

05;06;12

Морфология разрушений в гетероструктурах InGaN/GaN под действием сильноточного электронного пучка

© В.И. Олешко, С.Г. Горина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 марта 2015 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований морфологии разрушений в гетероструктурах InGaN/GaN, нанесенных на сапфировые подложки, после многоимпульсного облучения сильноточным электронным пучком. Обнаружено, что возбуждение образцов электронным пучком пороговой плотности со стороны гетероструктуры приводит к формированию микроразрушений, количество, размеры и форма которых изменяются в процессе облучения и определяются индивидуальными свойствами исследованных образцов. В гетероструктурах, имеющих стимулированную люминесценцию, в момент импульса возбуждения на фоне однородной катодолюминесценции регистрируются яркие микрозоны, пространственное расположение которых совпадает с расположением остаточных микроразрушений. Анализируются возможные механизмы электронно-пучкового разрушения светоизлучающих гетероструктур.

Исследования [1,2] продемонстрировали перспективы применения высокоэнергетических сильноточных электронных пучков (СЭП) для люминесцентного контроля светоизлучающих гетероструктур InGaN/GaN, нанесенных на сапфировые подложки. В связи с этим возник вопрос о механизмах разрушения светодиодных гетероструктур при их диагностике высокоэнергетическим электронным пучком. Известно, что облучение диэлектриков и полупроводников СЭП сопровождается их разрушением [3–7]. Пороговая плотность энергии электронного пучка (H^*), необходимая для разрушения макро-образцов, размеры которых превышают глубину пробега электронного пучка в материале, определяется типом твердого тела и возрастает при переходе от ионных кристаллических диэлектриков к полупроводникам.

Установлено, что основными механизмами разрушения диэлектриков и полупроводников под действием СЭП являются — термоудар [3,4] и электрический пробой [5–7]. Оба механизма связаны со спецификой воздействия СЭП на материалы: высокой скоростью ввода заряда ($10^{10}–10^{11} \text{ C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) и энергии ($10^{11}–10^{13} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$) [8]. Электро-разрядный механизм разрушения диэлектриков, как правило, реализуется в режиме многоимпульсного облучения образцов электронным пучком низкой плотности ($H \approx 0.1 \text{ J/cm}^2$), термоудар — в режиме однократного облучения электронным пучком более высокой плотности ($H \geq 0.6 \text{ J/cm}^2$). Экспериментально разделить эти механизмы можно по характерной морфологии разрушений [5–7].

Цель данной работы — исследование морфологии электронно-пучкового разрушения светодиодных гетероструктур (ГС) на основе InGaN/GaN — квантовых ям, выращенных на сапфировых подложках, и определение возможных механизмов их разрушения.

Образцы гетероструктур (ГС₁, ГС₂ и ГС₃) были выращены различными производителями методом металлоорганической газофазной эпитаксии на сапфире с ориентацией [0001]. Гетероструктуры ГС₁, ГС₂ имели текстурированную поверхность сапфировой подложки. Облучение образцов электронным пучком осуществлялось со стороны гетероструктуры в атмосферном воздухе при температуре 300 К. Электронный пучок формировался в вакуумном диоде ускорителя ГИН-600 и имел следующие характеристики: длительность импульса тока на полувысоте $\sim 12 \text{ ns}$, эффективная энергия электронов $\sim 250 \text{ keV}$, диапазон варьируемой плотности энергии $\sim (0.05–0.25) \text{ J/cm}^2$. Пространственное распределение катодolumинесценции по поверхности образца фотографировали зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 за один импульс возбуждения через микроскоп МБС-10. Морфологию остаточных разрушений регистрировали микровизором проходящего света $\mu \text{ Vizo-101}$. Количество импульсов возбуждения (N) варьировали от 1 до 100.

Обнаружено, что возбуждение образцов электронным пучком пороговой плотности $H^* \approx 0.2 \text{ J/cm}^2$ со стороны гетероструктуры приводит к формированию микроразрушений, количество, размеры и форма которых изменяются в процессе многоимпульсного облучения и определяются индивидуальными свойствами исследованных гетероструктур. На рис. 1,2 представлена морфология разрушений, полученных в образцах ГС₁, ГС₂ и ГС₃ после многоимпульсного облучения СЭП.

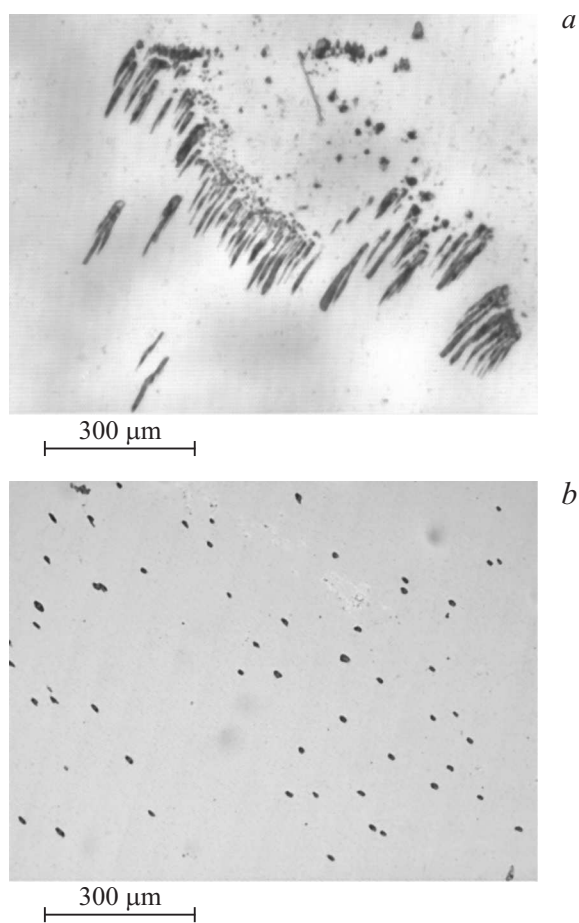


Рис. 1. Морфология разрушений в ГС₁ (а) и ГС₂ (b) под действием СЭП. $H = 0.25 \text{ J/cm}^2$, $N = 30$.

Анализ морфологии микроразрушений, образующихся в образцах различной предыстории, показывает, что размеры разрушений изменяются в диапазоне $1\text{--}100 \mu\text{m}$. Минимальный размер разрушений определялся разрешающей способностью микровизора проходящего света $\mu\text{Vizo-101}$ и составлял $\sim 1 \mu\text{m}$. В образце ГС₁ в процессе многоимпульсного

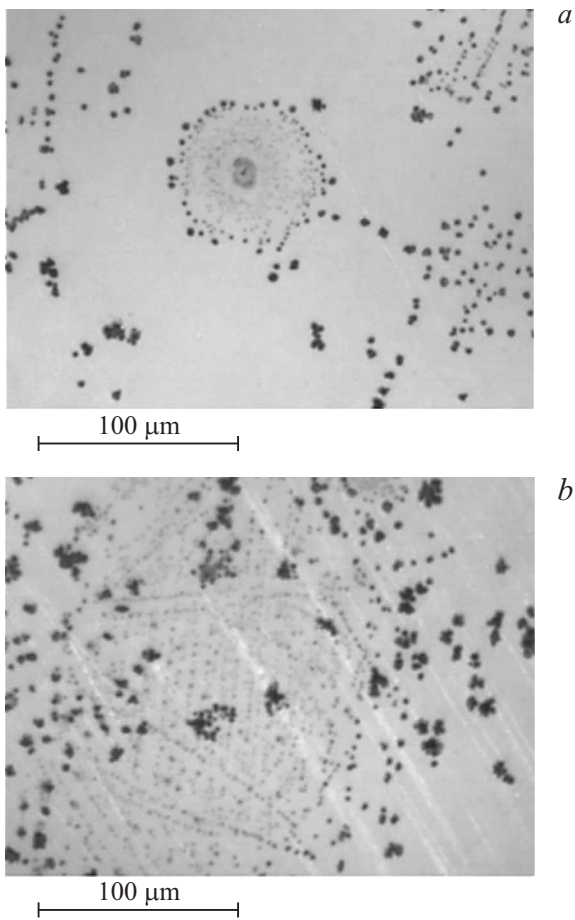


Рис. 2. Морфология разрушений в GaS_3 под действием СЭП в различных областях (*a, b*) полупроводниковой пластины. $H = 0.25 \text{ J/cm}^2$, $N = 40$.

облучения наблюдалось увеличение размеров микрон разрушений за счет их слияния в нитевидные макрозоны, длина которых в отдельных областях гетероструктуры достигала $\sim (500-800) \mu\text{m}$. Распределение разрушений по поверхности GaS_2 близко к однородному (рис. 1, *b*), геометрическая форма отдельных микроурушений мало

отличается, а их размеры не превышают $\sim 30 \mu\text{m}$. Наиболее явно „дефектная морфология“ разрушений выражена в образце ГС₃. Видно (рис. 2, *a, b*), что пространственная структура и размеры микроразрушений в различных областях гетероструктуры сильно различаются. В текстурированных образцах ГС₁ и ГС₂, в которых наблюдается стимулированная катодолюминесценция квантовых ям InGaN/GaN, в момент импульса возбуждения при $H \approx 0.2 \text{ J/cm}^2$ на фоне однородной катодолюминесценции регистрируются микрозоны свечения (рис. 3, *a*), количество которых увеличивается в процессе многоимпульсного облучения. Спектры свечения образцов ГС₁, ГС₂ и ГС₃ при облучении СЭП изучены нами в [1], где показано, что возбуждение светодиодных гетероструктур InGaN/GaN электронным пучком с плотностью энергии $H \approx 0.05 \text{ J/cm}^2$ приводит к формированию двух полос спонтанной люминесценции, максимумы которых соответствуют энергиям 3.35–3.37 и 2.80–2.82 eV. Полоса излучения в области 3.35–3.37 eV (ширина на полувысоте FWHM $\sim 100 \text{ meV}$, время затухания $\tau \leq 10 \text{ ns}$), принадлежит GaN ($E_g = 3.39 \text{ eV}$ при 300 K). „Голубая“ полоса люминесценции ($E_{\text{max}} \sim 2.80\text{--}2.82 \text{ eV}$, FWHM $\sim 160\text{--}200 \text{ meV}$) связана с люминесценцией квантовых ям InGaN/GaN. В образцах ГС₁ и ГС₂ при $H \geq 0.08 \text{ J/cm}^2$ на фоне широких полос спонтанной люминесценции формируются узкие полосы стимулированного излучения в области $\sim 3.3 \text{ eV}$ (FWHM $\sim 17 \text{ meV}$) и в области $\sim 2.8 \text{ eV}$, (FWHM $\sim 15 \text{ meV}$), которые при $H \geq 0.15 \text{ J/cm}^2$ являются доминирующими в спектре катодолюминесценции. Исследования, направленные на выяснение причин, приводящих к формированию локальных микрозон свечения в образцах ГС₁ и ГС₂, показали, что они образуются в результате отражения стимулированного излучения от локальных зон микроразрушений. Об этом свидетельствуют следующие факты: пространственное расположение микроразрушений и микрозон свечения совпадает, микрозоны свечения наблюдаются только в образцах, в которых формируется стимулированное излучение; спектры стимулированной люминесценции гетероструктур в режиме иницирования разрушений не изменяются; при уменьшении плотности энергии СЭП ниже пороговой для формирования стимулированного излучения, микроразрушения регистрируются на фоне „голубой“ полосы спонтанной катодолюминесценции в виде дефектов темных линий и точек (рис. 3, *b*). Образование дефектов темных линий и точек свидетельствует о формировании в этих локальных областях гетероструктуры центров безызлучательной рекомбинации (деградации светоизлучающей гетероструктуры). В образце

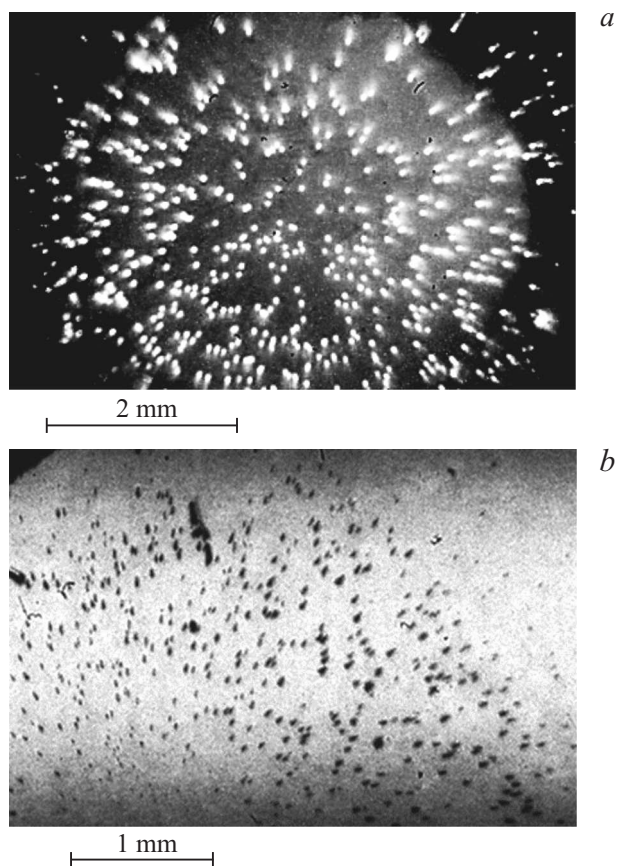


Рис. 3. Фотографии пространственного распределения микрозон свечения в $ГС_2$ (*a*) и разрушения на фоне катодолуминесценции в $ГС_1$ (*b*): *a* — 20-й импульс, $H = 0.25 \text{ J/cm}^2$; *b* — 30-й импульс, $H = 0.05 \text{ J/cm}^2$.

$ГС_3$ стимулированное излучение отсутствует и локальные микрозоны свечения не наблюдаются.

Интерпретация полученных результатов может быть дана на основе представлений об электроразрядном механизме разрушения диэлектриков и полупроводников под действием СЭП [5-8]. Облучение гетероструктур InGaN/GaN, нанесенных на сапфировые подложки,

электронным пучком с плотностью энергии $H \geq 0.2 \text{ J/cm}^2$ приводит к формированию сильного электрического поля, связанного с инжектированным в Al_2O_3 отрицательным объемным зарядом СЭП, и электрическому пробое образца. Известно, что электрический пробой, инициированный СЭП в диэлектриках и некоторых полупроводниках группы A_2B_6 , является структурно-чувствительным [7], т. е. локализуется в зонах расположения электрических микронеоднородностей, роль которых могут выполнять дислокации, поры, преципитаты и другие дефекты технологического происхождения. Подобные дефекты, как известно, имеются и в светоизлучающих гетероструктурах InGaN/GaN , выращенных на подложках Al_2O_3 . Высокая плотность энерговыделения в зонах развития электрических микрозарядов 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 полупроводниковую 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 вынужденному излучению [9], взаимодействующему с микроразрушениями в процессе возбуждения гетероструктуры СЭП. Об этом, в частности, свидетельствует факт более интенсивного разрушения гетероструктур ГС_1 и ГС_2 , в которых наблюдается стимулированное излучение, по сравнению с ГС_3 .

Таким образом, одним из наиболее вероятных механизмов электронно-пучкового разрушения светодиодных гетероструктур InGaN/GaN , выращенных на сапфировых подложках, является электрический пробой, локализующийся в областях расположения электрических микронеоднородностей технологического происхождения. Само наличие микроочагов свидетельствует о том, что микроразрушения возникают в отдельных „слабых точках“ гетероструктуры, которыми являются микродефекты. Роль таких микродефектов могут выполнять дислокации, образующиеся в гетероструктурах при их выращивании. Многоимпульсное облучение гетероструктур СЭП приводит к визуализации

дефектных областей вследствие размножения дислокаций, миграции и сегрегации In и Ga в зонах локализации электрического пробоя. „Дефектная морфология“ микроразрушений, образующихся в гетероструктурах при облучении СЭП, может быть использована в качестве метода диагностики электрических микронеоднородностей, образующихся в светодиодных гетероструктурах при выращивании.

Список литературы

- [1] Олешко В.И., Горина С.Г., Корепанов В.И. и др. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 1. С. 55–58.
- [2] Олешко В.И., Горина С.Г., Корепанов В.И. // Тез. докл. 9-й Всероссийской конференции „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, 13–15 июня 2013 г., Москва. СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2013. С. 18–19.
- [3] Высокоэнергетическая электроника твердого тела / Под ред. Д.И. Вайсбурда. Новосибирск: Наука, 1982. 227 с.
- [4] Богданкевич О.Б., Зверев М.М., Иванова Т.Ю. и др. // КЭ. 1986. Т. 113. В. 10. С. 2132–2135.
- [5] Олешко В.И., Штанько В.Ф. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 2. С. 320–324.
- [6] Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипин А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 9. С. 37–43.
- [7] Олешко В.И. Дис.... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. 317 с.
- [8] Oleshko V., Lisitsyna L., Malys D. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2010. V. 268. N 19. P. 3265–3268.
- [9] Зубелевич В.З., Луценко Е.В., Яблонский Г.П. и др. // Тез. докл. 8-й Всероссийской конференции „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“. 26–28 мая 2011 г., Санкт-Петербург. СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2011. С. 107–108.