

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ГАШЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ A^3B^5

Квантовая эффективность электролюминесценции светоизлучающих структур на основе арсенида галлия и тройных соединений $GaAs_{1-x}P_x$ и $Ga_{1-x}Al_xAs$ при изменении температуры от 77 К до 340 К уменьшается на порядок.

$p-n$ Переходы на основе $GaAs(Si)$ были изготовлены из материала n -типа, легированного теллуром до концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ с последующей жидкофазной эпитаксией слоя $GaAs$, легированного кремнием с концентрацией $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствовало 0,5% концентрации кремния в растворе. В связи с амфотерностью свойств примеси кремния, создающего компенсированную область в $GaAs(Si)$ -диодах, зачастую формировались $p-i-n$ структуры.

Светодиоды на основе $GaAs_{1-x}P_x$ создавались диффузией Zn из газовой фазы в эпитаксиальную пленку $n-GaAs_{1-x}P_x$, полученную газотранспортным методом на подложке $n-GaAs$. Образцы, полученные по такой эпитаксиально-диффузионной технологии, имели $n^+-n-p-GaAs-GaAs_{1-x}P_x-GaAs_{1-x}P_x$ -структуры при $x = 35-40\%$.

Концентрация носителей в n^+ -подложке $GaAs$, легированного Te , составляла $(5-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрация носителей в эпитаксиальной пленке $n-GaAs_{1-x}P_x$, также легированной Te составляла $(1-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. p -Слой создавался диффузией Zn в твердый раствор $GaAs_{1-x}P_x$. Глубина залегания $p-n$ -перехода составляла 3–5 мкм.

Исследованные спектры электролюминесценции эпитаксиальных $p-n$ структур в диапазоне температур 77–330 К состоят из одной полосы. Длинноволновые полосы, характерные для спектров фотолюминесценции n -областей $p-n$ структур, в спектрах электролюминесценции не обнаружены. Это подтверждает, что источником излучения при электролюминесценции является p -область эпитаксиальных структур. При выводе излучения через n -область вид спектра электролюминесценции при 340 К был близок к виду спектра фотолюминесценции p -области (рис. 1). При температурах ниже 170 К наблюдалась зависимость положения максимумов спектров как электролюминесценции, так и фотолюминесценции от уровня возбуждения (рис. 2).

При небольших напряжениях ($U < 1,32 \text{ В}$) механизм излучательной рекомбинации в сильнолегированных $p-n$ переходах отличается от механизма рекомбинации при фотолюминесценции p -области. В области напряжений, больших 1,32 В, излучательные переходы при электролю-

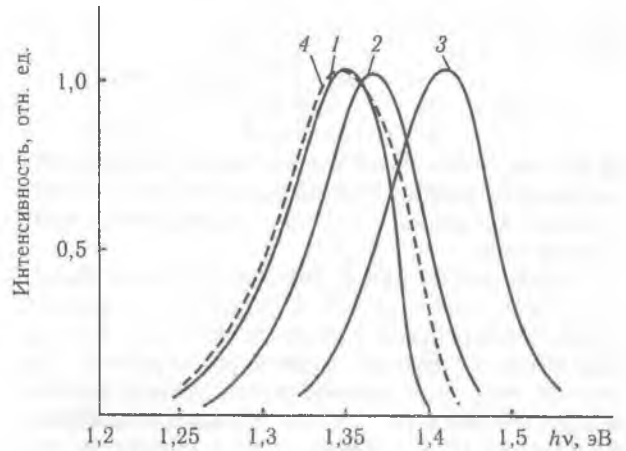


Рис. 1. Спектры эпитаксиальной $p-n$ структуры:

1–3 — спектры электролюминесценции; 4 — спектр фотолюминесценции p -области $p-n-GaAs$ при $T = 300 \text{ К}$; j , A/cm^2 , 1 — 5; 2 — 30; 3 — $2 \cdot 10^2$

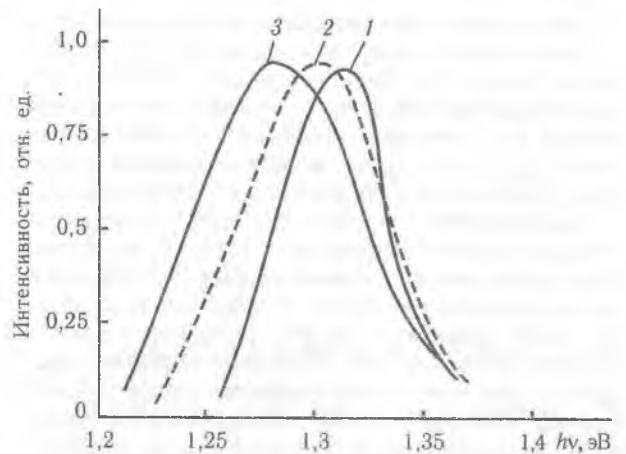


Рис. 2. Спектры электролюминесценции $p-n$ структуры при различных температурах:

1 — $T = 113 \text{ К}$; 2 — $T = 173 \text{ К}$; 3 — $T = 300 \text{ К}$

минесценции имеют, вероятно, ту же природу, что и переходы, обуславливающие электролюминесценцию p -области эпитаксиальных структур.

Таким образом, в сильнолегированных эпитаксиальных $p-n$ структурах при напряжении 1,32 В происходит смена механизма излучательной рекомбинации. Одновременно наблюдалось расширение полосы излучения, обусловленное участием в излучении обоих механизмов рекомбинации.

Сравнение спектров электро- и фотолюминесценции показало, что при небольших напряжениях на $p-n$ переходе излучательная рекомбинация обусловлена, вероятно, «диагональным» туннелированием. Предполагается, что при напряжениях, больших 1,32 В, излучение связано с рекомбинацией через заполняющий хвост состояний вблизи дна зоны проводимости в p -области переходов. В слаболегированных эпитаксиальных $p-n$ переходах излучение, как правило, обусловлено обычной термической инжекцией носителей в p -область перехода.

Были получены экспериментальные температурные зависимости интенсивности излучения для образцов GaAs(Si) и GaAs_{1-x}P_x(Zn) (рис. 3). На кривых зависимости интенсивности излучения от температуры обнаруживается излом. С повышением уровня инжекции точка излома сдвигается в область более высоких температур. При повышении температуры вследствие изменения ширины запрещенной зоны максимум интенсивности излучения светодиодов сдвигается в более длинноволновую область спектра. Температурное гашение электролюминесценции в области высоких температур можно объяснить температурной зависимостью концентрации дырок на акцепторном уровне легирующей примеси.

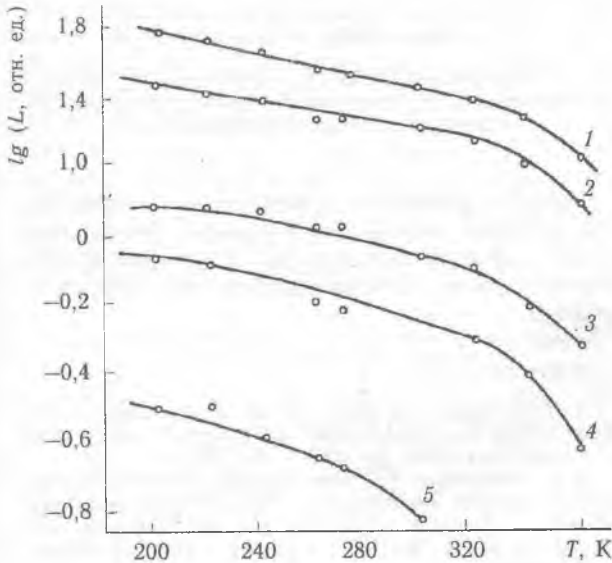


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности излучения образца № 169 на основе GaAs(Si) при токах:

1 — 100 мА; 2 — 50 мА; 3 — 10 мА; 4 — 5 мА; 5 — 1 мА

По формуле $p = p_v \exp(-E_F/kT)$ можно определить температуру, при которой уровень Ферми совпадает с примесным уровнем.

Здесь p — концентрация дырок на акцепторных уровнях;

p_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне

$$p_v = 4\pi \left(\frac{2m_p^* kT}{n^2} \right)^{3/2};$$

E_F — энергия уровня Ферми.

В случае, когда положение уровня Ферми совпадает с акцепторным уровнем примеси, заполненные уровни равно 1/2, то есть можно записать

$$\frac{1}{2} N_A = p_v \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{kT}\right),$$

где N_a — концентрация примесных уровней, которая в исследуемых светодиодах составила $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $p_v = 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Решение последнего уравнения графическим методом для GaAs(Si)-светодиодов, содержащих мелкий акцепторный уровень кремния с энергией активации 0,03 эВ, дает для температуры, при которой положение уровня Ферми совпадает с примесным уровнем, величину 300 К.

Можно решить обратную задачу. В уравнение подставим $T = 275 \text{ К}$, то есть температуру, при которой происходит излом кривой температурного хода электролюминесценции в светодиодах на основе GaAs_{1-x}P_x (рис. 4).

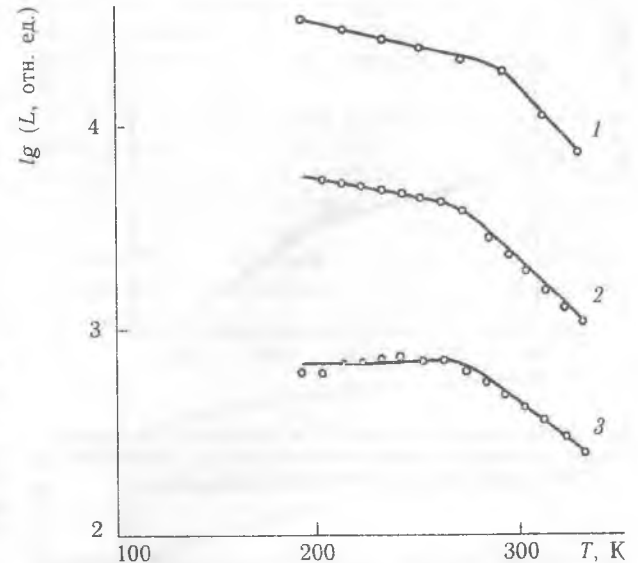


Рис. 4. Температурная зависимость интенсивности излучения образца № 414 на основе GaAs_{1-x}P_x при токах:

1 — 80 мА; 2 — 20 мА; 3 — 7 мА

Из решения уравнения определим неизвестное значение глубины залегания акцепторного уровня цинка $\Delta E_{Zn} = 0,044 \text{ эВ}$ в GaAs_{1-x}P_x, что хорошо согласуется с экспериментальными данными по температурным зависимостям прямого и обратного токов. По данным работы [1] энергия ионизации Zn в GaAs_{1-x}P_x изменяется от 0,03 до 0,06 эВ при значениях x от 0 до 1.

С увеличением температуры концентрация дырок на примесном акцепторном уровне уменьшается вследствие заполнения уровней электронами из валентной зоны и определяется как

$$p = \frac{N_A}{\exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) + 1}$$

Отсчет энергии ведется от потолка валентной зоны.

Интенсивность излучения пропорциональна концентрации дырок на примесных уровнях. Так как с повышением температуры концентрация дырок на примесных уровнях уменьшается вследствие заполнения уровней электронами из валентной зоны, то это должно приводить к уменьшению интенсивности с ростом температуры.

Аналогичные зависимости интенсивности электролюминесценции от температуры наблюдались при исследовании гетероэпитаксиальных слоев арсенида галлия, выращенных на кремниевых подложках [2].

На рис. 5 приведена расчетная кривая зависимости концентрации дырок на акцепторном уровне цинка (с энергией 0,044 эВ) от температуры (кривая 1) и температурный ход электролюминесценции (кривая 2) для образца на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$. Положение уровня Ферми при разных температурах определялось по номограмме Панкова. Из сопоставления кривых видно,

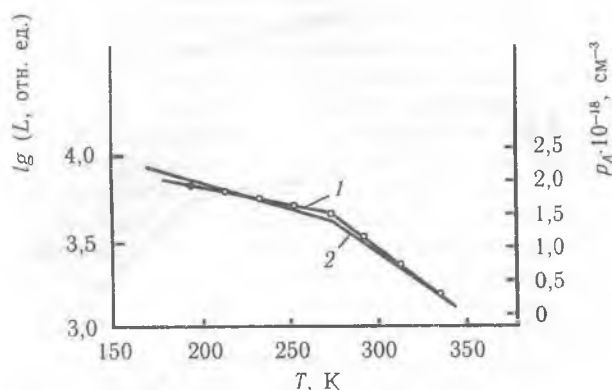


Рис. 5. Экспериментальная (1) и расчетная (2) температурные зависимости интенсивности электролюминесценции образца № 414 на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x(\text{Zn})$

что температурный ход электролюминесценции подобен температурной зависимости концентрации дырок на примесном уровне. Экспериментально определенная точка излома, равная 275 К, с которой начинается более резкий спад интенсивности излучения с повышением температуры, хорошо согласуется с точкой перегиба на расчетной кривой.

Удовлетворительное совпадение наклонов кривых, а также температур, соответствующих точкам излома кривых, свидетельствует о справедливости выбранной модели.

Аналогичные расчеты были проведены для светодиодов из арсенида галлия, *p*-область которых была легирована или цинком ($\Delta E_{\text{Zn}} = 0,014$ эВ), или кремнием ($\Delta E_{\text{Si}} = 0,03$ эВ). Во всех случаях расчетная величина для температуры, при которой начинался более резкий спад концентрации дырок на примесном уровне, совпадала с температурой, найденной из экспериментальной кривой температурного хода электролюминесценции (рис. 6).

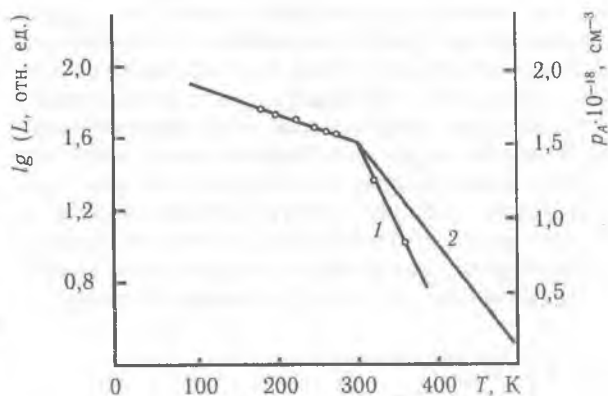


Рис. 6. Экспериментальная (1) и расчетная (2) температурные зависимости интенсивности электролюминесценции образца № 169 на основе $\text{GaAs}(\text{Si})$

Легирова *p*-область примесью, создающей более глубокий акцепторный уровень, можно расширить область температур, в которой интенсивность электролюминесценции будет меняться слабо.

Литература

1. H. C. Casey and M. B. Panish. Composition dependence of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ direct and indirect energy gaps // J Appl Phys 40(4), pp. 121—125 (2001).
2. L. Terletskaya. Photoluminescence of heteroepitaxial gallium arsenide on silicon // Proc 14-th International School — Seminar «Spectroscopy of Molecules and Crystals» (Odessa, Ukraine, 7—12 June, 1999) — Odessa, p. 124(1999).