

## Механизмы разрушения в гетероструктурах InGaN/GaN под действием сильноточного электронного пучка

В. И. Олешко,\* С. Г. Горина†

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Институт физики высоких технологий,  
кафедра лазерной и световой техники  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30*

Представлены результаты экспериментальных исследований морфологии разрушений и пространственного распределения микрозон свечения по поверхности светодиодных гетероструктур InGaN/GaN различной предыстории после и в момент многоимпульсного облучения сильноточным электронным пучком. Показано, что локальные микрозоны свечения, регистрируемые на фоне однородной катодолюминесценции в текстурированных образцах, формируются в результате отражения стимулированного излучения от локальных микроразрушений. Обнаружено, что в эпитаксиальных слоях GaN с высокой плотностью дислокаций  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$  при многоимпульсном облучении электронным пучком с плотностью энергии  $H \approx 0.2 \text{ Дж/см}^2$  формируются фигуры Лихтенберга. Интерпретация полученных результатов дана на основе представлений об электроразрядном механизме разрушения диэлектриков и полупроводников под действием сильноточных электронных пучков. Сделано предположение о влиянии стимулированной люминесценции на размножение микроразрушений, в процессе многоимпульсного облучения гетероструктур электронным пучком. Визуализация дефектных областей вследствие локализации в этих зонах электрического пробоя может быть положена в основу метода диагностики электрических микронеоднородностей, образующихся в светодиодных гетероструктурах при выращивании.

PACS: 70.00.00

УДК: 621.315.592:535.37

Ключевые слова: светодиодные гетероструктуры, InGaN, эпитаксиальные слои GaN, сильноточный электронный пучок, многоимпульсное облучение, разрушение.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость изучения механизмов электронно-пучкового разрушения гетероструктур на основе InGaN/GaN-квантовых ям возникла в процессе исследований возможности применения высокоэнергетических электронных пучков для люминесцентной диагностики светоизлучающих гетероструктур. Преимущества применения сильноточных электронных пучков (СЭП) в данной области показаны нами в [1,2]. Первые экспериментальные результаты по изучению разрушения эпитаксиальных наногетероструктур InGaN/GaN под действием СЭП представлены нами в [3,4], где исследована морфология разрушения трех гетероструктур и показано, что микроразрушения формируются в образцах при облучении электронным пучком пороговой плотности  $H^* \approx 0.2 \text{ Дж/см}^2$ . Ранее механизмы разрушения под действием СЭП изучались в основном в диэлектрических и полупроводниковых макро-образцах, размеры которых на порядок превышают глубину пробега электронного пучка в материале. Известно, что облучение диэлектриков и полупроводников СЭП сопровождается их разрушением [5–9]. Пороговая плотность энергии электронно-пучка ( $H^*$ ), необходимая для разрушения макро-

образцов, определяется типом твердого тела и возрастает при переходе от ионных кристаллических диэлектриков к полупроводникам. Основными механизмами разрушения диэлектриков и полупроводников под действием СЭП являются термоудар [5,6] и электрический пробой [7–9]. Оба механизма связаны со спецификой воздействия СЭП на материалы: высокой скоростью ввода заряда ( $10^{10} - 10^{11} \text{ Кл/(м}^3 \cdot \text{с)}$ ) и энергии ( $10^{11} - 10^{13} \text{ Гр/с}$ ) [10]. Электроразрядный механизм разрушения щелочно-галоидных кристаллов, как правило, реализуется в режиме многоимпульсного облучения образцов электронным пучком низкой плотности ( $H \approx 0.1 \text{ Дж/см}^2$ ), термоудар — в режиме однократного облучения электронным пучком более высокой плотности ( $H \approx 0.6 \text{ Дж/см}^2$ ). Экспериментально разделить эти механизмы можно по характерной морфологии разрушений [7–9]. Радиационно-индуцированный электрический пробой приводит к формированию в зоне торможения электронного пучка характерных локальных микроразрушений — каналов электрического пробоя, а термоудар — к формированию макротрещин, как в зоне облучения, так и вне её.

Цель данной работы — изучить механизмы электронно-пучкового разрушения тонкопленочных светодиодных наногетероструктур на основе InGaN/GaN-квантовых ям и эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на сапфировых подложках. Понимание механизмов разрушения при облучении СЭП позволит глубже понять процессы деградации светодиодных гетероструктур InGaN/GaN, что крайне важно в условиях роста потребности в мощных

\*E-mail: oleshko@tpu.ru

†E-mail: svetlana.gorina@mail.ru

светоизлучающих приборах и сложившейся неоднозначности в интерпретации процессов деградации данных структур [11,12].

**1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Исследуемые образцы — светодиодные гетероструктуры на основе InGaN/GaN, выращенные методом металлоорганической газофазной эпитаксии на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с ориентацией [0001]. Гетероструктуры были изготовлены в разных лабораториях и имели различную предысторию. В качестве подложки использовался сапфир толщиной 400 мкм. Толщина слоев разных гетероструктур варьировалась: n-GaN — 3 ÷ 4 мкм, активная область — 60 ÷ 170 нм, p-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N — 15 ÷ 30 нм, p-GaN — 50 ÷ 300 нм. Активная область исследуемых образцов состояла из одиночной квантовой ямы, из множественных квантовых ям In<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>N (2 ÷ 2.5 нм)/GaN (10 ÷ 15 нм), а также из сверхрешеток InGaN/GaN с толщиной каждого слоя ~ 1 нм. Плотность дислокаций в исследуемых структурах варьировалась в диапазоне 10<sup>7</sup> ÷ 10<sup>9</sup> см<sup>-2</sup>. Некоторые структуры имели текстурированную поверхность сапфировой подложки, снижающую влияние эффекта полного внутреннего отражения на выход излучения из гетероструктуры благодаря рассеянию света на микровыступах и микровпадинах текстурированного слоя.

В работе также исследовались эпитаксиальные слои GaN с разной плотностью дислокаций (10<sup>8</sup> ÷ 10<sup>9</sup> см<sup>-2</sup>), выращенные на подложках с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) методом металлоорганической газофазной эпитаксии в реакторе горизонтального потока AIXTRON 200/RF-S. Варьирование плотности дислокаций в эпитаксиальном GaN производилось путем изменения времени осаждения слоя SiNx от 0 до 180 с. Методика выращивания данных структур подробно описана в [13].

Электронный пучок формировался малогабаритным импульсным ускорителем электронов прямого действия, состоящим из генератора импульсных напряжений ГИН-600, нагруженного на вакуумный диод [14] и имел следующие характеристики: длительность импульса тока на полувысоте 12 нс, эффективная энергия электронов 250 кэВ, диапазон варьируемой плотности энергии 0.05–0.25 Дж/см<sup>2</sup>.

Облучение образцов электронным пучком осуществлялось со стороны эпитаксиальных слоев гетероструктуры, нанесенных на сапфировую подложку, в направлении, перпендикулярном гетерогранице, в атмосферном воздухе при температуре 300 К (рис. 1). Количество импульсов облучения гетероструктуры *N* изменялось от 1 до 100. Зона облучения образца выбиралась произвольно. Диаметр зоны облучения составлял 2 мм и определялся диаметром коллиматора электронного пучка. Для обеспечения однородности электрического поля, формируемого в зоне торможения СЭП, на поверхность гетероструктуры наносилась алюминиевая

фольга толщиной 10 мкм.

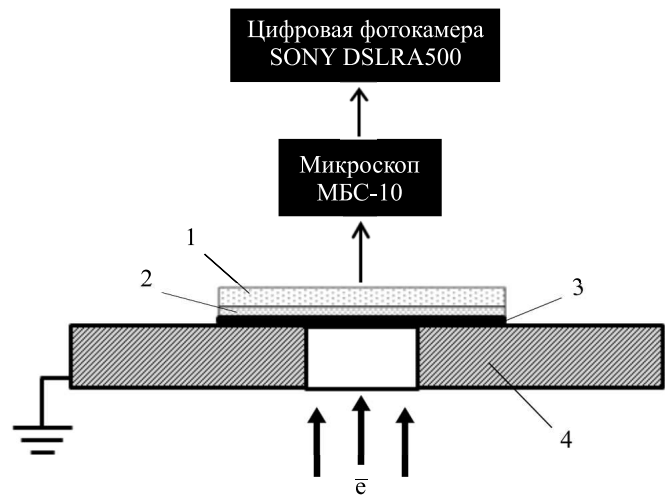


Рис. 1: Схема облучения и регистрации пространственного распределения свечения по поверхности гетероструктуры: 1 — подложка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 — гетероструктура, 3 — алюминиевая фольга, 4 — коллиматор.

Измерение интегральных (за один импульс СЭП) спектров люминесценции проводилось с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-DUAL. Пространственное распределение люминесценции по поверхности образца фотографировалось зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 в режиме «Bulb» за один импульс возбуждения через микроскоп МБС-10. Морфология остаточных разрушений, образующихся после многоимпульсного облучения СЭП, изучалась методом оптической микроскопии с помощью микровизора проходящего света μVizo-101.

**2. МОРФОЛОГИЯ РАЗРУШЕНИЙ ОБРАЗЦОВ ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ОБЛУЧЕНИИ СЭП**

**А. Разрушение гетероструктур различной предыстории**

Исследование светодиодных гетероструктур InGaN/GaN, выращенных в разных лабораториях, показало, что пороговое значение плотности энергии электронного пучка, приводящее к формированию микроразрушений, для большинства структур составляет  $H^* \approx 0.2$  Дж/см<sup>2</sup> и соответствует порогу инициирования электрического пробоя в различных диэлектриках при облучении СЭП. Установлено, что морфология разрушений образцов изменяется в процессе многоимпульсного облучения и определяется их индивидуальными свойствами. На рис. 2 представлены фотографии характерных разрушений в исследуемых гетероструктурах после 100 импульсов облучения СЭП с плотностью энергии  $H = 0.25$  Дж/см<sup>2</sup>. При таких условиях облучения формируемые разрушения в отдельных структурах достигают размера

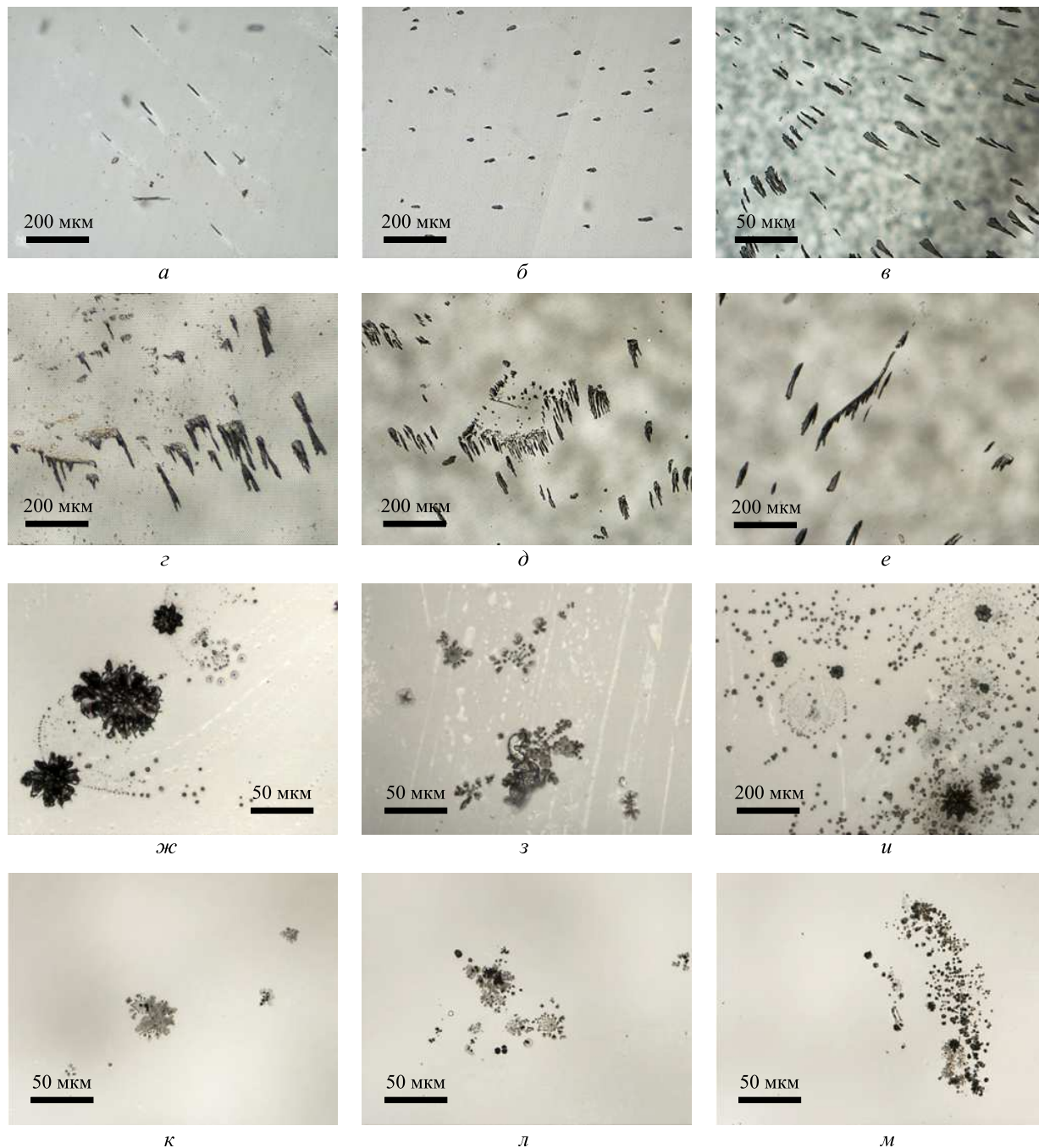


Рис. 2: Фотографии микроразрушений в разных гетероструктурах (а-м) после 100 импульсов облучения СЭП при  $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$ .

порядка сотен микрометров, а минимальный размер разрушений определяется разрешающей способностью микровизора проходящего света  $\mu\text{Vizo-101}$  и составляет  $\sim 1 \text{ мкм}$ .

Анализ морфологии разрушений исследуемых образцов позволяет выделить ряд закономерностей. Под действием СЭП с плотностью энергии  $H \geq H^*$  гетероструктуры деградируют локально. Форма разрушений индивидуальна для каждого образца. В процессе мно-

гоимпульсного облучения размер локальных разрушений, образовавшихся при первых импульсах СЭП, может, как увеличиваться, так и оставаться неизменным, при этом количество разрушенных зон увеличивается. Пространственное распределение микроразрушений определяется предысторией образцов и в отдельных гетероструктурах близко к однородному (рис. 2, а-в).



Рис. 3: Фотографии микроразрушений двух светодиодных структур, в которых регистрировалось стимулированное излучение InGaN-квантовых ям [15], после 100 импульсов облучения СЭП при  $H = 0.25$  Дж/см<sup>2</sup>.

**В. Особенности формирования разрушений в светодиодных гетероструктурах со стимулированным излучением**

Формы разрушений в образцах с текстурированной поверхностью сапфировой подложки, в которых наблюдалась стимулированная люминесценция InGaN/GaN-квантовых ям и GaN при достижении плотности энергии СЭП порогового значения [15], имеют протяженный характер и преимущественно общее направление (рис. 3).

Данные структуры, несмотря на относительно низкую плотность дислокаций ( $\sim 10^7$  см<sup>-2</sup>) имели более развитую структуру и размеры микроразрушений по сравнению с другими исследуемыми образцами, в которых плотность дислокаций достигала  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup>. Морфология разрушений в исследуемых образцах (рис. 3) имеет принципиальное сходство с морфологией разрушений, наблюдаемой в активной области катастрофически деградировавшего лазера на основе гетероструктуры InGaN/GaN [16]. Вероятно, стимулированное излучение, многократно взаимодействуя с дефектами, вносит определенный вклад в формирование наблюдаемых микроразрушений.

**С. Разрушения эпитаксиальных слоев GaN**

Нитрид галлия, выращенный на сапфировой подложке, является основой для роста слоев активной области светоизлучающей структуры. В связи с этим качество слоев GaN оказывает влияние на качество роста активной области гетероструктуры. Одной из главных проблем при эпитаксиальном росте слоев GaN являются пронизывающие дислокации [13]. Производители постоянно стремятся улучшить структурное совершенство слоев GaN и используют для этого раз-

личные приемы, например, прерывание роста GaN для нанесения слоя-маски SiN и последующее доращивание GaN. В настоящей работе исследована морфология разрушений эпитаксиальных слоев GaN с различной плотностью дислокаций. Обнаружено, что при облучении GaN электронным пучком с плотностью энергии  $H \sim 0.2$  Дж/см<sup>2</sup> в образце с наибольшей плотностью дислокаций  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup> (при отсутствии слоя SiN) наблюдались как локальные микроразрушения (рис. 4), так и разрушения, напоминающие фигуры Лихтенберга (рис. 5).

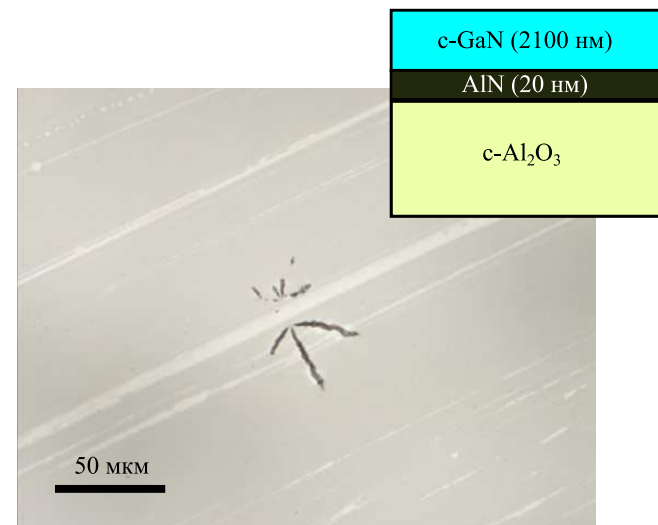


Рис. 4: Фотография локальных микроразрушений в эпитаксиальных слоях GaN при облучении СЭП ( $H \sim 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>). На вставке — структура исследуемого образца, в котором наблюдались разрушения.

Фигуры Лихтенберга, как правило, образуются в полимерах (полиметилметакрилат, полиэтилен, винипроз



Рис. 5: Фотография разрушений, напоминающих фигуры Лихтенберга, образующихся в эпитаксиальных слоях GaN при облучении СЭП ( $H \sim 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>). На вставке — увеличенная фотография «дерева разряда».

и др.) в результате инициирования электрического пробоя при облучении СЭП с плотностью энергии  $H \sim 0.2$  Дж/см<sup>2</sup>. Отметим, что в образцах, имеющих слой-маску SiN, которая уменьшает плотность дислокаций до  $\sim 10^8$  см<sup>-2</sup>, микроразрушения отсутствуют при одинаковых условиях облучения образцов СЭП. Вероятно, что электрический пробой является структурно чувствительным и развивается только в образцах GaN с повышенной плотностью дислокаций.

### 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ОБЛУЧЕНИИ СЭП

Регистрация пространственного распределения люминесценции по поверхности гетероструктуры проводилась в соответствии с рис.1. В процессе многоимпульсного облучения СЭП в образцах, для которых регистрировалась только спонтанная люминесценция InGaN-квантовых ям и слоев GaN, наблюдалось появление темных точек и линий на фоне однородной люминесценции. Для текстурированных образцов, в которых наблюдается стимулированная люминесценция GaN и InGaN/GaN [15], характерна следующая особенность. При плотности энергии возбуждающего СЭП ниже пороговой для возникновения стимулированной люминесценции на фоне однородного свечения также регистрируются дефекты темных точек и линий (рис.6а) после предварительного облучения

СЭП с плотностью энергии  $H \geq H^*$ . Однако при возбуждении гетероструктур с плотностью энергии выше пороговой в местах расположения деградированных областей регистрируются яркие микрзоны свечения (рис.6б). Белый цвет микрзон свечения на цветных фотографиях (рис.6б и рис.7а) обусловлен высокой яркостью люминесценции из микрзон и нелинейными эффектами, связанными с регистрацией свечений цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500.

Измерение спектров люминесценции фотоэлектрическим методом в данном режиме облучения свидетельствуют о том, что в спектре люминесценции данного образца регистрируются две полосы стимулированного излучения: слоев GaN при  $\lambda = 375.1$  нм (FWHM = 18 мэВ) и квантовых ям InGaN/GaN при  $\lambda = 440$  нм (FWHM = 15 мэВ). Использование светофильтров HC (рис.7б) позволяет определить реальный («синий») цвет люминесценции локальных микрзон свечения и при фотографической регистрации свечения.

Исследования, направленные на выяснение причин, приводящих к формированию локальных микрзон свечения в текстурированных образцах со стимулированным излучением, показали, что они образуются в результате отражения стимулированного излучения от локальных зон микроразрушений. Об этом свидетельствуют следующие факты: совпадение пространственного расположения микроразрушений и микрзон свечения; микрзоны свечения наблюдаются только в образцах, в которых формируется стимулированное излучение; спектры стимулированной люминесценции гетероструктур в режиме инициирования разрушений не изменяются; при уменьшении плотности энергии СЭП ниже пороговой для формирования стимулированного излучения, микроразрушения регистрируются на фоне спонтанной люминесценции в виде дефектов темных линий и точек (рис.6а). Образование дефектов темных линий и точек свидетельствует о формировании в этих локальных областях гетероструктуры центров безызлучательной рекомбинации (деградации светоизлучающей структуры).

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интерпретация полученных результатов может быть дана на основе представлений об электроразрядном механизме разрушения диэлектриков и полупроводников под действием СЭП [7–9]. Облучение гетероструктур InGaN/GaN, нанесенных на сапфировые подложки, электронным пучком с плотностью энергии  $H \geq 0.2$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к формированию сильного электрического поля, связанного с инжектированным в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отрицательным объемным зарядом СЭП и электрическому пробое образца. Известно, что электрический пробой, инициированный СЭП в диэлектриках и некоторых полупроводниках группы A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>, является структурно чувствительным [9], т. е. локализуется

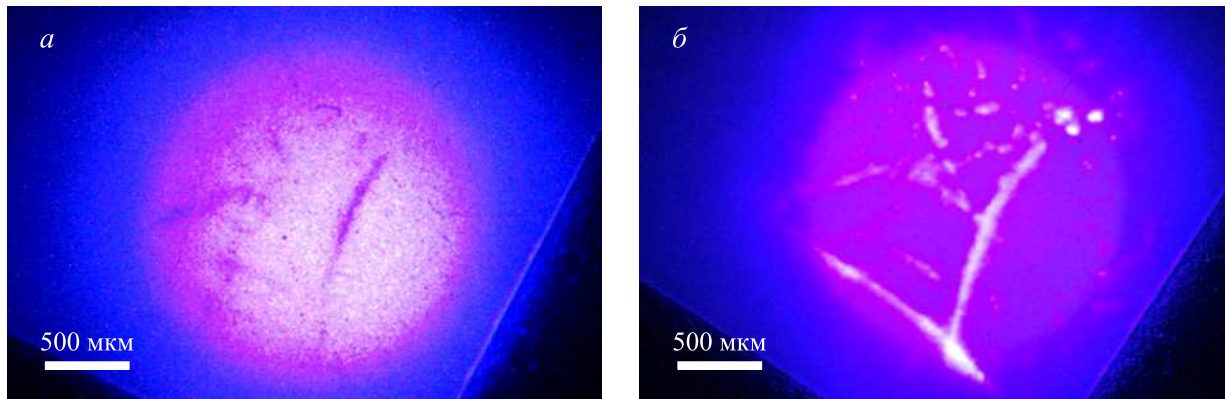


Рис. 6: Фотографии распределения свечения по поверхности гетероструктуры при возбуждении СЭП с разной плотностью энергии: *a* —  $H = 0.06 \text{ Дж/см}^2$ , *б* —  $H = 0.2 \text{ Дж/см}^2$ . Образец предварительно подвергался многоимпульсному облучению СЭП (100 импульсов) при  $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$ .

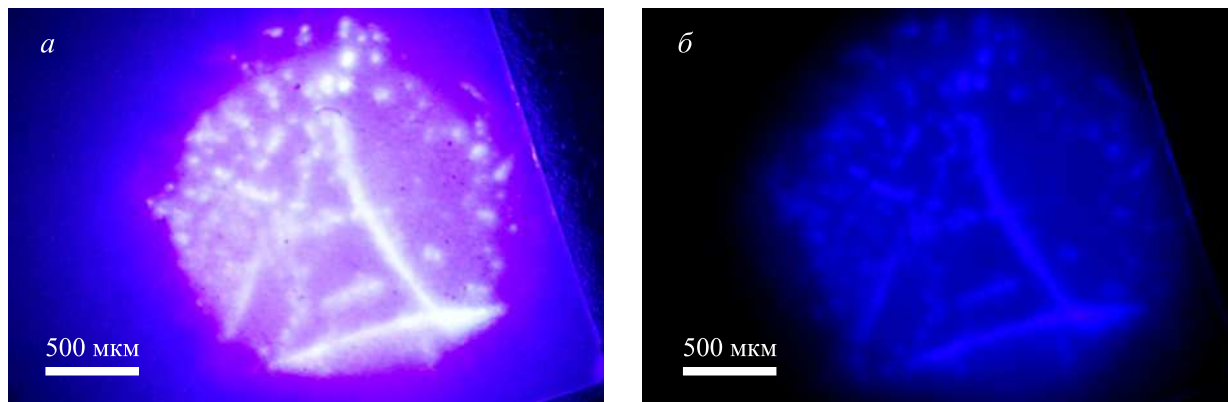


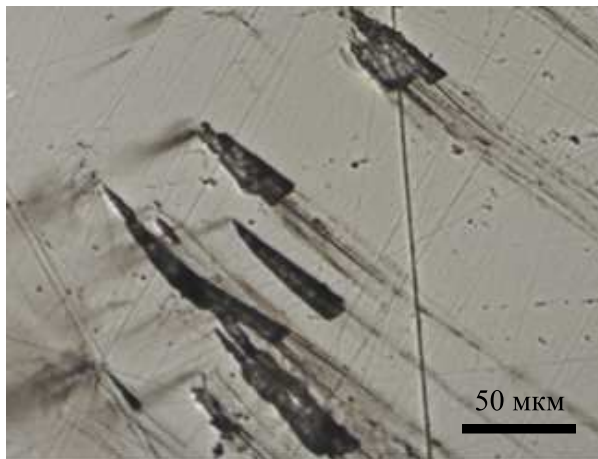
Рис. 7: Фотографии распределения свечения по поверхности гетероструктуры при возбуждении СЭП с плотностью энергии  $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$ : *a* — без светофильтра, *б* — со светофильтром НС-6. Образец предварительно подвергался многоимпульсному облучению СЭП (100 импульсов) при  $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$ .

ся в зонах расположения электрических микронеоднородностей, роль которых могут выполнять дислокации, поры, преципитаты и другие дефекты технологического происхождения. Подобные дефекты, как известно, имеются и в эпитаксиальных слоях GaN и гетероструктурах InGaN/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

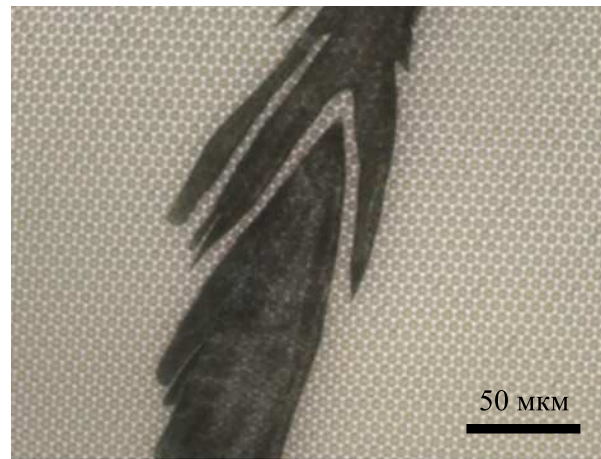
Характер разрушений отдельных гетероструктур (рис. 2*a–e*) после многоимпульсного облучения СЭП идентичен разрушениям, образующимся в приповерхностной области макрокристалла LiNbO<sub>3</sub> (рис. 8*a*) при тех же условиях облучения. Отличием является наличие в ниобате лития нитевидных каналов электрического пробоя, распространяющихся от приповерхностных разрушений в объем кристалла на глубину пробега электронного пучка. Учитывая, что LiNbO<sub>3</sub> является материалом, в котором при многоимпульсном облучении СЭП каналы электрического пробоя формируются положительными стримерами, развивающимися со стороны облучаемой поверхности в область локализации отрицательного объемного заряда электронного пучка, можно предположить, что разруше-

ния гетероструктур InGaN/GaN осуществляются по электроразрядному механизму. «Прерывистая» форма некоторых разрушений, наблюдаемых в гетероструктурах InGaN/GaN (рис. 8*б*), также подтверждает электроразрядный механизм разрушения, т.к. ее появление типично при распространении сверхзвуковых анодных стримерных разрядов в диэлектрических и полупроводниковых макрокристаллах. Кроме того, фигуры Лихтенберга, наблюдаемые в слоях GaN (рис. 5), напрямую свидетельствует о развитии электрического пробоя в эпитаксиальных слоях GaN при облучении СЭП.

Высокая плотность энерговыделения в зонах развития электрических микроразрядов приводит к локальному разогреву и формированию микроразрушений, пространственное распределение которых по поверхности гетероструктуры неоднородно. Образующиеся при этом центры безызлучательной рекомбинации приводят к формированию темных (на фоне спонтанной катодолюминесценции) микрозон, свидетельствующих о деградации не только подложки, но и последовательно расположенных слоев, образующих полу-



*a*



*б*

Рис. 8: Фотографии разрушений в макро-образце  $\text{LiNbO}_3$  (*a*) и гетероструктуре на основе  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  с текстурированной сапфировой подложкой (*б*) после 100 импульсов облучения СЭП с  $H = 0.25 \text{ Дж/см}^2$ .

проводниковую гетероструктуру. Выяснение роли подложки (отдельных технологических операций, включающих ее обработку) и последовательно расположенных эпитаксиальных слоев, образующих гетероструктуру, в деградации светоизлучающих структур требует проведения дополнительных исследований. Возможно, что определенная роль в размножении микроразрушений, в процессе многоимпульсного облучения гетероструктур, принадлежит стимулированному излучению [16], взаимодействующему с микроразрушениями в процессе возбуждения гетероструктуры электронным пучком. Об этом в частности свидетельствует факт более интенсивного разрушения гетероструктур, в которых наблюдается стимулированное излучение, по сравнению со структурами, в которых даже при  $H \geq 0.2 \text{ Дж/см}^2$  регистрируется только спонтанная люминесценция.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что основной причиной электронно-пучкового разрушения эпитаксиальных слоев  $\text{GaN}$  и гетероструктур на основе  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  — кванто-

вых ям является электрический пробой, развивающийся в электрическом поле инжектированного в образец отрицательного объемного заряда СЭП. Электрический пробой является структурно чувствительным, т.е. локализуется в областях расположения электрических микронеоднородностей технологического происхождения. Само наличие микроочагов свидетельствует о том, что микроразрушения возникают в отдельных «слабых точках» исследуемых образцов, которыми являются микродефекты. Результаты исследований свидетельствуют о том, что роль таких дефектов могут выполнять дислокации, образующиеся в гетероструктурах  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  и эпитаксиальных слоях  $\text{GaN}$  при выращивании.

Многоимпульсное облучение гетероструктур электронным пучком приводит к визуализации дефектных областей вследствие локализации в этих зонах электрического пробоя, сильного разогрева и активизации процессов миграции и сегрегации  $\text{In}$  и  $\text{Ga}$ . «Дефектная морфология» микроразрушений, образующихся в гетероструктурах при облучении СЭП, может быть использована в основе метода диагностики электрических микронеоднородностей, образующихся в светодиодных гетероструктурах при выращивании.

[1] Олешко В. И., Горина С. Г., Корепанов В. И. и др. Изв. Вузов. Физика. **56**, №1. С. 55. (2013). (Oleshko V. I., Gorina S. G., Korepanov V. I. et. al. Russian Physics Journal. **56**, N 1. P. 62. (2013)).  
 [2] Олешко В. И., Горина С. Г., Корепанов В. И. и др. Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». (Москва. СПб: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2013). С. 18.  
 [3] Олешко В. И., Горина С. Г. Изв. Вузов. Физика. **56**,

№ 8/3. С. 97. (2013).  
 [4] Олешко В. И., Горина С. Г. ПЖТФ. **41**, № 15. С. 75. (2015).  
 [5] Высокоэнергетическая электроника твердого тела. / Под ред. Д. И. Вайсбурда. (Новосибирск: Наука, 1982. 227 с).  
 [6] Богданкевич О. Б., Зверев М. М., Иванова Т. Ю. и др. КЭ. **113**, № 10. С. 2132. (1986).  
 [7] Олешко В. И., Штанько В. Ф. ФТТ. **29**, № 2. С. 320. (1987).

- [8] Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипин А.С. и др. Письма в ЖТФ. **38**, №9. С. 37. (2012).
- [9] Олешко В.И. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. (Томск, 2009). 317 с.
- [10] Oleshko V., Lisitsyna L., Malys D. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. **268**, N 19. P. 3265. (2010).
- [11] Полищук А.Г., Туркин А.Н. Светотехника. №5. С. 44. (2008).
- [12] Meneghini M., Tazzoli A., Mura G. et al. Electron Devices, IEEE Transactions on. **57**, N1. P. 108. (2010).
- [13] Barchuk M., Holý V., Miljević B. et al. J. Appl. Phys. **108**, 043521. (2010).
- [14] Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.М., Шпак В.Г. ПТЭ. №4. С. 15. (1981).
- [15] Олешко В.И., Горина С.Г., Корепанов В.И., Лисицын В.М. Изв. Вузов. Физика. **56**, № 8/3. С. 111. (2013).
- [16] Зубелевич В.З., Луценко Е.В., Яблонский Г.П. и др. Сборник тезисов докладов 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы» (Санкт-Петербург. СПб: ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, 2011). С. 107.

## Destruction mechanisms in InGaN/GaN heterostructures under high current electron beam action

V. I. Oleshko<sup>a</sup>, S. G. Gorina<sup>b</sup>

*National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of High Technology Physics, Department of lasers and lighting engineering.*

*30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>oleshko@tpu.ru, <sup>b</sup>svetlana.gorina@mail.ru*

We present the results of experimental studies of the destruction morphology and the spatial distribution of light emission micro-areas on the surface of LED heterostructures InGaN/GaN of different prehistory after multipulse high-current electron beam irradiation. It is shown that local light emission micro-areas, registered on the background of homogeneous cathodoluminescence in textured samples, are formed due to reflection of stimulated emission from local microfractures. It is found that Lichtenberg figures are formed in GaN epitaxial layers with a high dislocation density of  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  under multipulse irradiation of electron beam with an energy density  $H \geq 0.2 \text{ J/cm}^2$ . Interpretation of the results is given on the basis of ideas about electric-discharge mechanism of destruction of insulators and semiconductors under the action of high-current electron beams. We suggest that stimulated luminescence effects on the microfractures multiplication during multipulse irradiation of heterostructures by high-current electron beam. Visualization of defective areas due to localization of electrical breakdown in these areas can be the basis of a diagnostic method of electrical microheterogeneities formed in LED heterostructures during growth.

PACS: 70.00.00

Keywords: LED heterostructures, InGaN, GaN epitaxial layers, high current electron beam, multipulse irradiation, destruction.

Received 20.05.2015.

### Сведения об авторах

1. Олешко Владимир Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (3822) 70-17-77 +1+2293#, e-mail: oleshko@tpu.ru.
2. Горина Светлана Геннадьевна — аспирант; тел.: (3822) 70-17-77 +1+2293#, e-mail: svetlana.gorina@mail.ru.