

УДК 621.315.592

С.Г. Еханин, А.А. Томашевич

## Исследование роли термопластических явлений в механизме деградации полупроводниковых гетероструктур на основе GaN

Проведена оценка роли термопластических явлений в расширении дефектных областей при формировании новых дефектов в гетероструктуре светодиода. Согласно расчету напряжений, возникающих при локальном перегреве, недостаточно для формирования новых дефектов, однако эти напряжения могут приводить к движению уже существующих дислокаций и их скоплению, что может приводить к формированию кластеров дислокаций, дополнительному перегреву и выходу светодиода из строя.

**Ключевые слова:** дислокации, нитрид галлия, гетероструктура, механическая прочность.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-4-23-25

Исследование механизмов деградации полупроводниковых структур имеет большое значение для понимания причин ухудшения свойств полупроводниковых приборов при длительных испытаниях. В работе [1] неоднородность инжекции носителей заряда по площади структуры связывают с локальной диффузией и электромиграцией остаточных примесей вдоль дефектных трубок, индуцированными механическими напряжениями, возникающими при формировании электродов. В данной работе мы проводим оценку роли термопластических явлений в расширении дефектных областей вследствие генерации новых дефектов.

### Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования был выбран светодиод синего свечения с чипом-кристаллом SL-V-B24AD Semileds на основе GaN без люминофора с номинальным током эксплуатации 150 мА. Были проведены визуальные исследования поверхности кристалла, в том числе с ультрафиолетовой (УФ) подсветкой. Получены изображения поверхности кристалла с УФ-подсветкой до и после ускоренных испытаний при повышенных плотностях рабочего тока.

Импульсное УФ-облучение поверхности кристалла получено посредством фотовспышки Canon Speedlight 430 EX II со снятым светофильтром, в конструкции которой имеется ртутная лампа в кварцевом баллоне. Фотографирование поверхности кристалла и картин его фотолюминесценции под действием УФ-облучения производилось с помощью микроскопа МИМ-7 и цифрового фотоаппарата Canon EOS 60D, обладающего большой чувствительностью (100–6400 ISO) и разрешающей способностью (19 мпкс). Затем мы постепенно увеличивали ток испытаний от 50 до 100 мА и когда достигли уровня 100 мА, обнаружили первые потемнения на поверхности кристалла (места образования дефектов). Максимальные линейные размеры потемнений вначале составляли порядка 2 мкм. После испытаний при токе 130 мА дефект, который появился при токе 100 мА, начал расширяться, а на месте второго потемнения стало видно образование нового точечного дефекта. Также вблизи границы кристалла отчетливо виден новый дефект. Таким образом, можно ска-

зать, что при токе 130 мА уже видна явная картина дефектообразования. Также были определены количество дефектов и их площадь, значения которых занесены в табл. 1. Кинетика дальнейшего дефектообразования исследовалась при рабочем токе больше номинального.

Таблица 1

### Зависимость количества, диаметра и площади дефектов от величины тока и времени испытаний

№	Величина тока, мА	Время испытания, ч	Количество дефектов	Площадь дефекта, мкм <sup>2</sup>	Макс. диаметр, мкм
1	75	6,0	0	0	0
2	100	2,0	2	3,14	2
3	130	3,0	3	120,105	10
4	150	1,5	5	213,52	10
5	170	2,0	12	347,755	10
6	200	0,5	20	909,03	15

Таким образом, экспериментальные исследования картин фотолюминесценции поверхности гетероструктуры с УФ-подсветкой показали, что при испытании при повышенных плотностях тока формируются дефектные области, представляющие собой темные точки и пятна, которые расширяются в процессе деградации. При этом УФ-подсветка приводит к возникновению фотолюминесценции дефектных областей в желто-зеленой области спектра и появлению зеленого ореола вокруг темных пятен [2, 3].

Анализ картин фотолюминесценции показал, что эти темные области представляют собой каналы предпочтительного зарядопереноса, как было описано нами ранее в работе [4]. Безызлучательная рекомбинация и протекание тока по этому каналу приводят к возникновению перегрева, что, в свою очередь, приводит к термическим напряжениям. Наблюдаемый по периметру канала зеленый ореол (при УФ-подсветке) свидетельствует о повышенной плотности дислокаций вблизи канала. В табл. 1 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие зависимость площади дефектов, их количества и максимального диаметра от времени испытания и величины рабочего тока.

Как видно из табл. 1, с увеличением рабочего тока выше номинального уже после 10 ч испытаний

наблюдается значительный рост площади дефектов, и при токе 200 мА максимальный радиус некоторых дефектов достигает 7 мкм.

В работе [4] нами было показано, что с увеличением радиуса локального дефекта (шнура) увеличивается температура в центре шнура, и при достижении радиуса 9 мкм перегрев в центре превышает 150 °С, что совпадает с данными [5].

При таком перегреве могут возникать существенные термопластические явления, связанные с расширением вещества в области перегрева [1, 4]. Поэтому мы решили, что в процессе испытаний при неоднородности протекания тока возникают термические напряжения, которые способствуют генерации новых дефектов, что приводит к увеличению размеров дефектных областей.

Далее приведен расчет напряжений, возникающих в центре шнура вследствие перегрева.

#### Расчет

Для нахождения поля деформаций  $u_r(r)$  следует решить уравнение механического равновесия. Для расчета мы использовали модель, опубликованную нами в работе [4]. Воспользуемся готовым решением для изотропного цилиндра [6].

$$u_r(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \left\{ \frac{1}{r} \int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho + (1-2\sigma) \frac{r}{R^2} \int_0^R T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \right\}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент Пуассона;  $R$  – радиус цилиндра;  $r$  – расстояние до точки, в которой оцениваются механические напряжения;  $T(\rho)$  – функция зависимости температуры внутри шнура от расстояния до центра;  $\alpha$  – температурный коэффициент объемного расширения.

В нашем случае следует сделать предельный переход. Исходя из выражения

$$\delta T(r,t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{\rho^2+r^2}{4a\tau}} \cdot \rho \cdot f(\rho) \cdot I_0\left(\frac{2\rho r}{4a\tau}\right) \cdot d\rho \cdot d\tau, \quad (2)$$

можно показать, что при  $r \rightarrow \infty$

$$\delta T(r,t) \approx \frac{e^{-r^2/4at}}{r^2} \cdot t.$$

Поскольку  $t$  фиксировано, запишем

$$T \approx \frac{A}{r^2} \cdot e^{-\beta r^2}.$$

При данном асимптотическом представлении  $T(r)$  интеграл  $\int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho$  в (1) имеет конечное значение и, следовательно, второе слагаемое в скобках выражения (1) при  $R \rightarrow \infty$  обращается в нуль.

Выпишем выражения для тензора деформаций в цилиндрических координатах [6]:

$$\begin{aligned} u_{rr} &= \partial u_r / \partial r; \quad u_{\varphi\varphi} = r^{-1} \partial u_\varphi / \partial \varphi + u_r / r; \quad u_{zz} = \partial u_z / \partial z; \\ 2u_{r\varphi} &= r^{-1} \partial u_z / \partial \varphi + \partial u_\varphi / \partial z; \quad 2u_{rz} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r; \quad (3) \\ 2u_{r\varphi} &= \partial u_\varphi / \partial r - r^{-1} u_\varphi + r^{-1} \partial u_r / \partial \varphi. \end{aligned}$$

Полагая в соответствии с условиями задачи  $d/d\varphi = d/dz = 0$ ;  $u_z + u_\varphi = 0$ , получим, что отличны от нуля лишь две компоненты тензора:  $u_{rr}$  и  $u_{\varphi\varphi}$ , причем

$$u_{rr} = \partial u_r / \partial r; \quad u_{\varphi\varphi} = r^{-1} u_r. \quad (4)$$

Подстановка (1) в (4) дает:

$$u_{rr}(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} [T(r) - P(r)]; \quad u_{\varphi\varphi}(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} P(r), \quad (5)$$

$$\text{где } P(r) = \frac{1}{r^2} \int_0^r T(\rho) \rho d\rho.$$

Далее запишем выражение для тензора механических напряжений [6]

$$\sigma_{ik} = \frac{\hat{E}}{1+\sigma} \left( u_{ik} + \frac{\sigma}{1-2\sigma} u_{ll} \delta_{ik} \right) - \frac{\hat{E} \alpha T}{3(1-2\sigma)} \delta_{ik}, \quad (6)$$

где  $\delta_{ik}$  – символ Кронеккера;  $\hat{E}$  – модуль Юнга.

Из (5) и (6) следует

$$\sigma_{rr}(r,t) = -\frac{\alpha \hat{E}}{3(1-\sigma)} P(r); \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\alpha \hat{E}}{3(1-\sigma)} (P(r) - T(r)). \quad (7)$$

Установление простой связи между компонентами тензора напряжений и температурой возможно лишь для координаты, равной нулю (в центре шнура). Для нахождения величин напряжений, возникающих на оси токового шнура (где они максимальны), разложим интегралы, входящие в (1), в ряд в окрестности  $r = 0$

$$\int_0^r T(\rho) \rho d\rho = 0 + 0 \cdot r + \frac{T(0)}{2} r^2 + \dots, \quad (8)$$

откуда  $P(0) = T(0)/2$ . Таким образом, из (7) следует

$$\sigma_{rr}(0) = \sigma_{\varphi\varphi}(0) = -\frac{\alpha \hat{E} T(0)}{6(1-\sigma)}, \quad (9)$$

где  $\hat{E}$  – модуль Юнга;  $\delta T$  – превышение температуры в центре шнура.

Подставив в формулу (8) справочные значения, получим значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

#### Зависимость температуры перегрева и напряжения в центре шнура от его радиуса

$R$ , м	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$T$ , К	47,5	68,4	93,18	121,7	154,5
$\sigma_{rr}$ , Па	$7,009 \cdot 10^6$	$1,009 \cdot 10^7$	$1,375 \cdot 10^7$	$1,796 \cdot 10^7$	$2,280 \cdot 10^7$

#### Обсуждение результатов

Расчет прочности, проведенный по формуле (9), показывает, что напряжение в кристалле нитрида галлия при данных условиях составляет всего около 20 МПа (см. табл. 2), тогда как согласно справочным данным значение предела упругости составляет порядка 100 ГПа. Для генерации новых дислокаций полученного значения недостаточно. Таким образом, возникающие термопластические явления не могут приводить к возникновению новых дислокаций. Однако результаты, полученные в работе [4], показы-

вают, что температура перегрева зависит от радиуса шнура предпочтительного зарядопереноса, который в конечном итоге зависит от размеров кластера дислокаций. А поскольку согласно представленному выше расчету генерация новых дислокаций невозможна, то мы, вероятно, наблюдаем движение (разбегание) дислокаций от области расширения вещества вследствие перегрева за счет термопластических явлений. Как известно [7], силу  $\tau$ , достаточную для движения дислокаций, можно рассчитать по закону Гука:

$$\tau_{\max} = G \cdot x/b, \quad (10)$$

где  $\tau$  – сопротивление решетки сдвигу;  $G$  – модуль сдвига;  $x/b$  – деформация.

При этом экспериментальные значения  $\tau$  в  $10^4$ – $10^5$  раз меньше максимального значения, которое составляет  $G/2\pi$ , а также чем больше радиус дислокации, тем меньше сила, необходимая для ее перемещения [7]. А если учитывать, что в гетероструктуре нитрида галлия присутствует большая концентрация начальных дислокаций, которая составляет не менее  $10^9 \text{ см}^{-2}$  [8], то можно предположить, что такое движение приведет к созданию кластеров с радиусом более 9 мкм. Это может вызывать новые источники перегревов, увеличение концентрации крупных дефектов и их расширение, что и наблюдается в эксперименте.

#### Заключение

Таким образом, наблюдаемое в экспериментах расширение темных областей связано не с формированием новых дислокаций в области локального перегрева, а с движением множества дислокаций, находящихся вблизи области локального перегрева, и их группированием в кластеры, радиус которых впоследствии может превышать критическое значение и приводить к выходу прибора из строя [4].

#### Литература

1. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 1. – С. 122–127.
2. Исследование физических свойств объемных монокристаллов нитрида галлия / В.А. Иванцов, В.А. Суховеев, В.И. Николаев и др. // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39, № 5. – С. 858–860.
3. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN

при длительной работе / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшев и др. // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, вып. 2. – С. 224–232.

4. Еханин С.Г. Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN / С.Г. Еханин, М.Н. Романовский, А.А. Томашевич // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 57–60.

5. Исследование тепловых процессов в мощных InGaIn/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курьшев, М.Н. Мизеров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, вып. 3. – С. 390–396.

6. Ландау Л.Д. Теория упругости. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Т. 7. – М.: Наука, 1987. – 246 с.

7. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

8. Получение слоев GaN с пониженной плотностью дислокаций методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А.Н. Алексеев, Д.М. Красовицкий, С.И. Петров, В.П. Чалый // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, вып. 11. – С. 1460–1462.

#### Еханин Сергей Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. конструирования узлов и деталей РЭС (КУДР) ТУСУРа  
Тел.: +7 (382-2) 51-23-27  
Эл. почта: exan@ultranet.tomsk.ru

#### Томашевич Александр Александрович

Аспирант каф. КУДР  
Тел.: +7-923-431-01-81  
Эл. почта: tom.alex@mail.ru

Ekhanin S.G., Tomashevich A.A.

#### Investigation of degradation of GaN based semiconductor structures

This paper contains mechanical strength analysis for GaN based light emitting diode structure. An evaluation of role of thermoplastic deformation in expansion of defect areas in consideration of new defect formation in the GaN based semiconductor heterostructure is carried out.

**Keywords:** dislocation, gallium nitride, heterostructure, mechanical strength.