

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.315.592

Ирха В.И.  
Iرخа В.І.  
Irkha V.I.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В *p-n*-ПЕРЕХОДАХ НА ОСНОВЕ GaAsP С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГЛУБОКИХ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОЛЮМІНІСЦЕНЦІЇ В *p-n*-ПЕРЕХОДАХ НА ОСНОВІ GaAsP З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ГЛИБОКИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ЦЕНТРІВ

### EFFICIENCY OF THE ELECTROLUMINESCENCE IN *p-n*-JUNCTIONS BASED ON GaAsP WITH THE CONSIDERATION OF INFLUENCE DEPTH RECOMBINATION CENTERS

**Аннотация.** Проведено исследование влияния глубоких рекомбинационных центров в *p-n*-переходах на основе GaAsP на эффективность электролюминесценции. Показано пути ее повышения для таких светодиодов.

**Анотація.** Проведено дослідження впливу глибоких рекомбінаційних центрів у *p-n*-переходах на основі GaAsP на ефективність електролюмінесценції. Показано шляхи її підвищення для таких світлодіодів.

**Summary.** Investigation of influence of the depth recombination centers in *p-n*-junctions based on GaAsP on efficiency of the electroluminescence has been carried out. We have shown the ways of its increasing for the such structures.

Эффективность электролюминесценции светоизлучающих диодов (СИД) существенно определяется соотношением между интенсивностями излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Это соотношение зависит от зонной структуры используемого полупроводника, а также от концентраций активаторных примесей, фоновых примесей и собственных дефектов в полупроводниках. Важной научной и практической проблемой является получение полупроводниковых материалов и приборов на их основе с заданными свойствами. Эта проблема не может быть решена без решения вопроса о глубоких центрах в полупроводниках группы АЗВ5. Ведь условия получения влияют на дефекточувствительные свойства, которые в свою очередь определяют возможность применения данного полупроводникового материала. Т.е. изучение глубоких центров необходимо тесно связывать с технологией получения объектов исследования [1].

С точки зрения качества материала для изготовления СИД он должен иметь такие же электрические характеристики, как и хороший электрический диод, но в то же время для светодиода очень существенна «судьба» инжектированных носителей. Необходимо наличие высокого коэффициента инжекции неосновных носителей заряда, причем обычно с преобладающей инжекцией в заданную область *p-n*-перехода. Кроме того, при этом как можно больше инжектированных неосновных носителей заряда должно прорекомбинировать через единственный излучательный канал, включающий специально введенный центр излучательной рекомбинации. Это является наиболее жестким требованием при изготовлении приборов на основе широкозонных полупроводников, обладающих большим набором нежелательных и обычно трудно идентифицируемых примесей, дефектов решетки и т.д., через которые идет рекомбинация. Вполне вероятно, что существующие рекомбинационные центры ответственны и за деградацию приборов при эксплуатации.

При разработке и изготовлении светодиодов в видимой области спектра широко используют GaAsP, что связано с более дешевой их технологией производства, чем, например, для GaAlAs. В оранжевых или желтых источниках света используется GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> сильно легируемый азотом. Примесное состояние азота переключается с состоянием в зоне проводимости вблизи точки Г при достаточно малых параметрах состава *x* и обуславливает увеличение порога вынужденного излучения, т.е. прямые межзонные электронные переходы ослабляются за счет сильной связи электрона на ловушке. Твердые растворы типа GaAsP получили широкое применение в оптоэлектронике и полупроводниковой электронике. Это обусловлено возможностью широко варьировать величину запрещенной зоны в зависимости от состава твердого раствора и,

следовательно, получать излучение в различной области спектра. Особенностью использования тройных соединений GaAsP в индикаторных светодиодах является то, что возрастание концентрации фосфора в активной области приводит к сдвигу спектра излучения в область большей чувствительности человеческого глаза, что влечет за собой изменение зонной структуры, приводящее к изменению интенсивности излучательных переходов. При этом повышается роль безызлучательной рекомбинации. Поэтому для СИД на основе GaAsP остро стоит вопрос о снижении интенсивности безызлучательной рекомбинации в активном слое и области объемного заряда. Вероятность безызлучательных переходов зависит от концентрации и параметров центров безызлучательной рекомбинации. Как правило, в качестве центров безызлучательной рекомбинации выступают глубокие уровни, обусловленные дефектами различного вида. Кроме того, глубокие уровни могут поглощать излучение, тем самым снижая квантовый выход СИД. Следовательно, любая информация, полученная о глубоких уровнях непосредственно из измерения параметров СИД, представляет большой интерес [2], однако в литературе мало сведений о влиянии глубоких уровней на эффективность электролюминесценции.

Цель данной работы – исследовать влияние глубоких рекомбинационных центров в *p-n*-переходах на основе GaAsP на эффективность электролюминесценции. Необходимость решения такой задачи связана с нахождением путей и способов повышения эффективности СИД.

Для решения данной задачи в процессе выполнения работы исследовались структуры на основе GaAsP, выращенные на монокристаллической подложке из низкоомного GaAs *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 0,01 Ом · см, ориентированные по плоскости с разориентацией в  $1^\circ \dots 3^\circ$ . *P-n*-переход и активный слой создавали диффузией цинка в эпитаксиальный слой GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> *n*-типа, выращенный из паровой фазы. Молярная доля фосфора лежала в пределах 35,3% (для структур с заведомо плохим квантовым выходом) и (37,4 ... 39,2)% для структур с улучшенным квантовым выходом. Оптимальная концентрация цинка в *p*-области составляла  $(3 \dots 5,21) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Общая толщина эпитаксиального слоя была не менее 35 мкм. Концентрация носителей заряда в эпитаксиальном слое находилась в пределах от  $(1,6 \dots 3,2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для структур с заведомо плохим квантовым выходом и до  $(0,54 \dots 3,47) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  для структур с улучшенным квантовым выходом.

Для получения сведений о распределении примесей в *p-n*-переходах СИД на основе GaAsP измерялись их вольтфарадные характеристики. Структуры с большим квантовым выходом характеризуются плавным *p-n*-переходом (спрямление происходит в координатах  $C^3(U)$ ). Существует сложное распределение примеси в *p-n*-переходе и характерно наличие внутри обедненной области компенсированного слоя. Структуры с низкой эффективностью имеют широкий и резкий *p-n*-переход, обладают малой емкостью (спрямление происходит в координатах  $C^2(U)$ ). Расчеты показали, что ширина слоя объемного заряда при нулевом смещении для части образцов лежит в пределах  $(6,2 \dots 8,1) \cdot 10^{-6} \text{ см}$ , градиент концентрации примеси в *p-n*-переходе составляет  $(1,5 \dots 2,4) \cdot 10^{23} \text{ см}^{-4}$ . По температурной зависимости барьерной емкости *p-n*-перехода оценивали концентрацию центров, ионизирующихся при повышенной температуре, которая составляла  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Изучались стационарные вольтамперные характеристики (ВАХ) прямого и обратного токов *p-n*-переходов, спектральные, люменамперные и люменвольтовые характеристики электролюминесценции СИД на основе GaAsP в интервалах температур (80 ... 400) К, измерялись термостимулированные токи. При изучении электрических характеристик СИД нижний предел измерения по току составлял  $2 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ , а по напряжению 0,01 В.

На рис. 1 представлены спектры электролюминесценции СИД на основе GaAsP при комнатной (кривая 1) и азотной (кривая 2) температурах. Обнаружено, что при низкой температуре для структур с плохими характеристиками характерно сужение спектра электролюминесценции и практически неизменность интенсивности излучения, в то время как для структур с высоким квантовым выходом полуширина полосы спектра электролюминесценции при низкой температуре не изменяется, а интенсивность электролюминесценции повышается в 15–20 раз. Это явление может быть связано с влиянием непрямоzonности структуры с заведомо низким квантовым выходом излучения.

Установлено, что для структур с заведомо низким квантовым выходом полуширина полосы спектра электролюминесценции при понижении температуры существенно уменьшается, что действительно связано с непрямоzonностью структуры (содержание фосфора порядка 44%). Подтверждением этого может служить и температурное гашение электролюминесценции, представленное на рис. 2 для структур с повышенным квантовым выходом (кривая 1) и с заведомо плохими характеристиками (кривая 2).

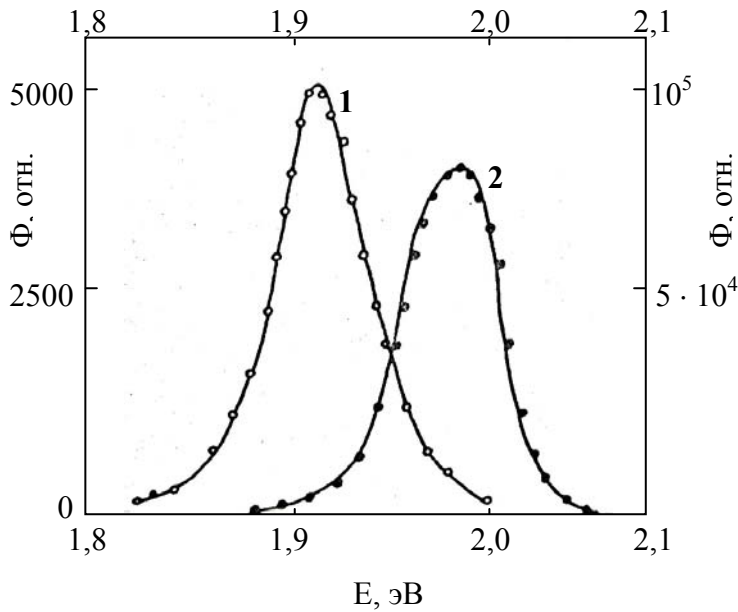


Рисунок 1 – Спектры электролюминесценции СИД на основе GaAsP при токе 10 мА:  
1 – 300 К; 2 – 85 К. Для кривой 2 – шкала справа

Сложность такой зависимости можно объяснить влиянием как  $\Gamma$  так и  $L$  и  $X$  минимумов в процессах излучательной рекомбинации и наличием различных температурных коэффициентов для этих минимумов. Кривая 1 на рис. 2 типичная для «внешнего» тушения, обусловленного термоионизацией активаторных центров. Энергия активации тушения электролюминесценции составляет (0,025 ... 0,33) эВ. Анализ ВАХ исследованных структур при различных температурах показывает, что рекомбинационные токи при конкретной температуре для хороших и плохих структур близки друг к другу.

При низкой температуре эти токи различны, причем для плохих структур наблюдается при напряжении больше 2,9 В  $S$ -образный участок характеристики. Необходимо отметить, что для плохих структур характерно наличие

большого последовательного сопротивления (от 25 до 120 Ом), а для структур с хорошим квантовым выходом  $\sim 5$  Ом. Большое последовательное сопротивление для структур с заведомо низким квантовым выходом может быть связано с малой концентрацией активатора, что в свою очередь приводит к снижению эффективности СИД.

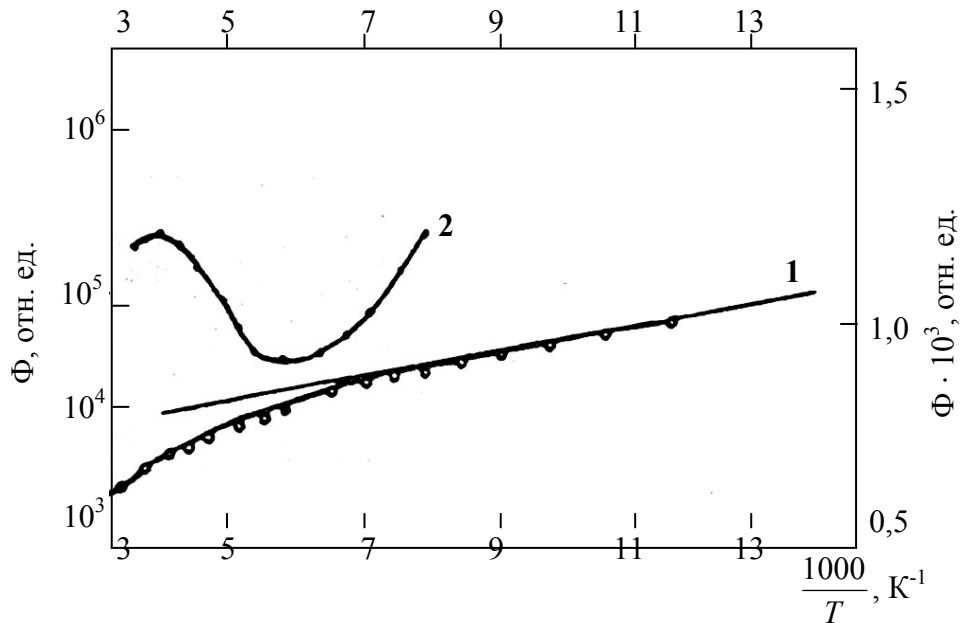


Рисунок 2 – Температурное гашение электролюминесценции СИД на основе GaAsP при токе 10 мА:  
1 – структура с повышенным квантовым выходом (шкала слева);  
2 – структура с заведомо плохими характеристиками (шкала справа)

Для структур с малой эффективностью излучательной рекомбинации происходит шнурование тока, что подтверждается сильной температурной зависимостью последовательного сопротивления. Для образцов с хорошей эффективностью при 85 К последовательное сопротивление составляет (6 ... 7) Ом, а для образцов с низкой эффективностью – (400 ... 1200) Ом. Следовательно, у структур с низкой эффективностью излучательной рекомбинации  $p$ -область сильно компенсирована и в

исследованных  $p$ - $n$ -переходах должны существовать глубокие уровни. ВАХ исследованных структур линейна в области токов от  $10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  А и имеет вид

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

где  $n = 1,7 \dots 2$ . Это, согласно [3], свидетельствует о существенной роли рекомбинации носителей заряда в обедненном слое  $p$ - $n$ -перехода. Зависимость интенсивности излучения от напряжения для исследованных образцов характерна для компоненты тока  $p$ - $n$ -перехода, связанной с инжекцией неосновных носителей заряда в квазинейтральные области кристалла. Т.е. основная компонента, обусловленная рекомбинацией носителей заряда в обедненном слое, безызлучательные [1, 4].

Величина тока при фиксированном напряжении для исследованных структур экспоненциально зависит от обратной температуры. Для структуры с малой эффективностью излучательной рекомбинации характерна сильная зависимость сопротивления образца от температуры (рис. 3). Определенные из этих зависимостей глубины уровней для структур с низкой эффективностью составляли 0,04 и 0,2 эВ, а для структур с высоким квантовым выходом глубина уровней составляла от 0,02 до 0,12 эВ. Исследование термостимулированных токов в  $p$ - $n$ -переходах на основе GaAsP показало существование глубоких уровней с энергиями ионизации 0,46, 0,51 и 0,6 эВ, концентрации которых достигают  $(10^{15} \dots 10^{17}) \text{ см}^{-3}$ . Величина термостимулированных токов отлична от нуля в широкой области температур, что свидетельствует о существовании квазинепрерывного распределения глубоких уровней в запрещенной зоне.

Таким образом, существенный разброс эффективности излучения исследованных СИД, особенно при низких температурах, обусловлен различием состава GaAsP в активной области. Кроме мелких центров, образованных активаторной примесью, в активной области СИД имеются более глубокие уровни с концентрацией до  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Наличие глубоких уровней в  $p$ -области с энергией ионизации 0,2 эВ приводит к существенному повышению последовательного сопротивления СИД, что в свою очередь снижает КПД и дополнительно разогревает диод. Повышение содержания фосфора приводит к изменению температурной зависимости интенсивности электролюминесценции. Причиной уменьшения квантового выхода электролюминесценции при увеличении доли фосфора в GaAsP является не рост вероятности безызлучательной рекомбинации, а уменьшение вероятности излучательных переходов вследствие изменения зонной структуры.

В заключении можно сказать следующее:

- имеется четкая корреляция между содержанием фосфора в GaAsP и эффективностью излучения СИД;
- контролируя состав исходных структур и концентрацию легирующей примеси можно получить высокую эффективность СИД на основе GaAsP;
- для повышения эффективности электролюминесценции СИД при проведении диффузии необходимо предотвращать компенсацию  $p$ -области глубокими уровнями.

Рассмотрение и оценка влияния глубоких рекомбинационных центров в  $p$ - $n$ -переходах на основе GaAsP на эффективность электролюминесценции позволит повысить квантовый выход СИД.

#### Литература

1. Викулин И.М. Безызлучательная рекомбинация в излучающих  $p$ - $n$ -переходах. Обзор по электронной технике / [Викулин И.М., Ирха В.И., Панфилов М.И., Присекин В.И.] – Одесса, 1996. – 47 с.
2. Берг А.А. Светодиоды / А.А. Берг, П.Д. Дин. – М., Мир, 1979. – 686 с.
3. Свечников Г.С. Интегральная оптика / Свечников Г.С. – К.: Наукова думка, 1988. – 168 с.
4. Ирха В.И. Особенности фотоэлектрических и люминесцентных свойств варизонных полупроводниковых структур / В.И. Ирха // Информатика и связь. – Одесса, 1996. – С. 86-90.

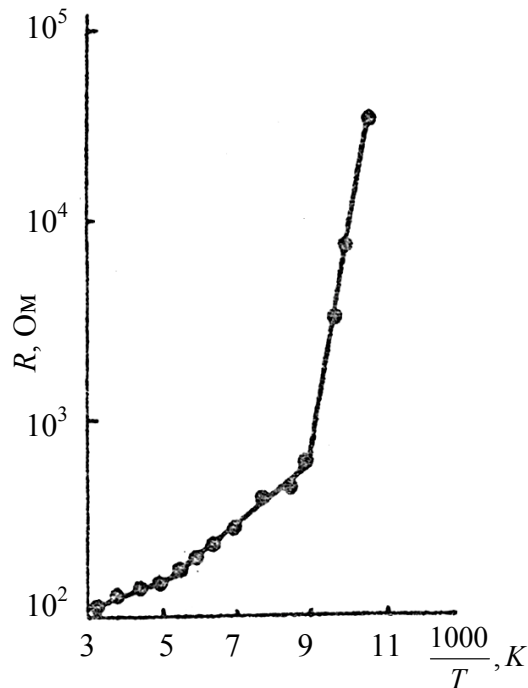


Рисунок 3 – Температурная зависимость сопротивления образцов СИД на основе GaAsP