

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.315.592

Ирха В.И.  
Ирха В.И.  
Irkha V.I.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ДЛЯ ВОСП

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДІВ ДЛЯ ВОСП

### INVESTIGATION OF DEGRADATION OF LIGHT-EMISSION DIODES OF FOC SYSTEMS

**Аннотация.** Проведено исследование деградации светоизлучающих диодов для волоконно-оптических систем передачи на основе  $Ga_{1-x}Al_xAs$  при питании импульсами тока 10 А, длительностью 100 нс и частотой 300 Гц, а также при 50 мА, 20 мА и температуре 80° С. Обнаружен рост концентрации примесных центров в процессе деградации. Определены пути повышения эффективности электролюминисценции таких светодиодов.

**Анотація.** Проведено дослідження деградації світло випромінюючих діодів для волоконно-оптичних систем передачі на основі  $Ga_{1-x}Al_xAs$  при живленні імпульсами струму 10 А, тривалістю 100 нс та частотою 300 Гц, а також при 50 мА, 20 мА та температурі 80° С. Виявлено зростання концентрації домішкових центрів у процесі деградації. Показано шляхи підвищення ефективності електролюмінісценції таких світлодіодів.

**Summary.** Degradation of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  light-emission diodes for fiber-optical communication systems was investigated. Diodes supplied by 100 ns impulses of 10A current with 300Hz frequency and by direct current of 50mA, 20mA with the temperature of 80° C. During degradation process increasing of concentration of impurity centers was detected. The possibility of increasing efficiency of electroluminescence of such LEDs was suggested.

Светоизлучающие диоды (СИД), предназначенные для использования в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) отличаются конструктивно от индикаторных СИД, что обусловлено необходимостью получать малые размеры светящегося пятна и острую диаграмму направленности при высокой требуемой мощности излучения. Проблема состоит в том, что СИД для ВОСП обычно содержат один либо несколько слоев, неоднородно легированных в плоскости рабочего *p-n*-перехода. Кроме того, такие СИД работают при более высоких плотностях тока по сравнению с индикаторными СИД. Указанные факторы служат дополнительными источниками деградационных явлений в СИД для ВОСП.

Для сохранения рабочих параметров ВОСП, содержащих СИД, необходимо выполнение дополнительных условий, не существенных для индикаторных СИД. Так, кроме сохранения в процессе работы мощности излучения при фиксированном рабочем токе, для используемых СИД необходимо сохранение ширины интервала линейности зависимости выходной мощности от тока. При выполнении этого условия уменьшается динамический диапазон ВОСП. Кроме того, для СИД, работающих в ВОСП в режиме, близком к оптимальному с точки зрения КПД, необходимо сохранение параметров вольтамперной характеристики в рабочем диапазоне токов, а именно – дифференциального сопротивления и напряжения отсечки. Изменение данных параметров приведет к нестабильности коэффициента передачи ВОСП [1–4].

Сказанное выше свидетельствует о необходимости изучения деградационных явлений, как общих для всех СИД, так и характерных для СИД, предназначенных к использованию в ВОСП.

В качестве СИД для ВОСП в настоящее время широко используются *p-n*-переходы на основе GaAlAs. Эффективность электролюминесценции данных *p-n*-переходов существенно ограничивается безызлучательной рекомбинацией носителей заряда через глубокие уровни. Наиболее важным как с научной, так и с практической точек зрения для определения путей повышения эффективности электролюминесценции *p-n*-переходов, является вопрос о природе глубоких уровней, служащих основным каналом безызлучательной рекомбинации GaAlAs. Решение данного вопроса необходимо также для повышения срока службы СИД и лазерных диодов.

В литературе существуют предположения о связи указанных уровней с собственными и примесными точечными дефектами полупроводников AlB5, а также с дислокациями [1–3]. Однако экспериментальных данных недостаточно для ответа на вопросы о природе глубоких уровней, ответственных за безызлучательную рекомбинацию в квазинейтральных областях и в обедненном

слое *p-n*-переходов, о механизме процессов, приводящих к появлению данных уровней в *p-n*-переходах. Поэтому необходимо дальнейшее исследование диградационных явлений в СИД, в том числе и токовой диградации.

Цель данной работы – исследование электрических и электролюминесцентных характеристик СИД для ВОСП и их изменений в процессе работы в режимах как постоянного тока, так и при импульсном питании, при различных плотностях тока и рабочих температурах и выяснение на основе этих данных механизма диградации СИД.

Для решения данной задачи в процессе выполнения работы исследовались структуры на основе GaAlAs, описание которых, а также методика эксперимента представлены в работах [5–7]. Измерялись вольт-амперные характеристики прямого и обратного токов СИД, вольт-фарадные характеристики барьерной емкости, люмен-амперные и люмен-вольтовые характеристики электролюминесценции СИД, полученных разными технологическими приемами. Различные партии образцов подвергались старению при пропускании постоянного тока 50 мА, 20 мА при температуре 80°C и тока 10 А в П-импульсах длительностью 100нс, частотой 300 Гц (плотность более  $10^5$  А/см<sup>2</sup>). Изучалось влияние токовой тренировки на указанные характеристики СИД.

Изменение интенсивности излучения СИД со временем измерялось с помощью кремниевого фотодиода ФД7-К, питаемого от стабилизированного блока питания. При измерениях СИД жестко фокусировались относительно фотодиода. Измерение интенсивности электролюминесценции светодиодов в процессе диградации осуществлялось при токе 10 мА.

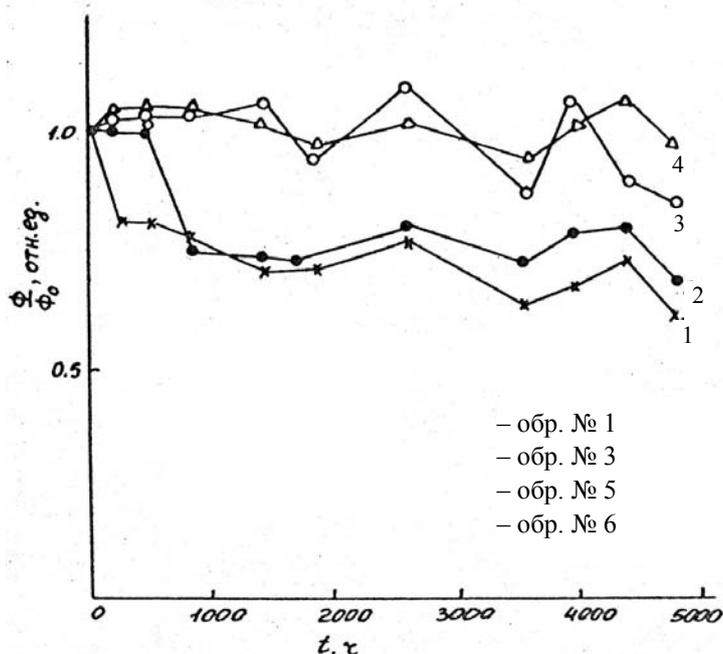


Рисунок 1 – Влияние диградации СИД на основе Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As при пропускании тока плотностью более  $10^5$  А/см<sup>2</sup> длительностью 100 нс и частотой 300 Гц

Как показано ранее в работах [5, 6], при длительном пропускании прямого тока происходит изменения интенсивности излучения и электрических характеристик СИД.

Необходимо отметить, что при различных режимах диградации СИД для ВОСП на разных образцах диградация проявляется по разному (рис. 1). Процесс диградации можно разбить на 2 стадии: на 1-й стадии диградации, которая длится около 500 ч, изменения интенсивности излучения у образцов различны как по величине, так и по знаку; на 2-й стадии диградации у всех исследованных образцов происходит уменьшение интенсивности излучения. При импульсной диградации СИД интенсивность электролюминесценции (в пределах 2000 ч) для одной и той же серии образцов уменьшается на 30% и увеличивается на 3-6%, а в дальнейшем идет немонотонное изменение интенсивности излучения. Но при работе в течение 5000 ч образцы сохраняют от 70 до 90% первоначальной интенсивности излучения. Повышение

температуры увеличивает скорость диградации светодиодов.

Наличие различных по знаку изменений интенсивности излучения исследованных СИД в процессе диградации при различных режимах существенно для понимания механизма диградации СИД.

На начальной стадии диградация СИД не сопровождается изменениями средней концентрации легирующей примеси в *p-n*-переходе и прилегающих к нему квазинейтральных областях. Это подтверждается неизменностью вольт-фарадных характеристик как на 1-й, так и на 2-й стадиях процесса диградации.

Изменения интенсивности излучения исследованных СИД четко коррелируют с изменениями вероятности рекомбинации носителей заряда в компенсированном слое или туннельной рекомбинации через глубокие примесные уровни в *p-n*-переходах. Отсюда можно сделать вывод, что диградация исследованных СИД для ВОСП обусловлена изменениями спектра и концентраций глубоких уровней в обедненной области *p-n*-перехода. Катастрофическое уменьшение интенсивности инжекционной электролюминесценции при диградации у части исследованных структур можно

связать с возникновением и ростом темных пятен. Чем больше размеры пятна, тем меньше интенсивность излучения, т.е. катастрофическая деградация СИД связана с образованием безызлучающих областей в кристалле. Для более детального изучения темных пятен необходимо изучить поведение примесей в кристалле в процессе катастрофической деградации.

Основные закономерности деградации исследованных СИД для ВОСП можно объяснить, анализируя кривые деградации инжекционной электролюминесценции и изменение остальных характеристик СИД в процессе деградации. Особенно важную информацию можно получить из анализа изменений, происходящих при деградации в вольт-амперных характеристиках (ВАХ). По виду ВАХ можно судить о механизме прохождения тока через *p-n*-переход. Форма кривых ВАХ зависит от типа перехода и условий рекомбинации носителей заряда.

На рис. 2, 3 представлены ВАХ образцов №3 и 5 на основе  $Ga_{1-x}Al_xAs$  при температуре 300 К (кривая 1-до деградации; кривая 2 получена после деградации в течение 4000 ч). ВАХ образцов могут быть аппроксимированы выражением

$$I = I_0 e^{\frac{eU}{nkT}}, \quad (1)$$

где  $n = 1,7 - 2,1$ .

ВАХ такого типа обычно связываются с рекомбинацией электронов и дырок в области объемного заряда [1]. В большинстве исследованных образцов в процессе деградации наблюдается сильное возрастание тока при одном и том же напряжении; в основном ток определяется рекомбинацией в области пространственного заряда во всем рабочем диапазоне смещений, вплоть до значений, при которых начинает сказываться последовательное сопротивление. На ВАХ прямого тока *p-n*-переходов можно выделить участки, аппроксимируемые экспонентой

$$I = I_0 e^{\alpha U}, \quad (2)$$

где  $\alpha < \frac{e}{2kT}$ , соответствующие «избыточному» току. Рост «избыточного» тока является одной из основных причин деградации исследованных СИД [2]. В работе [4] «избыточные» токи связываются с туннелированием носителей заряда через глубокие уровни в обедненном слое *p-n*-перехода. Как

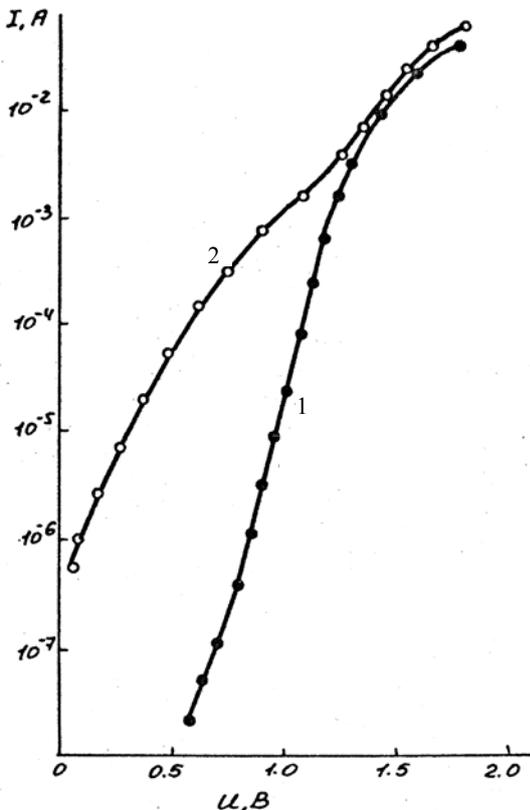


Рисунок 2 – ВАХ прямого тока при 300 К образца № 3 до (1) и после (2) деградации

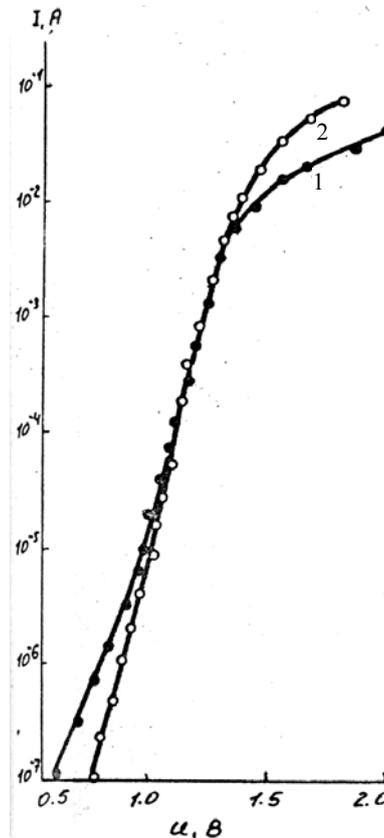


Рисунок 3 – ВАХ прямого тока при 300 К образца № 5 до (1) и после (2) деградации

видно из рис. 2, деградация СИД для ВОСП в течение 4000 ч приводит к сильному росту избыточного тока (кривая 2), что в свою очередь приводит к снижению интенсивности электролюминесценции (рис. 1, кривая 1). Уменьшение «избыточного» тока в процессе деградации в области напряжений 0,5-1 В (кривая 2, рис. 3) приводит к возрастанию интенсивности излучения (кривая 3, рис. 1). Обычно «избыточный» ток при отсутствии вырождения электронов и дырок обусловлен неоднородностями в обедненном слое. В литературе [2–4], показано, что прямой и обратный туннельные токи обычно связаны с одними и теми же неоднородностями  $p-n$ -перехода. Поэтому изучение туннельных обратных токов может дать сведения о механизме деградации исследованных СИД с большими «избыточными» токами.

На рис. 4 представлена обратная ВАХ  $p-n$ -перехода СИД при 300 К (кривая 1-до деградации; кривая 2-после деградации). Как следует из анализа кривых, обратный ток можно объяснить туннелированием носителей заряда через обедненную область  $p-n$ -перехода. Величина обратного тока приблизительно экспоненциально возрастает при повышении обратного напряжения. Напряжение пробоя составляет всего 6-8 В. Величина тока при фиксированном напряжении увеличивается с повышением температуры. Более сильная температурная зависимость тока при фиксированном напряжении, чем температурная зависимость ширины запрещенной зоны, свидетельствует о туннельно-термической природе обратного тока.

Туннельный пробой  $p-n$ -перехода наблюдается обычно при ширине области объемного заряда менее 200 Å, что намного ниже средней ширины обедненной области в  $p-n$ -переходах исследованных СИД. Таким образом, этот вид пробоя с наличием резко выраженных неоднородностей толщины  $p-n$ -перехода присущ всем исследованным СИД.

Для проверки, связано ли увеличение обратного тока исследованных СИД при длительном пропускании прямого тока с изменением концентрации примесей во всем обедненном слое или же в его локальных областях, исследовалась ВАХ фототока  $p-n$ -переходов в фотодиодном режиме при освещении светом лампы накаливания. Получено незначительные изменения диффузионных длин неосновных носителей заряда. Практически остается неизменной и средняя толщина области объемного заряда, что подтверждается неизменностью емкости  $p-n$ -перехода в процессе деградации. Резкое увеличение обратного тока (кривая 2 рис. 4) при неизменности усредненных параметров  $p-n$ -перехода можно объяснить локализацией обратного тока на неоднородностях, площадь которых меньше сечения  $p-n$ -перехода.

Анализ полученных результатов показал, что во всех исследованных СИД для ВОСП в  $p-n$ -переходах имеются микронеоднородности с пониженной толщиной области объемного заряда. Толщина обедненного слоя на микронеоднородностях у различных образцов составляет от 70 до 120 Å, эффективный поперечный размер микронеоднородностей лежит в пределах от 0,34 до 0,50 мкм. В процессе деградации толщины обедненного слоя уменьшаются до 10 – 35 Å, а эффективные диаметры областей туннелирования соответственно до 0,11 – 0,20 мкм.

Полученные параметры микронеоднородностей свидетельствуют, что они связаны со скоплением примесей на дислокациях, пересекающих область объемного заряда  $p-n$ -перехода. У тех образцов, где уменьшается интенсивность излучения при токовой тренировке, уменьшается и толщина обедненной области, т.е. увеличивается плотность объемного заряда. У образцов, увеличивающих яркость свечения в процессе деградации, уменьшается плотность объемного заряда в  $p-n$ -переходе. Таким образом, при длительном пропускании прямого тока через диод избыточный ток не меняется в одну сторону, – в сторону его увеличения. Он может и уменьшаться в зависимости от перераспределения примеси в области  $p-n$ -перехода, ответственной за локальные уровни, через которые осуществляется туннелирование. Уменьшение доли избыточного тока приводит к

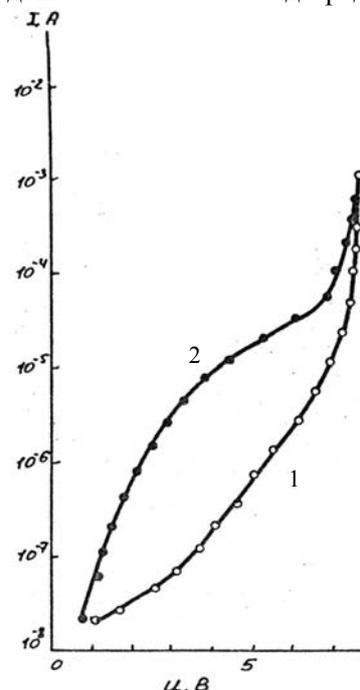


Рисунок 4 – Обратная ВАХ образца № 5 до (1) и после(2) 4000 ч деградации

увеличению интенсивности излучения, т.е. к «аномальной деградации» Она не обязательно должна начинаться с первых часов деградации. Образец может какой-то отрезок времени стариться обычно, при этом его характеристики претерпевают изменения, типичные для нормальной деградации. А затем обычная деградация может перейти в «аномальную».

На рис. 5 представлена люмен-амперная характеристика при 300К электролюминесценции СИД для ВОСП. Для всех образцов характерна зависимость интенсивности излучения от величины тока вида

$$\Phi = C \cdot I^m, \quad (3)$$

где  $m \approx 2$ , что согласуется с предположением о безызлучательном характере рекомбинации носителей заряда в области объемного заряда  $p-n$ -перехода. При максимально допустимых рабочих токах наблюдается уменьшение показателя степени  $m$ . Т.е. в исследованных структурах величина внутреннего квантового выхода электролюминесценции ограничивается рекомбинацией носителей заряда в обедненной области  $p-n$ -перехода. В различных образцах СИД для ВОСП интенсивность безызлучательной рекомбинации в обедненной области  $p-n$ -

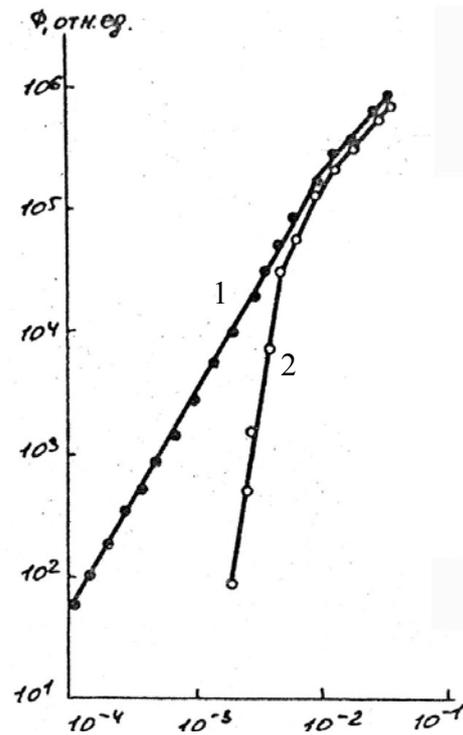


Рисунок 5 – Люмен-амперная характеристика образца № 3 до (1) и после (2) 4000 ч деградации

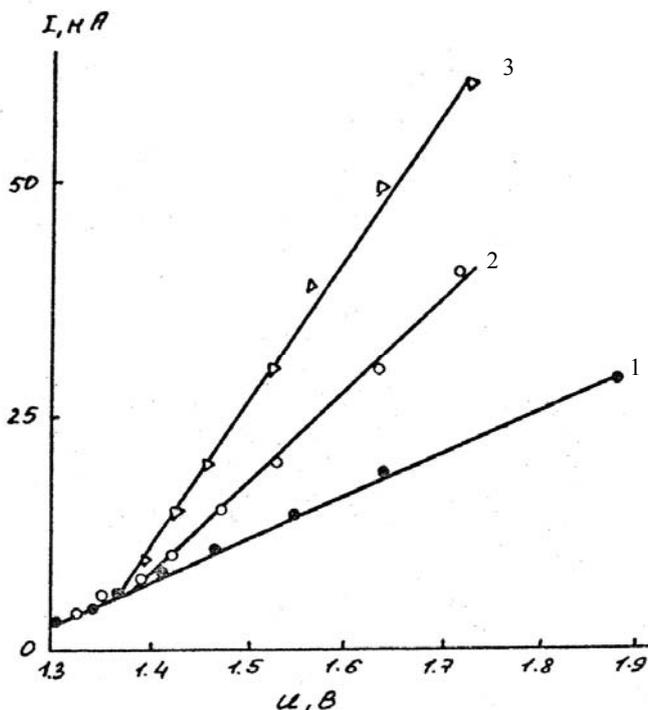


Рисунок 6 – ВАХ образца № 5 в линейном масштабе в области больших токов: 1-до деградации; 2 – после 850 ч деградации; 3 – после 4000 ч деградации

перехода не одинакова. Этим объясняется разброс яркости излучения при фиксированной величине тока. В процессе деградации исследованных СИД наблюдается сильное увеличение показателя  $m$ , что связано с большим возрастанием избыточных токов, т.е. главную роль играет безызлучательная компонента тока (кривая 2 рис. 5).

Так как излучение связано с рекомбинацией через мелкие акцепторные уровни, то независимо от рекомбинации в области объемного заряда или в квазинейтральной области интенсивность излучения зависит от величины приложенного напряжения как

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{eU}{nkT}}, \quad (4)$$

где  $n = 1,4$ , и не меняется в процессе деградации, что подтверждается люмен-вольтовыми характеристиками. На рис. 6 приведена часть ВАХ образца №5, построенная в координатах  $I(U)$  в области токов

$1 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2}$  А до деградации (1) и в процессе деградации (2,3), где происходит ее спрямление.

При больших плотностях тока омический участок характеристики сменяется более сильной зависимостью прямого тока от напряжения. В процессе деградации наблюдается уменьшение последовательного сопротивления: 13,5 Ом до деградации; 10,4 Ом после 850 ч деградации и 6,2 Ом после 4000 ч деградации. Данное явление, скорее всего, не связано с изменением концентрации основных носителей и времени жизни неосновных носителей заряда в активном слое. Об этом свидетельствует малость относительных изменений квантового выхода излучения ( $\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \leq 0,3$ ) при изменении последовательного сопротивления в 2 раза и более. Возможно, обнаруженное явление связано с процессами в приконтактных областях кристаллов.

На основе изложенных данных можно сделать вывод, что снижение квантовых эффективностей СИД для ВОСП на основе  $Ga_{1-x}Al_xAs$  в процессе деградации связано с наличием в  $p-n$ -переходах микронеоднородностей, через которые проходит избыточный ток, имеющий туннельную природу. Эти микронеоднородности вероятно связаны со скоплениями примесей на дислокациях, пересекающих  $p-n$ -переход. По большим обратным токам в процессе производства можно отбраковывать образцы. Существенные изменения концентрации примесей в области неоднородности в процессе деградации при практической неизменности средней плотности объемного заряда можно объяснить с учетом дрейфа примесей в электрическом поле. Совершенно так же, как электроны и дырки «стекаются» к неоднородности, создавая плотность тока, намного превышающую ее среднее значение, так и примесные ионы стягиваются электрическим полем в область неоднородности из значительной части квазинейтральной области.

#### Литература

1. Свечников Г.С. Интегральная оптика / Свечников Г.С. – К.: Наукова думка, –1988. – 168 с.
2. Елисеев П.Г. Проблемы надежности и физика деградационных процессов в полупроводниковых лазерах / П.Г. Елисеев // Итоги науки и техники. Сер.: Радиотехника. – М.: ВИНТИ, 1978. – Т.14. – Ч.2. – 68 с.
3. Берг А.А. Светодиоды / А.А. Берг, П.Д. Дин. – М.: Мир. – 1979. – 686 с.
4. Ирха В.И. Эффективность электролюминесценции в  $p-n$ -переходах на основе  $GaAsP$  с учетом влияния глубоких рекомбинационных центров / В.И. Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – №2. – С. 106-109.
5. Ирха В.И. Особенности механизма электролюминесценции излучающих диодов для ИК области спектра / В.И. Ирха, А.Р. Коваль // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2002. – №1. – С. 112-115.
6. Ирха В.И. Особенности структур и характеристик диодов для волоконно-оптических линий связи / В.И. Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса. – 2004. – №1. – С. 86-88.
7. Ирха В.И. Исследование деградации многослойных излучательных гетероструктур на основе  $GaAlAs$  для ИК – области спектра / В.И. Ирха, А.Р. Коваль // Моделювання та інформаційні технології. – 2005. – Вип. № 31. – С. 55-59.