

## РАДИОТЕХНИКА, ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЯ ТА ЕЛЕКТРОНИКА

УДК 621.304.9

### ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В СЛАБО ВИРОЖДЕННОМ $n$ -GaAs

*Викулин И.М., Коробицын Б.В., Криськив С.К.*

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

### ВИПРОМІНЮВАЛЬНА РЕКОМБІНАЦІЯ У СЛАБО ВИРОДЖЕНОМУ $n$ -GaAs

*Викулін І.М., Коробіцин Б.В., Криськів С.К.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

### RADIATIVE RECOMBINATION IN A WEAKLY DEGENERATE $n$ -GaAs

*Vikulin I.M., Korobitsin B.V., Kryskiv S.K.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[kriskiv2@yandex.ua](mailto:kriskiv2@yandex.ua)*

**Аннотация.** Измерены спектры краевой люминесценции арсенида галлия (GaAs) слабо легированного  $p$ - и  $n$ -типа в интервале температур 77...300 К. Выяснены типы излучательных переходов и их зависимости от степени легирования материала и температуры. Установлен критерий исчезновения донорных энергетических уровней вследствие дебаевского экранирования примесей. Проведено сравнение спектров фотолюминесценции со спектрами электролюминесценции асимметричного  $p^+-n$ -перехода в режиме сильной инжекции в  $n$ -области. Показана особая роль мелких донорных состояний в излучательной рекомбинации в невырожденном и слабо вырожденном  $n$ -GaAs.

**Ключевые слова:** фотолюминесценция, электролюминесценция, дебаевское экранирование, легирование.

**Анотація.** Виміряні спектри крайової люмінесценції арсеніду галію (GaAs) слабо легуваного  $p$ - і  $n$ -типу в інтервалі температур 77...300 К. З'ясовані типи випромінювальних переходів та їх залежності від ступеня легування матеріалу і температури. Встановлено критерій зникнення донорних енергетичних рівнів унаслідок дебаєвського екранування домішок. Проведено порівняння спектрів фотолюмінесценції зі спектрами електролюмінесценції асиметричного  $p^+-n$ -переходу у режимі сильної інжекції в  $n$ -області. Показана особлива роль дрібних донорних станів у випромінювальній рекомбінації в невырожденному і слабо вырожденному  $n$ -GaAs.

**Ключові слова:** фотолюмінесценція, електролюмінесценція, дебаєвське екранування, легування.

**Abstract.** The edge luminescence spectra of weakly-doped gallium arsenide (GaAs) of  $p$ - and  $n$ -types in the temperature range 77 to 300 K have been measured. The types of radiative transitions and their

dependence on the doping degree and temperature are determined. The criterion of disappearance of the donor energy levels due to the Debye shielding of impurities is established. The photoluminescence spectra were compared with the electroluminescence spectra of asymmetric  $p$ - $n$  junction in the regime of strong injection into the  $n$ -region. A special role of the shallow donor states in the radiative recombination in non-degenerated and weakly-degenerated  $n$ -GaAs is shown.

**Key words:** photoluminescence, electroluminescence, Debye shielding, doping

Интерес к изучению излучательной рекомбинации в полупроводниках возник и затем резко возрос после 1962 года, когда в эффективной электролюминесценции арсенид-галлиевого диода обнаружили сужение спектра краевой люминесценции [1]. Это, как было предсказано ранее [2], свидетельствовало о возникновении вынужденного когерентного излучения (лазерный эффект). За прошедшие годы работ по исследованию рекомбинационного излучения в виде фотолюминесценции, электролюминесценции и катодоллюминесценции проделано множество.

Первые работы в этом направлении были посвящены в основном арсениду галлия как полупроводнику с наибольшей эффективностью преобразования электрической энергии в световую. В настоящее время хорошо изучены многие другие полупроводники, генерирующие излучение в широком диапазоне длин волн. Но интерес к арсениду галлия не падает.

Положение сейчас таково, что хорошо изучены процессы излучательной рекомбинации в слабо легированном (относительно чистом) арсениде галлия в диапазоне температур 4,2...300 К и в сильно легированном материале, из которого изготавливают лазеры. Переходная область исследована неполно.

**Целью настоящей статьи** является анализ процессов излучательной рекомбинации в слабо легированном арсениде галлия и исследование этих процессов в области от невырожденного до сильно вырожденного материала в диапазоне температур от жидкого азота до комнатной (77...300 К). Исследовались спектры наиболее эффективной краевой люминесценции.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции слабо легированного арсенида галлия  $p$ -типа. Подобный вид имеет спектр высокоэнергетической полосы слабо легированного арсенида галлия  $n$ -типа. Использована спектральная координата, отвлеченная от температурной зависимости ширины запрещенной зоны, как в нашей ранней работе [3]. Интенсивности спектров нормированы по главному пику.

Из приведенных спектров сразу видно, что при всех указанных температурах механизм генерации спектральной полосы с большей энергией (полоса В) одинаков.

Энергия максимума меньше ширины запрещенной зоны на 7...8 мэВ, что соответствует излучательным переходам донор-валентной зоны. Энергия максимума полосы с меньшей энергией (полоса С) меньше ширины запрещенной зоны на 30 мэВ. Мы считаем, что эта полоса обусловлена переходами донор-акцептор. Это согласуется с выводами работы [4]. Можно было бы ожидать, что энергия максимума полосы С будет меньше ширины запрещенной зоны на сумму энергий ионизации доноров и акцепторов (36 мэВ). Но, как показано в работе [5], вклад энергии кулоновского взаимодействия в наиболее вероятной паре донор-акцептор как раз равен энергии ионизации донора. Это и приводит к такому виду спектра. Полоса С с ростом температуры угасает, что связано с ростом ионизации акцепторов.

На рис. 2 показаны результаты измерений энергии максимума спектральных полос А (рекомбинация зона проводимости-валентная зона), В (донор-валентная зона) и С (донор-акцептор). Штриховой линией показана зависимость ширины запрещенной зоны от температуры по данным [6].

Часть данных была получена нами ранее [3]. Новыми являются результаты для  $n$ -GaAs с концентрациями электронов (мелкого донора-теллура):  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и  $2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Из рис. 2 видно, что при малых концентрациях дырок ( $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и менее) спектр краевого излучения состоит из полос В и С. При этом температура, при которой еще заметна полоса С, тем больше, чем больше концентрация дырок (акцептора цинка).

Для слабо легированного *n*-GaAs с концентрацией электронов (доноров)  $9,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  спектр краевого излучения во всем диапазоне температур состоит из одной полосы В. Эти данные опубликованы нами ранее [3]. Они практически идентичны результатам других исследований [7] и согласуются с работой [8] для температур 77...300 К.

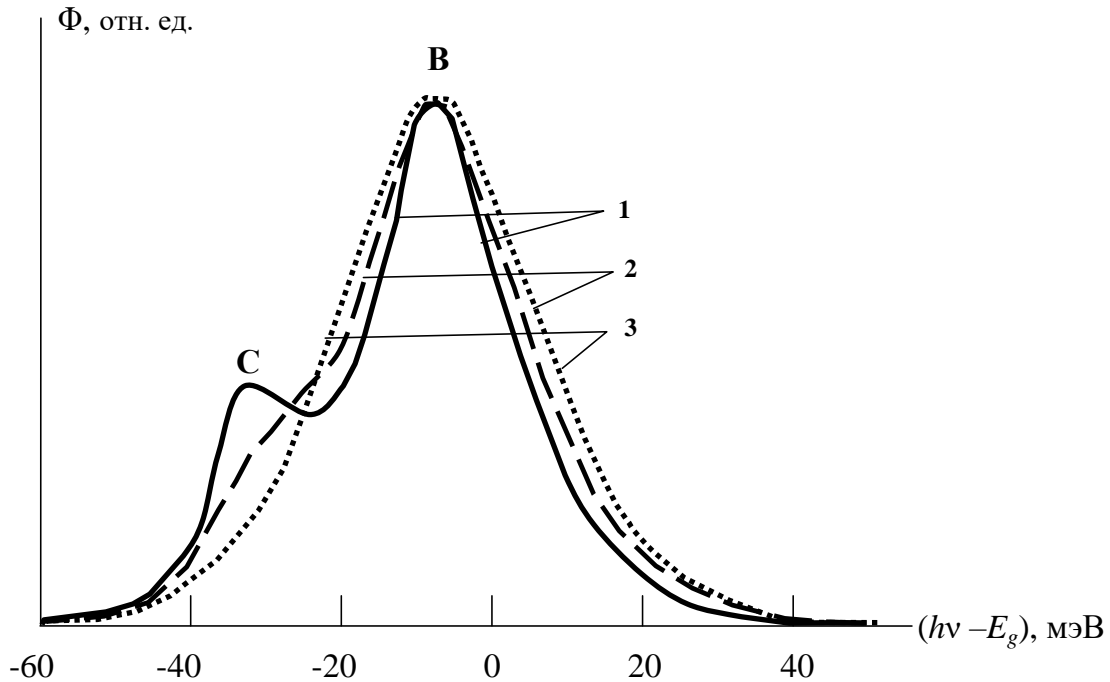


Рисунок 1 – Спектры люминесценции слабо легированного GaAs при температурах: 1 – 77 К; 2 – 112 К; 3 – 176 К

Результаты по исследованию более сильно легированного арсенида галлия в интервале температур 77...300 К ( $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \dots 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) представлены впервые.

Будем считать промежуточно легированным (слабо вырожденным) арсенид галлия, в котором уровень Ферми  $E_F$  находится в зоне проводимости от дна ее ( $E_F = 0$ ) до  $E_F = 2 kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура в К. Иначе, если  $0 \leq E_F \leq 2 kT$  – это слабое вырождение, если  $E_F > 2 kT$  – сильное вырождение.

Найденное по номограмме [9] положение уровня Ферми при 77 К для

$$n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 3,3 kT;$$

$$n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 4,4 kT;$$

$$n = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 6,0 kT;$$

$$n = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 9,3 kT.$$

Итак, при 77 К практически все эти образцы сильно вырождены при 300 К для

$$n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 0 kT;$$

$$n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 0,5 kT;$$

$$n = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = kT;$$

$$n = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad E_F = 2,2 kT.$$

Это означает, что при 300 К все эти образцы слабо вырождены.

Из рис. 2. видно, что при 77 К энергии максимума полос люминесценции очень близки или больше ширины запрещенной зоны. Эта полоса обусловлена переходами зона проводимости–валентная зона (полоса А). При повышении температуры зависимости энергии максимума люминесценции сливаются с зависимостью, характерной для невырожденного арсенида галлия, т.е. спектр излучения изменяется от полосы А к полосе В.

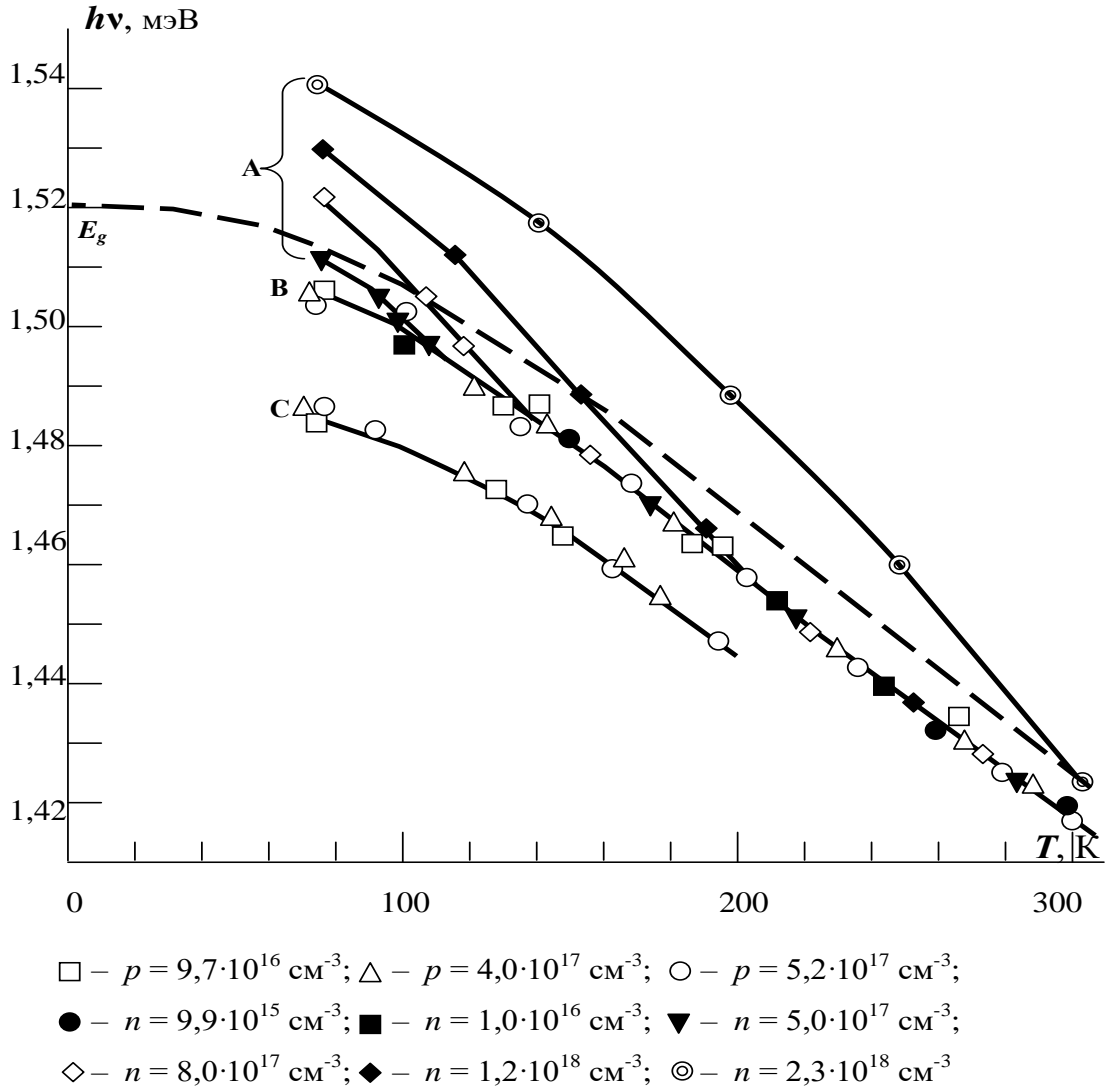


Рисунок 2 – Зависимость энергии максимума фотолюминесценции от температуры различно легированного арсенида галлия. Зависимость  $E_g(T)$  взята из [6]

Происходит это для

$$n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \quad \text{при } 115 \text{ К};$$

$$n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \quad \text{при } 135 \text{ К};$$

$$n = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \quad \text{при } 200 \text{ К};$$

$$n = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \quad \text{при } 347 \text{ К}.$$

(Последняя температура получена экстраполяцией).

Очевидно, что при этих температурах полностью воссоздаются донорные примесные уровни, по крайней мере, в смысле их участия в излучательной рекомбинации.

С помощью упомянутой номограммы [9] мы определили положение уровня Ферми  $E_F$  в образцах при температурах воссоздания донорных уровней. Оказалось, что для этих четырех образцов уровень Ферми принимает значение  $2 kT$ , т.е. это состояние соответствует переходу при нагревании от сильно вырожденного электронного газа к слабо вырожденному.

Непосредственным результатом роста концентрации электронов (доноров) есть изменение примесных энергетических уровней. Для «водородоподобных» примесей кулоновское поле экранируется свободными электронами, и вместо прежнего выражения для потенциальной энергии  $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$  имеем [10]

$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right), \quad (1)$$

где  $r_0$  – дебаевский радиус экранирования, определяемый выражением

$$r_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon kT}{ne^2}}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация электронов.

В поле такого потенциала уровни доноров мельчают и даже могут исчезнуть совсем при как увеличении  $n$ , так и при охлаждении, однако воссоздаются при увеличении температуры. Это согласуется с данными рис. 2 для четырех наиболее легированных образцов. Боровский радиус электрона в нашем случае равен  $103 \text{ \AA}$ .

С целью установления соответствия между экранирующим уменьшением энергии примесного центра и температурой воссоздания донорных уровней мы вычислили экспоненциальный множитель в (1) с использованием дебаевской длины экранирования для четырех образцов при температуре воссоздания донорных уровней, т.е. при температуре слияния зависимостей энергий максимумов фотолюминесценции с зависимостью для слабо легированного материала.

Оказалось, что для этих образцов дебаевский радиус экранирования меньше боровского в 2,7...3,4 раза, экспоненциальный множитель в формуле (1) составляет сотые доли и уменьшается вдвое для наиболее легированного образца.

При понижении температуры, как видно из формул (1) и (2), экспоненциальный множитель резко уменьшается, что может привести к исчезновению донорных состояний и переходу излучательных рекомбинационных переходов к межзонным (полоса А). Из рис. 2 видно, что это происходит при следующих условиях:

- для  $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  при 65 К (экстраполяция);
- для  $n = 8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  при 107 К;
- для  $n = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  при 155 К;
- для  $n = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  при 295 К.

При указанных температурах и концентрациях дебаевский радиус экранирования составляет  $28,7 \text{ \AA}$  с различием в десятых долях. Этот радиус в 3,6 раза меньше боровского радиуса электрона на доноре и является критическим, соответствующим исчезновению донорных уровней в арсениде галлия, легированном теллуром. Этому условию соответствует экспоненциальный дебаевский множитель, равный 0,028. При этом энергия Ферми близка к значению  $4 kT$ , т.е. соответствует сильному вырождению электронного газа.

Вырождение в полупроводниках может быть двух типов: по равновесным носителям и по неравновесным. Вырождение по неравновесным носителям может быть вызвано либо увеличением уровня оптической генерации, либо сильной инжекцией носителей через  $p^+$ - $n$ -переход.

Для выяснения типа излучательной рекомбинации в условиях сильного вырождения по неравновесным носителям мы измерили спектры электролюминесценции в асимметричном  $p^+$ - $n$ -переходе из арсенида галлия при комнатной температуре. Диоды были изготовлены жидкостной эпитаксией  $p^+$ -слоя, легированного цинком до концентрации  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ , на подложке  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  и  $8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

Подробно результаты исследований этих структур описаны нами ранее [11]. Здесь мы обсудим лишь некоторые аспекты, затрагивающие нашу тему. Особенности электролюминесценции в этих  $p^+$ - $n$ -структурах следующие. Во-первых, спектр излучения состоит из двух полос – В и С, подобных полосам фотолюминесценции В и С слабо легированного материала. При этом полоса В генерируется в  $n$ -области, полоса С – в  $p$ -области  $p$ - $n$ -структуры.

С увеличением степени легирования  $n$ -подложки увеличивается относительная интенсивность полосы С. Нам важна следующая особенность спектров: с увеличением плотности тока (в импульсе) выше определенной величины изменяется конфигурация спектров электролюминесценции в сторону относительного увеличения полосы С.

При этом, изменение конфигурации спектров при увеличении тока свыше некоторой величины качественно такое же, как и при увеличении степени легирования  $n$ -области при измерениях на малом токе. Объяснение этого явления дано подробно в [11]. Вкратце: это вызвано наступлением сильной инжекции в  $n$ -области, когда концентрация инжектированных дырок превышает концентрацию равновесных электронов.

Такое положение характерно для асимметричных  $p^+$ - $n$ -структур при высоких токах [12]. Для сохранения электронейтральности в  $n$ -области повышается концентрация электронов вплоть до достижения вырождения по неравновесным электронам. Это, в свою очередь, вызывает увеличение встречной инжекции электронов в  $p$ -область, вызывающее

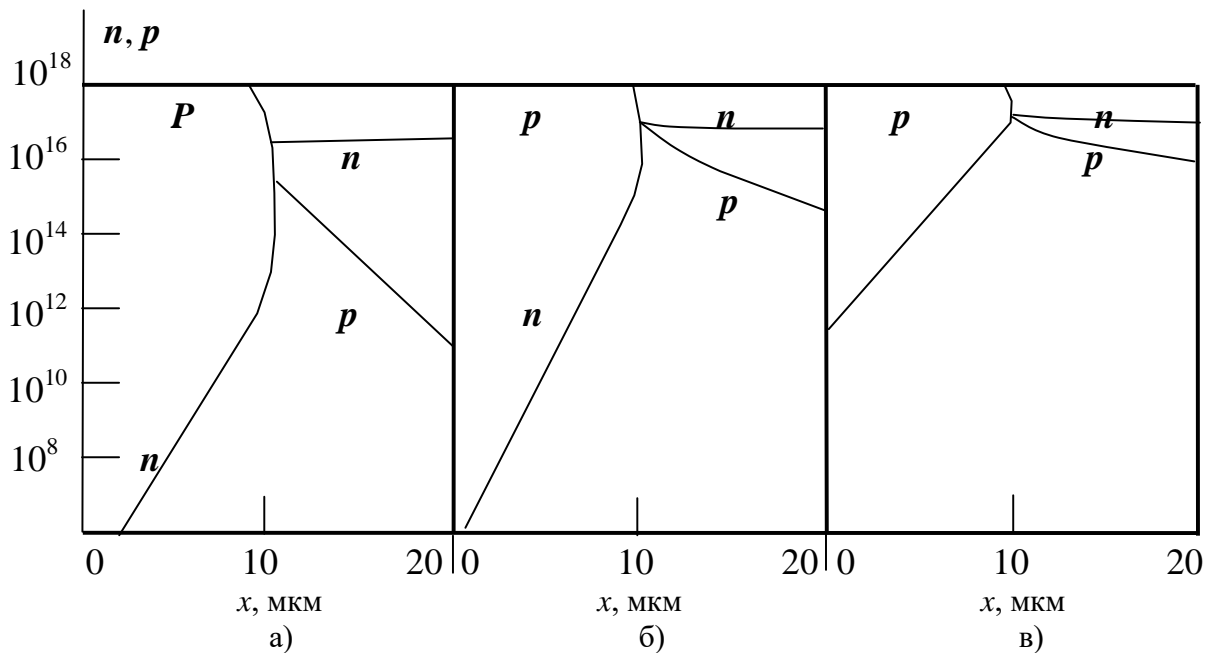


Рисунок 3 – Распределение концентрации носителей в переходе при различных плотностях тока: а)  $10 \text{ А/см}^2$ ; б)  $10^3 \text{ А/см}^2$ ; в)  $10^4 \text{ А/см}^2$  по данным [13]

изменение конфигурации спектров в сторону относительного увеличения полосы С, вызванной рекомбинацией в  $p$ -области.

Изменение распределения носителей в  $p^+$ - $n$ -структуре при увеличении плотности тока по данным [13] показано на рис. 3.

Используем формулу для соотношения интенсивности полос В и С, полученную нами ранее [11]:

$$\frac{\Phi_B}{\Phi_C} = \frac{B}{\sqrt{n + cj}}, \quad (3)$$

где В и С – константы, определенные в [11];  $n$  – равновесная концентрация электронов в  $n$ -области;  $j$  – плотность тока;  $cj$  – концентрация инжектированных электронов  $\Delta n$ .

По данным [11], в спектре электролюминесценции структуры с  $n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  по достижении плотности тока  $j = 10^7 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$  отношение  $\frac{\Phi_B}{\Phi_C}$  уменьшается в 2,1 раза.

Учитывая, что  $c = 3,34 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-1} \text{А}^{-1}$  и  $j = 10^7 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ , получим  $\Delta n = 3,34 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3} = 3,34 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-3}$ . Эта концентрация электронов, во-первых, в 4 раза превышает концентрацию равновесных электронов, во-вторых, соответствует режиму сильного вырождения по неравновесным носителям.

В случае равновесной концентрации электронов такой величины, созданной мелкими донорами, наблюдалась бы полоса люминесценции с энергией максимума около 1,45 эВ – полоса А [8]. В нашем случае не наблюдалось никакого сдвига максимума при 1,42 эВ. Это свидетельствует о том, что преобладающим каналом излучательной рекомбинации здесь являются переходы донор–валентная зона (полоса В). Некоторые авторы сообщали ранее об исчезновении донорных уровней при сильной инжекции [14].

Суммируя все изложенное, можно предложить следующую модель излучательных переходов в арсениде галлия, легированном донорами в диапазоне концентраций от слабо легированного до сильно вырожденного (рис. 4):

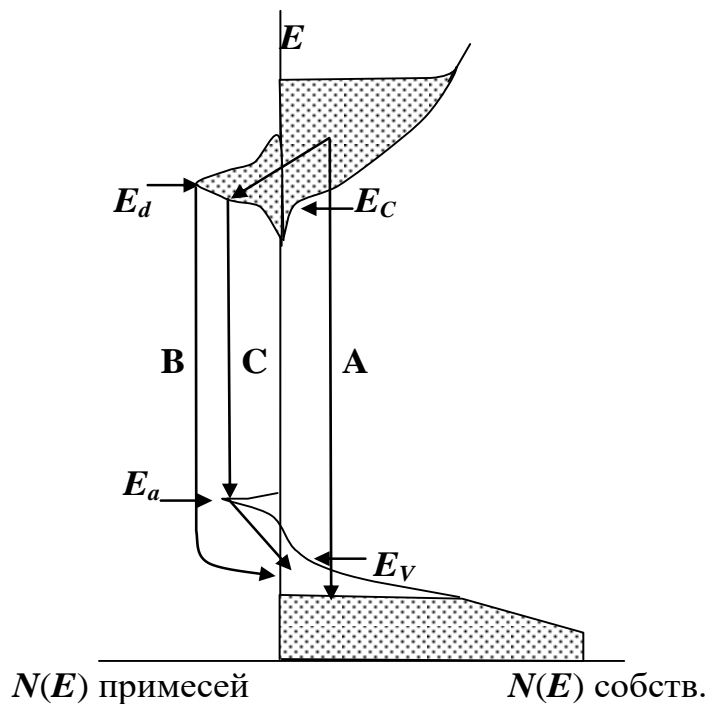


Рисунок 4 – Каналы излучательной рекомбинации в GaAs

1. В интервале температур 77...300 К при малых концентрациях доноров, включая остаточные, в спектрах излучательной рекомбинации наблюдается одна полоса В краевого излучения, вызванная переходами донор-валентная зона.

2. При малых концентрациях акцепторов наблюдаются две полосы – В, вызванная переходами донор-валентная зона, и С, вызванная переходами донор-акцептор, причем эта полоса видна до температур тем больших, чем больше концентрация акцепторов.

3. При концентрациях электронов (доноров), соответствующих сильному вырождению ( $E_F > 2 kT$ ) при температуре 77 К наблюдается полоса А, соответствующая переходам зона проводимости-валентная зона. При нагревании до температуры, соответствующей критерию  $E_F = 2 kT$ , начинается изменение типа излучательных переходов от полосы А к полосе В. Установлен критерий исчезновения донорных уровней при увеличении уровня легирования или при охлаждении вследствие дебаевского экранирования:  $\frac{a_B}{a_0} = 3,6$ . Этому соответствует

$$E_F = 4 kT.$$

4. При концентрации доноров, соответствующих сильному вырождению при 77 К и 300 К наблюдается только полоса А с монотонным уменьшением энергии при нагревании.

5. При создании в слабо легированном арсениде галлия режима сильной инжекции или другого вида накачки, когда концентрация неравновесных электронов соответствует сильному вырождению, излучательная рекомбинация происходит в полосе В по каналу донор-валентная зона, как в слабо легированном материале.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Наследов О.Н. Рекомбинационное излучение арсенида галлия / О.Н. Наследов А.А., Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков // ФТТ. – 1962. – Т. 4. – С. 1062–1064.
2. Басов Н.Г. Квантовомеханические полупроводниковые генераторы и усилители / Н.Г. Басов, Ю.М. Попов // ЖЭТФ. – 1961.– № 40. – С. 1879–1882.
3. Дроздов В.А. Температурная зависимость спектров краевой фотолюминисценции слабо легированного электронного и дырочного арсенида галлия / Дроздов В.А., Коробицын Б.В., Слюсаренко В.Н., Царенков Б.В. – Депонирован в ВИНТИ, № 266. – 75 Деп.
4. Galeener F.I. Evidence of Role Donor in electroluminescence GaAs Diodes / F.I. Galeener, G.B. Wright, W.E. Krag, T.N. Qucst, H.I. Zeiger // Phys. Rev. Lett. – 1963. – № 10. – P. 472 - 476.
5. Осипов В.В. Люминесценция компенсированных полупроводников / В.В. Осипов, М.Г. Фонгель // ФТТ. – 1976. – Т. 10. – С. 522–527.
6. Sturge M.D. Optical properties of GaAs / M.D Sturge. // Phys. Rev. – 1962. – № 127. – P. 708 - 712.
7. Dingle R. Temperature Dependence of photoluminescence from germanium-doped and undoped gallium arsenide / R. Dingle // J. App. Phys. – 1973. – V.44. – № 11. – P. 678–712.
8. Cusano D.A. Radiative Recombination from GaAs directly excited by electron beams / D.A. Cusano // Solid State Comm. – 1964. – № 2. – P. 353–357.
9. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / Панков Ж. – М.: Мир, 1973. – 346 с.
10. Смит М. Полупроводники / Смит М. – М.: Мир, 1982. – 435 с.
11. Викулин И.М. Электролюминесценция в асимметричных p-n-структурах / И.М., Викулин В.Э. Горбачев, Б.В. Коробицын // Наукові праці УДАЗ ім. О.С.Попова. – 2000. – № 1. – С. 8–11.
12. Лебедев А. Физика полупроводниковых приборов / Лебедев А. – М.: Физматлит, 2008. – 488 с.
13. Gummel H.K. Hole-Electron Product of p-n-Junctions / Gummel H.K. – Solid State Comm. – 1967. – № 10. – P. 209–213.
14. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1990. – 688 с.

#### REFERENCES:

1. O. N. Nasledov. Recombination radiation of gallium arsenide / O. N. Nasledov, A. A., Rogachev S. M. Ryvkin, B. V. Tsarenko // FTT. – 1962. – Vol. 4. – P. 1062–1064.
2. Basov N. G. Quantum-mechanical semiconductor generators and amplifiers / N.G. Basov, Yu. M. Popov // JETP. – 1961.– No. 40. – P. 1879–1882.
3. Drozdov V. A. Temperature dependence of the spectra of boundary fotolyuminescentsii weakly doped electron and hole GaAs / Drozdov V. A. Korobitsyn B. V., Slyusarenko, V. N., Tsarenko B. V. – Deposited in VINITI, No. 266. – 75 DEP.



4. Galeener F.I. Evidence of Role Donor in electroluminescence GaAs Diodes / F.I. Galeener, G.B. Wright, W.E. Krag, T.N. Qucst, H.I. Zeiger // Phys. Rev. Lett. – 1963. – № 10. – P. 472–476.
5. Osipov V. V. Luminescence of compensated semiconductors / V.V. Osipov, M.G. Fangel // FTT. – 1976. – Vol. 10. – P. 522–527.
6. Sturge M.D. Optical properties of GaAs / Sturge M.D. // Phys. Rev. – 1962. – № 127. – P. 708–712.
7. Dingle R. Temperature Dependence of photoluminescence from germanium-doped and undoped gallium arsenide / R. Dingle // J. App. Phys. – 1973. – V.44. – № 1.1 – P. 678–712.
8. Cusano D.A. Radiative Recombination from GaAs directly excited by electron beams / D.A. Cusano // Solid State Comm. – 1964. – № 2. – P. 353–357.
9. J. Pankov, Optical processes in semiconductors / Pankow J. – М.:Mir, 1973. – 346 p.
10. Smith M. Semiconductors / Smith M. – М.:Mir, 1982. – 435 p.
11. Vikulin I. M. Electroluminescence in asymmetric p-n-structures / I. M. Vikulin, V. E., Gorbachev B. V. Korobitsyn // Naukov Pratsi of UDAS im. O. S. Popova. – 2000. – No. 1. – P. 8–11.
12. Lebedev A. Physics of semiconductor devices / Lebedev A. – М.: Fizmatlit, 2008. – 488 p.
13. Gummel H. K. Hole-Electron Product of p-n-Junctions / Gummel H. K. Solid State Comm. – 1967. – № 10. – P. 209–213.
14. Bonch-Bruевич V. L. Physics of semiconductors/ V.L. Bonch-Bruевич, S.G. Kalashnikov. – М.:Science, 1990. – 678 p.