

## **ДЕГРАДАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ИНЖЕКЦИИ**

**Ф. И. Маняхин**

Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия

*Получены экспериментальные распределения эффективной концентрации заряженных центров вблизи металлургической границы гетероперехода  $n\text{-GaAlAs}/p\text{-GaAs}$  после длительной наработки при пропускании прямого тока. Обнаружены существенные изменения в распределении концентрации и показана взаимосвязь с изменениями характеристик и параметров излучателей.*

Улучшение качества основных параметров и характеристик оптоэлектронных приборов, в частности полупроводниковых излучателей, идет в основном по пути применения современных технологических процессов, совершенных материалов и структур, а также по пути разработки оптимальных конструктивно-технологических решений. В то же время проблема деградации полупроводниковых излучателей остается актуальной и, несмотря на непрекращающиеся исследования этого явления, многие вопросы остаются открытыми и требуют своего решения.

Имеющиеся экспериментальные данные и сведения по исследованию деградации излучателей свидетельствуют о том, что основным стимулирующим ее процессом является пропускание прямого тока через  $p$ - $n$ -переход, или другими словами, деградация существенно ускоряется в процессе эксплуатации излучателей.

Существуют различные толкования этого явления [1]. Например, в работе [2] предполагается миграция междоузельных атомов примеси к  $p$ - $n$ -переходу из толщи структуры в результате снижения тормозящего электрического поля  $p$ - $n$ -перехода при прямом смещении. Модель, предложенная в работе [3], предполагает перевод атомов примеси, являющихся центрами излучательной рекомбинации, из узлов в междоузлия вследствие локального выделения колебательной энергии при акте безызлучательной рекомбинации. Существует гипотеза, согласно которой в  $p$ - $n$ -переходе возникают локальные участки по площади  $p$ - $n$ -перехода с уменьшенной шириной области пространственного заряда (ОПЗ), где возрастает туннельный ток, уменьшающий коэффициент инжекции [4]. Предложен также механизм деградации [5], согласно которому в области, близкой к металлургической границе  $p$ - $n$ -перехода, происходит интенсивное электрон-фононное взаимодействие, вероятность которого в несколько раз выше, чем в квазинейтральном объеме, в результате которого генерируются неравновесные точечные дефекты, создающие рекомбинационные безызлучательные уровни в запрещенной зоне. Экспериментальной проверке этого механизма посвящена настоящая работа.

Исследовались гетеропереходы  $n$ -GaAlAs/ $p$ -GaAs (ИК-излучатели АЛ-156), которые выдерживались длительное время в форсированном режиме при прямом токе  $I = 0,33$  А и температуре кристалла  $T = 370$  К (измерялась по изменению прямого падения напряжения и сдвигу спектра излучения).

У исследуемых излучателей в процессе наработки измерялось распределение эффективной концентрации электрически заряженных центров вблизи металлургической границы в активной  $p$ -области ( $p$ -GaAs), легированной германием до концентрации  $5 \cdot 10^{16}$ — $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Измерения проводились по неразрушающей двухчастотной методике [6]. Разрешающая способность по глубине составляла  $5 \cdot 10^{-7}$  см. Кроме того, проводились измерения вольт-амперной (ВАХ) и излучательной  $[L(I, U)]$  характеристик в диапазоне прямых токов  $10^{-7}$ — $10^{-1}$  А, а также времени жизни электронов в  $p$ -GaAs по спектральной плотности шума.

На рис. 1 представлена динамика изменения распределения эффективной концентрации заряженных центров в  $p$ -области вблизи металлургической границы гетероперехода  $n$ -GaAl/ $p$ -GaAs в результате пропускания прямого тока. Полученные результаты свидетельствуют, что вблизи металлургической границы гетероперехода происходит перераспределение заряженных центров, приводящее к изменению их концентрации по глубине активного слоя. При этом наиболее существенные изменения наблюдаются в области  $(1,0$ — $1,5) \cdot 10^{-5}$  см от металлургической границы. Ближе к этой границе изменений практически нет, а за ее пределами в глубине активного слоя они начинают проявляться при более длительной выдержке излучателей в указанных режимах.

Первоначальная линейная зависимость ширины области пространственного заряда при отсутствии напряжения смещения  $W(0)$  от обратной величины эффективной концентрации заряженных центров на краю ОПЗ в  $p$ -области  $N(0)$  с увеличением времени наработки деформируется в указанной области (рис. 2), при этом изменение концентрации в ней относи-

тельно первоначальной, имеет максимум на глубине  $\approx 1,2 \cdot 10^{-5}$  см от металлургической границы. Несмотря на значительное уменьшение эффективной концентрации отрицательно заряженных центров в этой области,  $W(0)$  изменяется слабо, что связано с ростом эффективной концентрации отрицательно заряженных центров слева вблизи указанной области. На расстоянии больше  $7,6 \cdot 10^{-5}$  см от металлургической границы после длительной наработки наблюдается увеличение эффективной концентрации отрицательно заряженных центров (рис. 3).

Вольт-амперные характеристики практически всех исследованных приборов сдвинулись в область меньших напряжений на 20—50 мВ при токах  $10^{-7} \div 10^{-6}$  А. Вместе с этим наблюдалось увеличение фактора неидеальности ВАХ и уменьшение времени жизни электронов в  $p$ -области на 10—15%. В области токов  $10^{-2} \div 10^{-1}$  А ВАХ практически восстанавливаются.

Излучательная способность приборов в диапазоне прямых токов  $10^{-6} \div 10^{-5}$  А в режиме генератора тока уменьшилась через 70 ч наработки в среднем на 10—25 %; при  $I = 10^{-1}$  А она практически не изменилась. В режиме генератора напряжения излучательная характеристика в области малых напряжений смещения улучшается, т. е. результат длительной наработки оказался прямо противоположным (рис. 4).

Рис. 1. Изменение распределения эффективной концентрации заряженных центров в активной области гетероперехода  $n$ -GaAlAs/ $p$ -GaAs при пропускании прямого тока  $I = 0,33$  А в течение 70 ч:  
1 — до наработки; 2 — после наработки

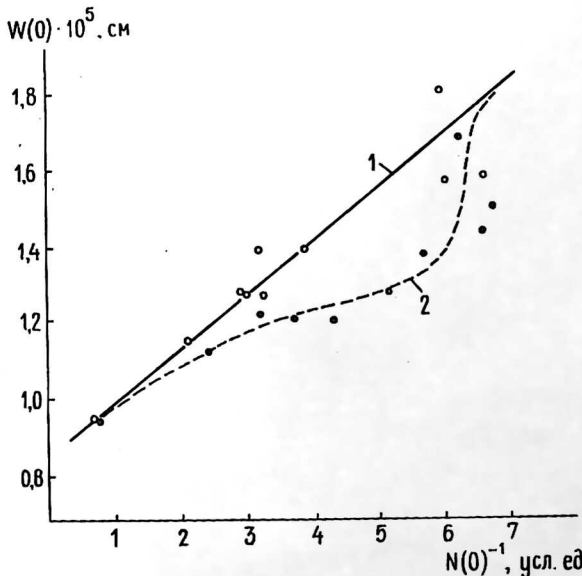
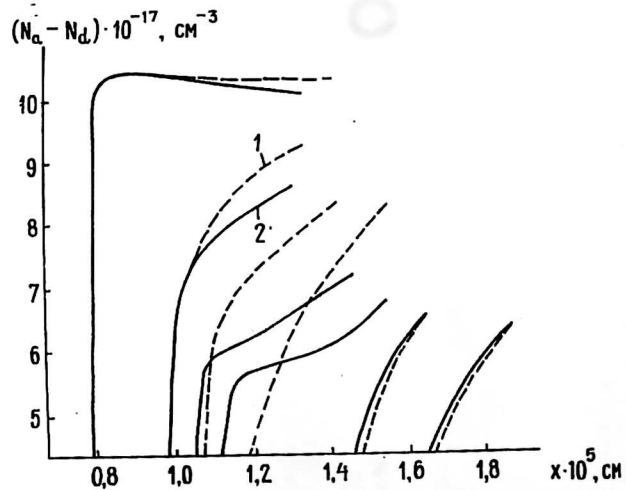


Рис. 2. Зависимость ширины ОПЗ при отсутствии напряжения смещения  $W(0)$  от эффективной концентрации заряженных центров на краю ОПЗ  $N(0)$ :  
1 — до наработки; 2 — через 70 ч при пропускании прямого тока  $I = 0,33$  А (для 10 излучателей)

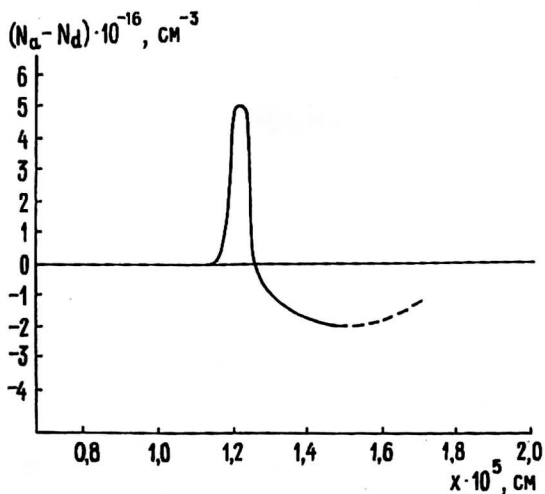
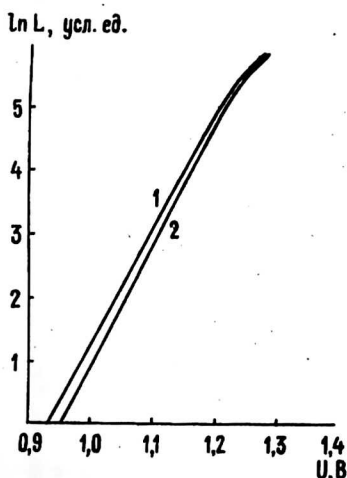


Рис. 3. Изменение эффективной концентрации заряженных центров через 70 ч ( $I = 0,33$  А)

Рис. 4. Излучательная характеристика:  
1 — до наработки; 2 — после наработки



В соответствии с приведенными результатами и привлекая предложенный в работе [5] механизм образования структурных дефектов кристаллической решетки, можно предположить следующие причины изменения распределения заряженных центров вблизи металлургической границы гетероперехода в активном слое излучающей структуры.

Инжектируемые в  $p$ -область из  $n$ -GaAlAs эмиттера электроны вследствие разрыва краев зон проводимости на границе  $n$ -GaAlAs/ $p$ -GaAs  $\Delta E_c \approx 0,3$  эВ изначально имеют высокую кинетическую энергию  $E_k = \Delta E_c \approx 0,3$  эВ в  $p$ -GaAs. Расчеты частоты столкновений при рассеянии, проведенные на основании выражений, приведенных в работе [7], показывают, что частота рассеяния электронов с энергией 0,3 эВ вблизи металлургической границы гетероперехода в 5 раз выше, чем в квазинейтральном объеме  $p$ -области. При этом основная доля в частоте рассеяния приходится на рассеяние с учетом полярных оптических фононов (64 %). При рассеянии между неэквивалентными долинами, когда может передаваться значительная доля энергии, частота рассеяния составляет  $10^{12}$  с (10 %).

При упрощенном подходе к оценке распределения числа интегрального числа рассеяний по глубине активного слоя можно получить следующее выражение:

$$n(x) = n(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{l_{\text{эф}}}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{l_{\text{эф}}}\right)\right),$$

где  $n(x)$  — число столкновений в сечении  $p$ -слоя на расстоянии  $x$  от металлургической границы;

$n(0)$  — число прошедших через  $p$ - $n$ -переход электронов. Максимум числа столкновений будет приходиться на глубину  $x = 0,67 l_{\text{эф}}$  (здесь  $l_{\text{эф}}$  — эффективная длина свободного пробега электронов). Если принять во внимание, что расчетная величина эффективной частоты рассеяний при  $E_k = 0,3$  эВ равна  $\lambda_{\text{эф}} = 10^{13} \text{ с}^{-1}$  [5], то с учетом тепловой скорости электронов с кинетической энергией  $E_k = 0,3$  эВ эффективная длина свободного пробега при  $T = 370 \text{ К}$  будет иметь величину  $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , а  $x \cong 0,67 l_{\text{эф}} = 0,84 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ . Для механизма рассеяния на полярных оптических фононах парциальная длина свободного пробега электронов при  $T = 370 \text{ К}$  и  $E_k = 0,3$  эВ будет иметь величину  $l_{\text{оп}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , а  $x \cong 0,67 l_{\text{оп}} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ . Проведенная оценка свидетельствует о том, что, по-видимому, основным механизмом рассеяния с передачей энергии, приводящим к существенному изменению эффективной концентрации заряженных центров в области  $(1,0-1,5) \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , является рассеяние на полярных оптических фононах, тогда как междолинное рассеяние вносит менее существенный вклад (парциальная длина свободного пробега при рассеянии между неэквивалентными долинами  $l_{\text{нэ}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , при рассеянии между эквивалентными долинами —  $l_{\text{эк}} = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ ). К сожалению, применяемый двухчастотный метод имеет предел для измерений по глубине, ограничиваемый началом развития пробоя при приложении обратного смещения, и для эффективной концентрации доноров и акцепторов ( $\text{Na} - \text{Nd}$ )  $\approx 10^{17} \text{ см}$  глубина порядка  $10^{-4} \text{ см}$  недостижима.

Вероятность образования дефекта по Френкелю увеличивается для электронов, взаимодействующих с решеткой, с волновым вектором больше  $k > 0$  и определяется выражением [8]:

$$\eta \approx \exp\left[-\frac{W - \varepsilon_v + \frac{1}{2} \hbar \omega \left(1 - \frac{T_e}{T}\right)}{k T_e}\right],$$

где  $\varepsilon_v$  — энергия захвата электрона на уровень вакансии;

$W$  — энергия образования дефекта Френкеля;

$T_e$  — температура электронного газа;

$T$  — температура окружающей среды;

$\hbar \omega$  — энергия фонона.

Образование дефекта по Френкелю более вероятно на неидеальном участке кристаллической решетки, вблизи примесного атома или другого дефекта.

Очевидно, что число генерируемых дефектов должно быть пропорционально числу прошедших через  $p$ - $n$ -переход электронов  $n(0) = Jt/q$  и вероятности образования пары Френкеля с учетом степени отжига дефектов. Поэтому распределение концентрации дефектов по глубине активного  $p$ -слоя может быть описано выражением

$$N_{i(x)} = \gamma \eta \frac{Jt}{q} \exp\left(-\frac{x}{l_{оп}}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{l_{оп}}\right)\right),$$

где  $\gamma$  — коэффициент, учитывающий степень отжига дефектов.

Это выражение не учитывает “растекание” дефектов от места генерации, т. е. их диффузию.

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемые изменения в распределении эффективной концентрации заряженных центров связаны с генерацией избыточных по отношению к квазинейтральному объему активной области полярных оптических фононов, что тождественно локальному разогреву этой области. При этом создаются благоприятные условия для генерации в ней избыточных вакансий как в подрешетке мышьяка, так и в подрешетке галлия. В этом случае возможны две ситуации. Часть этих вакансий занимают атомы легирующей примеси (германия), что приводит к самокомпенсации заряженных центров, и их эффективный отрицательный заряд уменьшается. В то же время, часть вакансий диффундирует за пределы области их генерации. При этом скорость диффузии вакансий галлия почти на порядок выше скорости диффузии вакансий мышьяка [9, 10]. А так как вакансии галлия являются акцепторами, то в области генерации вакансий (т. е. на глубине около  $0,67 l_{оп}$ ) наблюдается более глубокая компенсация  $p$ -GaAs, в то время как за пределами этой области генерации вакансии галлия увеличивают концентрацию отрицательно заряженных центров.

Следует также отметить, что междоузельные атомы галлия и мышьяка являются глубокими донорами и, по-видимому, происходит их накопление в области  $(1,0-1,5) \cdot 10^{-5}$  см в результате заполнения германием вакансий подрешеток галлия и мышьяка, следствием чего является более сильное изменение концентрации эффективного заряда заряженных центров в этой области, чем на ее краях.

Помимо эффектов, связанных с перераспределением эффективного заряда, в области около металлургической границы происходит накопление других антиструктурных дефектов, являющихся безызлучательными рекомбинационными центрами, в результате чего уменьшается эффективное время жизни носителей заряда и увеличивается прямой ток при постоянном напряжении смещения.

Уменьшение эффективной концентрации заряженных центров на краю ОПЗ  $N(0)$  приводит к тому, что для создания уровня инжекции, требуемого для получения одинакового квантового выхода, нужно прикладывать напряжение смещения меньшей величины, что следует из соотношения:

$$\Delta n(0) = \frac{n_i^2}{N_a(0)} \exp \frac{eU}{kT},$$

где  $\Delta n(0)$  — концентрация избыточных электронов на краю ОПЗ;

$n_i$  — концентрация собственных носителей заряда;

$N_a(0)$  — эффективная концентрация заряженных центров при отсутствии напряжения смещения;

$U$  — напряжение смещения.

Это подтверждается экспериментальными результатами, полученными при исследовании зависимости внешнего квантового выхода ИК-излучателей АЛ-156 от величины  $N_a(0)$ , представленной на рис. 5. Эти исследования показывают, что внешний квантовый выход  $Z$  в режиме генератора тока существенным образом зависит от этого параметра даже при одинаковой степени легирования базового эпитаксиального слоя активной области, т. е. определяется градиентом концентрации эффективного заряда центров вблизи металлургической границы  $p$ - $n$ -перехода.

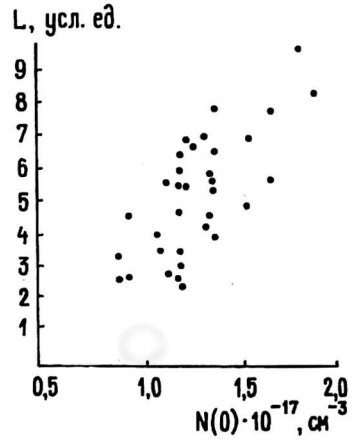


Рис. 5. Зависимость внешнего квантового выхода ИК-диодов АЛ-156 от величины обратной эффективной концентрации заряженных центров на краю ОПЗ при отсутствии напряжения смещения  $N(0)$  в режиме генератора тока.

В то же время от распределения эффективного заряда зависит степень изменения его при инжекции электронов.

Таким образом, в результате настоящей работы обнаружено изменение в распределении эффективного заряда заряженных центров вблизи металлургической границы гетероперехода  $n$ -GaAlAs/ $p$ -GaAs в активном  $p$ -слое на расстоянии, сравнимым с длиной свободного пробега инжектированных электронов, а также показана взаимосвязь изменения характеристик и параметров излучателей с наблюдаемым эффектом. Полученные экспериментальные результаты согласуются с предположением о термодинамической природе образования антиструктурных дефектов вблизи металлургической границы гетероперехода [5], приводящих к постепенной деградации квантового выхода.

Использованная методика и устройство измерения распределения заряженных центров вблизи границы  $p$ - $n$ -перехода дают возможность контролировать качество его формирования еще на стадии изготовления эпитаксиальных структур и отбраковывать из них потенциально нестойкие к деградации или же отбирать перспективные для производства приборов с длительным сроком службы структуры.

## Литература

1. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. — М.: Энергоиздат, 1983.
2. Longini R. L. Rapid zinc diffusion in gallium arsenide// Solid State Electronics, 1962. V. 5. № 1. P. 127—130.
3. Gold R. D., Weisberg L. R. Permanent degradation of GaAs tunnel diodes// Solid St. El., 1964. V. 7. № 11. P. 811—821.
4. Евстропов В. В., Коган Л. М., Трушина В. Е., Царенков Б. В. Об изменении концентрации рекомбинационных центров в результате длительного протекания инжекционного тока через GaP- $p$ - $n$ -структуру// ФТП, 1971. Т. 5. Вып. 7. С. 1454—1457.

5. *Маняхин Ф. И.* Роль рассеяния носителей заряда в ОПЗ гетеропереходах в процессе деградации излучающих диодов: Матер. докл. НТС "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". — М.: МЭИ; С.-Петербург, ГЭУ, 1995.
6. *Берман Л. С.* Емкостные методы исследования полупроводников. — Л.: Наука, 1972.
7. *Шур М.* Современные приборы на арсениде галлия. — М.: Мир, 1991.
8. *Вавилов В. С., Кив А. Е., Ниязова О. Р.* Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. — М.: Наука, 1981.
9. *Хилсум К., Роуз А.* Полупроводники типа А В. — М.: Иностран. лит-ра, 1963.
10. *Chiang S. Y., Pearson G. L.* Properties of vacancy defects in GaAs single crystals// J. of Appl. Phys. 1975. V. 46. № 7. P. 2986—2991.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 1995 г.*

## **DEGRADATION OF EMITTING DIODES BECAUSE OF HIGH LEVEL INJECTION**

*F. I. Manjahn*

Moscow Steel and Alloys Institute

*The experimental distribution of the effective concentration of charge centers near of the n-GaAlAs/p-GaAs heterojunction metal border were made after long let pass of the forward current. The essential charges were discovered into distribution of the concentration of charge centers. It was showed correlation with modifications of the infrared diode characters.*