

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ**

А.А. Томашевич, С.Л. Аржаков, К.К. Слепцов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. С.Г. Еханин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: tom.alex@mail.ru

**INVESTIGATION OF DEGRADATION OF GAN BASED SEMICONDUCTOR STRUCTURES**

A.A. Tomashevich, S.L. Arzhakov, K.K. Slepcev

Scientific Supervisor: Prof., Dr. S.G. Ekhanin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR),

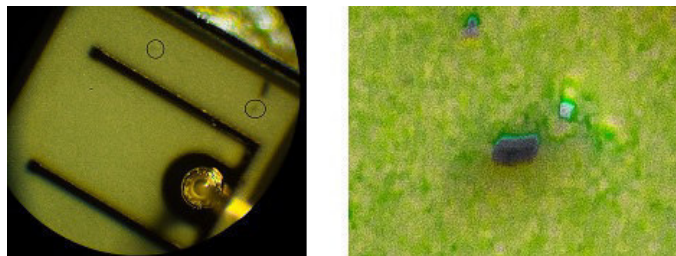
Russia, Tomsk, Lenin avenue 40, 634050

E-mail: tom.alex@mail.ru

***Abstract.** 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.*

**Введение.** Исследование механизмов деградации полупроводниковых структур имеет большое значение для понимания причин ухудшения свойств полупроводниковых приборов. В работе [1] неоднородность инжекции носителей заряда по площади структуры связывают с локальной диффузией и электромиграцией водорода, индуцированной механическими напряжениями, возникающими при формировании электродов. В данной работе мы проводим оценку роли термопластической деформации в расширении дефектных областей вследствие генерации новых дефектов.

**Экспериментальная часть.** Экспериментальные исследования картин фотолюминесценции поверхности гетероструктуры с ультрафиолетовой (УФ) подсветкой (известно, что дефектные области люминесцируют в желто-зеленом диапазоне [2, 3]), показали, что при испытании при повышенных плотностях тока формируются дефектные области, которые расширяются в процессе деградации.



*Рис. 1. Появление темных пятен на поверхности кристалла светодиода после испытаний*

В данном случае темная область представляет собой канал предпочтительного зарядопереноса. Безызлучательная рекомбинация при протекании тока по этому каналу приводит к возникновению перегрева и термических напряжений. Как видно из рис. 1, по периметру канала наблюдается зеленый

ореол (при УФ подсветке), что свидетельствует о повышенной плотности дислокаций. В таблице 1 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие зависимость площади, количества и диаметра дефектов от времени испытания и рабочего тока.

Таблица 1

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

N	Величина тока, мА	Время испытания, ч	Количество дефектов	Площадь дефекта, мкм <sup>2</sup>	Эфф. диаметр дефектов, мкм	Макс. диаметр, мкм
1	75	6,0	0	0	0	0
2	100	2,0	2	3,14	2	2
3	130	3,0	3	120,105	12,36	10
4	150	1,5	5	213,52	16,48	10
5	170	2,0	12	347,755	21,04	10
6	200	0,5	20	909,03	34,03	15

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. В статье [4], нами было показано, что при увеличении радиуса локального дефекта (шнура) температура в центре шнура увеличивается и при достижении радиуса 9 мкм перегрев в центре шнура превышает 150 °С, что совпадает с данными [5]. При таком перегреве могут возникать существенные термопластические явления, связанные с расширением вещества в области перегрева.

**Расчет.** Для нахождения поля деформаций  $u_r(r)$  следует решить уравнение механического равновесия. Воспользуемся готовым решением для изотропного цилиндра [6].

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

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.

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  $r = 0$ . В результате получено выражение:

$$\sigma_{rr} = \frac{\hat{E} \alpha \delta T_0}{6(1-\sigma)}, \quad (2)$$

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

Подставив в формулу (2) справочные значения, получим значения, представленные в таблице 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 на сдвиг показывает, что напряжение в кристалле нитрида галлия при данных условиях составляет всего около 20 МПа, тогда как в справочнике приводится значение предела упругости порядка 100 ГПа. Для генерации новых дислокаций полученного значения недостаточно. Таким образом, термопластический механизм размножения дислокаций невозможен. Однако результаты, полученные в работе [4], показывают, что температура перегрева зависит от радиуса шнура предпочтительного зарядопереноса, который в конечном итоге зависит от размеров кластера дислокаций. А поскольку согласно представленному расчету образование новых дислокаций невозможно, то мы вероятно наблюдаем движение (разбегание) дислокаций от области расширения вещества вследствие перегрева за счет термопластических явлений. Как известно [8], силу  $\tau$ , достаточную для движения дислокаций можно рассчитать по закону Гука:

$$\tau_{max} = G \cdot x/b$$

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 шире дислокация, тем меньше сила, необходимая для ее перемещения [8]. А если учитывать, что в гетероструктуре нитрида галлия присутствует большая концентрация дислокаций, которая составляет не менее  $10^9$  см<sup>-2</sup> [7], 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарева Н.И., Ефремов А.А. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – № 1. – С. 122–127.
2. Иванцов В.А., Суховеев В.А., Николаев В.И., Никитина И.П., Дмитриев В.А. Исследование физических свойств объемных монокристаллов нитрида галлия // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39. – № 5. – С. 858–860.
3. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшев В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 224–232.
4. Еханин С.Г., Романовский М.Н., Томашевич А.А. «Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN» // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 57–60.
5. Закгейм А.Л., Курышев Г.Л., Мизеров М.Н., Половинкин В.Г., Рожанский И.В., Черняков А.Е. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 390–396.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. Теоретическая физика. – Т.7 – М.: Наука, 1987. – 246с.
7. Алексеев А.Н., Красовицкий Д.М., Петров С.И., Чалый В.П. Получение слоев GaN с пониженной плотностью дислокаций методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46 – Вып. 11. – С. 1460–1462.
8. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560с.