.I. Comparative Study of Optical and Electrical Properties of Grown-In and Freshly Introduced Dislocations in GaN by SEM Methods // J. Electr. Mater. 2020, 49, 5173–5177.
- 10 Orlov V.I. Estimations of Activation Energy for Dislocation Mobility in p-GaN // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2021, 10, 026004.
- 11 Vergeles P.S. et al. Communication—Electron-Beam Stimulated Release of Dislocations from Pinning Sites in GaN // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2022, 11, 015003.
- 12 Polyakov A.Y. et al. Deep traps determining the non-radiative lifetime and defect band yellow luminescence in n-GaN // J. Alloys Compd. 2016, 686, 1044–1052.
- E. B. Yakimov et al. Radiation enhanced basal plane dislocation glide in GaN // Jpn. J. Appl. Phys. 2016, 55, 05FM03.
- 14 Куланчиков Ю. О., Вергелес П. С.,Якимов Е. Б. Влияние облучения пучком низкоэнергетических электронов на вольт-фарадные характеристики структуры Al/SiO2/Si // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 2. С. 112—117.

- 15 Oldham T. R., McLean F. B. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, 50, №3, 483-498.
- Schwank J. R. et al. Radiation Effects in MOS Oxides // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2008, 55, №4, 1833-1853.
- 17 Куланчиков Ю.О. (2020). Магистерская диссертация. Исследование влияния облучения электронным пучком на МДП структуру алюминий-оксид кремния-кремний, 49, Москва.
- 18 Di Santo G. et al. Spatial, energy, and time-dependent study of surface charging using spectroscopy and microscopy techniques // J. Appl. Phys. 2007. V. 102, Iss. 11. P. 114505.
- Cornet N. et al. Electron beam charging of insulators with surface layer and leakage currents //
 J. Appl. Phys. 2008. V. 103, Iss. 6. P. 064110.
- Fitting H.-J. et al. Selfcon-sistent electrical charging in insulators // J. Europ. Ceramic Soc.
 2005. V.25, Iss.12. P. 2799—2803.
- Lelis A. J. et al. The nature of the trapped hole annealing process // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989.
 V. 36. P. 1808.
- 22 Zhang J. et al. Study of radiation damage induced by 12 keV X-rays in MOS structures built on high-resistivity n-type silicon // J. Synchrotron Rad., 2012. V.19. P. 340.
- Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide // J.
 Non-Cryst. Solids, 1998. V. 239, № 1-3. P. 16.
- 24 Skuja L. et al. Defects in oxide glasses // Phys. Status Solidi (c), 2005. Vol. 2, №1, P.15.
- 25 Baraban A.P. et al. Luminescence of SiO₂ layers on silicon at various types of excitation // Journal of Luminescence, 2019. V. 205, P. 102–108.
- 26 Yakimov E.B. et al. Movement of basal plane dislocations in GaN during electron beam irradiation // Applied Physics Letters, 2015. P. 106.
- 27 Messerschmidt U. Dislocation Dynamics during Plastic Deformation; Springer Series in Materials Science; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; P. 113–116.
- 28 Diab H. et al. Impact of Reabsorption on the Emission Spectra and Recombination Dynamics of Hybrid Perovskite Single Crystals // J. Phys. Chem. Lett., 2017. V. 8, P. 2977-2983.
- 29 Liu Y. et al. Two-inch-sized perovskite CH3NH3PbX3 (X= Cl, Br, I) crystals: growth and characterization // Adv. Mater., 2015. V. 27, P 5176-5183.
- 30 Fang X. et al. Effect of excess PbBr2 on photoluminescence spectra of CH3NH3PbBr3 perovskite particles at room temperature // Appl. Phys. Lett., 2016. V. 108.
- Kanemitsu Y. et al. Optical responses of lead halide perovskite semiconductors // Semicond. Sci.
 Technol., 2020.V. 35, P. 093001.
- 32 Guthrey H. and Moseley J. A Review and Perspective on Cathodoluminescence Analysis of Halide Perovskites // Adv. Energy Mater., 2020. V. 10, P. 1903840.

- 33 Xiao C. et al. Mechanisms of Electron-Beam-Induced Damage in Perovskite Thin Films Revealed by Cathodoluminescence Spectroscopy // J. Phys. Chem. C, 2015. V. 119, P. 26904.
- 34 Nickel N.H. et al. Unraveling the Light-Induced Degradation Mechanisms of CH3NH3PbI3 Perovskite Films // Adv. Electron. Mater., 2017. V. 3, P. 1700158.
- 35 Yadavalli S.K. et al. Electron-beam-induced cracking in organic-inorganic halide perovskite thin films // Scripta Material., 2020. V. 187, P. 88-92.
- 36 Choi J.I.J. et al. Atomic-scale view of stability and degradation of single-crystal MAPbBr3 surfaces // J. Mater. Chem. A, 2019. V. 7, P. 20760-20766.
- 37 Feklisova O.V., Yakimov E.B., Yarykin N.A. Effect of irradiation in SEM on electrical properties of silicon // Mater. Science & Engineering B. 1996. V. 42. P. 274 -276.
- Yakimov E.B. Electron beam induced excess carrier concentration // Phys. Status Solidi C, 2017.
 V. 14, P. 1600266.
- 39 Yakimov E.B. et al. Experimental estimation of electron–hole pair creation energy in β-Ga2O3
 // Appl. Phys. Lett., 2021. V. 118, P. 202106.
- 40 Klein C.A. Bandgap Dependence and Related Features of Radiation Ionization Energies in Semiconductors // J. Appl. Phys., 1968. V. 39, P. 2029–2038.
- 41 Chen S. et al. General Decomposition Pathway of Organic–Inorganic Hybrid Perovskites through an Intermediate Superstructure and its Suppression Mechanism // Adv. Mater., 2020. V. 32, P. 2001107.

Список публикаций по теме диссертации

 P. S. Vergeles, Yu. O. Kulanchikov, E.B Yakimov, Charging Effects in Al-SiO₂-p-Si Structures After Low-Energy Electron Beam Irradiation // Journal of electronic materials, 49 (2020) 5178-5183. 10.1007/s11664-020-08080-3

2. Yu. O. Kulanchikov, P. S. Vergeles, E.B Yakimov, Investigation of the Effect of Irradiation by a Low-Energy Electron Beam on the Capacitance-Voltage Characteristics of SiO₂ // Journal of surface investigation, 15 (2021) 1045-1048. 10.1134/S1027451021050323

3. P. S. Vergeles, Yu. O. Kulanchikov, A. Y. Polyakov, E.B Yakimov, S. J. Pearton, Communication-Electron-Beam Stimulated Release of Dislocations from Pinning Sites in GaN // ECS Journal of Solid State Science and Technology, 11 (2022) 015003. 10.1149/2162-8777/ac4bae

4. E.B. Yakimov, Yu.O. Kulanchikov, P.S. Vergeles, An Experimental Study of Dislocation Dynamics in GaN. // Micromachines, 14 (2023) 1190. 10.3390/mi14061190

5. Препринт: Yu. O. Kulanchikov, P.S. Vergeles, K. Konstantinova, A.R. Ishteev, D.S. Muratov, E.E. Yakimov, E.B. Yakimov, D.S. Saranin // MAPbBr₃ monocrystals under electron beam radiolysis and degradation revealed by cathodoluminescence spectroscopy. 10.48550/arXiv.2305.06783

Тезисы

1. Куланчиков Ю.О., Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Исследование влияния облучения низкоэнергетичным электронным пучком на вольт-фарадные характеристики SiO2. XXVIII Российская конференция по электронной микроскопии 2020. Сборник тезисов том 3 – 255, 81-82. 10.37795/RCEM.2020.85.72.070

2. Куланчиков Ю.О. Вергелес П.С., Якимов Е.Б., Орлов В.И., Поляков А.Я. Исследование свойств дислокаций в GaN методом катодолюминесценции в РЭМ Объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» 2021. Тезисы докладов. С. 17-19

3. Куланчиков Ю.О. Исследование влияния облучения электронным пучком на электрические свойства SiO2. Седьмой Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего - наука молодых». Сборник тезисов докладов участников. С. 280

4. Куланчиков Ю.О. Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Исследование влияния облучения низкоэнергетическим электронным пучком на люминесцентные характеристики SiO2. XXIX Российская конференция по электронной микроскопии 2022. Сборник тезисов .421-423

5. Кулачиков Ю.О., Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Исследование влияния облучения низкоэнергетичным пучком на свойства свежевведенных дислокаций GaN. III Международная конференция «Физика конденсированных состояний» ФКС-2023, Сборник тезисов. С. 161. 10.26201/ISSP.2023/FKS-3.158

6. Куланчиков Ю.О., Вергелес П.С., Якимов Е.Б. Исследования влияния облучения электронным пучком на электрические свойства SiO2 // Вторая объединённая конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» 2023. Сборник тезисов. С. 38-39