

## ВНЕШНИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД СВЕТОДИОДОВ ИЗ GaAs&lt;Si&gt;

Королев В. Л., Россин В. В., Сидоров В. Г.

Особенностью эпитаксиальных светодиодов из сильно легированного компенсированного GaAs<Si> является их высокий внешний квантовый выход  $\beta_{\text{ex}}$ , достигающий величины 4 % при температуре 300 К для диодов плоской конструкции в отличие от величины 0.7 % для светодиодов из GaAs<Zn, Te> [1]. При этом наблюдается немонотонная зависимость  $\beta_{\text{ex}}$  от уровня легирования  $N_{\text{Si}}$  с максимумом при концентрации Si в ростовом растворе-расплаве  $N_{\text{Si}} \approx 0.4 \div 0.5$  вес% [2, 3]. Внешний квантовый выход  $\beta_{\text{ex}}$  зависит от трех основных факторов [1]: внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации  $\beta_{\text{in}}$ , коэффициента инжекции  $\gamma$ , а также фактора, учитывающего потери при выводе излучения  $\beta_0$ . Все три указанные величины привлекались для объяснения зависимости  $\beta_{\text{ex}}(N_{\text{Si}})$ .

В работе [3] возрастающий участок зависимости  $\beta_{\text{ex}}(N_{\text{Si}})$  связывался с уменьшением коэффициента поглощения собственной люминесценции  $\alpha$  из-за уменьшения энергии максимума люминесценции  $h\nu_m$ . Уменьшение  $\beta_{\text{ex}}$  с ростом  $N_{\text{Si}}$  выше 0.5 вес% требует привлечения другого механизма, действующего противоположно уменьшению  $\alpha$ . Падающий участок  $\beta_{\text{ex}}(N_{\text{Si}})$  предположительно объясняется ростом примесного поглощения света на Si-комплексах [2], снижением коэффициента инжекции электронов в  $p$ -область [4], уменьшением внутреннего квантового выхода излучательной рекомбинации  $\beta_{\text{in}}$  [3, 5]. Однако с величиной  $\beta_{\text{in}}$  может быть связана вся зависимость  $\beta_{\text{Si}}(N_{\text{Si}})$  [6].

По сути приведенные сведения устанавливают основные факторы, определяющие внешнюю эффективность светодиодов из GaAs<Si>, а достоверное объяснение зависимости  $\beta_{\text{ex}}(N_{\text{Si}})$  возможно лишь на основе одновременного исследования характера протекания тока через  $p$ - $n$ -переход, изменения самопоглощения люминесценции и величины  $\beta_{\text{in}}$  от уровня легирования. Результаты таких экспериментов, выполненных на эпитаксиальных структурах из GaAs<Si> ( $N_{\text{Si}}$ ) изменялась от 0.2 до 1.0 вес%, приводятся в данном сообщении.

Традиционная оценка коэффициента инжекции по коэффициенту диффузии и диффузионной длине и равновесной концентрации электронов и дырок не могла быть выполнена из-за сложности определения названных параметров в локальных участках неоднородной GaAs<Si>  $p$ - $n$ -структуры. Тем не менее вследствие незначительного различия свойств сильно компенсированных слоев  $p$ - и  $n$ -типа, непосредственно прилегающих к металлургической границе [6], можно считать, что соотношение электронной и дырочной частей инжекционного тока не зависит от уровня легирования. В этом случае остается рассмотреть зависимость доли инжекционного тока в полном токе через  $p$ - $n$ -переход от  $N_{\text{Si}}$ . Последняя оценивалась по характерному виду вольтамперной характеристики (ВАХ). Для инжекционного тока  $j \sim \exp(eU/mkT)$ , где  $m = 1 \div 2$  [1], тогда как для конкурирующих токов утечки  $j \sim U$  и туннельных  $j \sim \exp(eU/\epsilon)$ .

Вклад эффективности вывода излучения можно оценить по среднему по спектру люминесценции коэффициенту поглощения  $\alpha$ . Для его определения использовался метод [7]. При измерении распределения фототока по торцу  $p$ - $n$ -структуры наблюдаются два экспоненциальных участка спада. При этом более пологий участок обусловлен фотонным переносом носителей заряда и его характерный размер спада непосредственно связан с коэффициентом поглощения собственной люминесценции кристалла. Хотя процедуры усреднения коэффициента поглощения при определении эффективности вывода излучения и эффективной длины фотонного переноса, вообще говоря, не идентичны, средние коэффициенты поглощения должны различаться лишь численным множителем порядка единицы. Измерения выполнялись при температурах 90 и 300 К.

По методу [7] определялся также внутренний квантовый выход отдельно для  $p$ - и  $n$ -слоев структуры ( $\beta_{in}^{(p)}$ ,  $\beta_{in}^{(n)}$ ). Кроме того, внутренний квантовый выход, усредненный в пределах активной области, определялся по методу [8] из внешнего квантового выхода электролюминесценции, потока фотолюминесценции и тока короткого замыкания при возбуждении  $p$ -области коротковолновым светом. Измерения  $\beta_{in}$ , как и ВАХ, выполнялись в диапазоне температур  $64 \div 300$  K и плотностей токов  $3 \cdot 10^{-4} \div 30$  A/cm<sup>2</sup>.

Установлено, что ВАХ  $p$ - $n$ -структур, различающихся легированием, во всем интервале плотностей токов, вызывающих электролюминесценцию, отвечают зависимости  $j \sim \exp(eU/\epsilon)$ , где  $\epsilon = mkT$  (рис. 1). Величина  $m$  имеет разброс от 1.03 до 1.10 независимо от  $N_{Si}$ . Таким образом, в исследованном диапазоне  $N_{Si}$  и плотностей тока весь ток через светодиод является инжекционным.

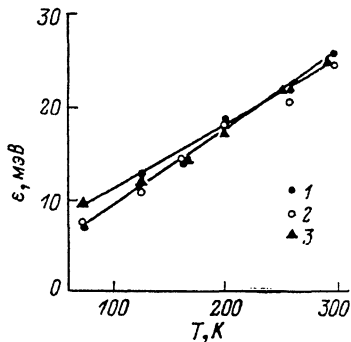


Рис. 1. Температурная зависимость параметра  $\epsilon$  ВАХ  $p$ - $n$ -структуры.

$N_{Si}$ , вес%: 1 — 0.2, 2 — 0.6, 3 — 0.8.

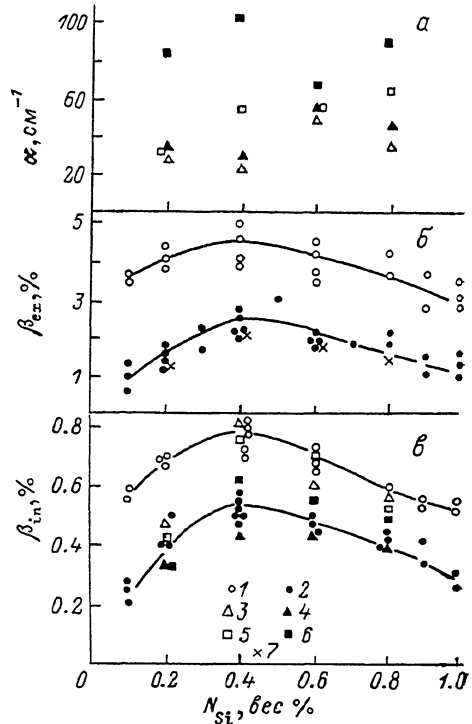


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения ( $a$ ), внешнего ( $б$ ) и внутреннего ( $в$ ) квантового выхода в структурах от содержания кремния в растворе-расплаве.

1, 2 — средние для структур; 3, 4 —  $n$ -слой; 5, 6 —  $p$ -слой; 7 — расчетная из измеренных  $\alpha_n$  и  $\beta_{in}$ .  $T$ , K: 1, 3, 5 —  $80 \div 90$ ; 2, 4, 6, 7 — 300.

Величины средних по спектру люминесценции коэффициентов поглощения  $p$ - и  $n$ -слоев структуры ( $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ) показаны на рис. 2,  $a$ . Во всех случаях  $\alpha_p > \alpha_n$  и уменьшаются с понижением температуры (вероятно, из-за увеличения крутизны края поглощения [9]). Однако изменение  $N_{Si}$  не вызывает систематического изменения  $\alpha$ . Это связано с тем, что наряду со сдвигом энергии максимума люминесценции с ростом  $N_{Si}$  происходит и уменьшение крутизны края поглощения [9], что ослабляет зависимость  $\alpha(N_{Si})$ . Кроме того, обращает на себя внимание малая абсолютная величина  $\alpha \sim 20 \div 100$  см<sup>-1</sup>, что согласуется с [1, 9] и приводит к тому, что при толщинах структур порядка десятков микрон самопоглощение должно быть незначительным.

Единственным фактором, с помощью которого можно объяснить немонотонную зависимость  $\beta_{ex}(N_{Si})$ , остается величина внутреннего квантового выхода люминесценции. Действительно, немонотонную зависимость от уровня легирования, повторяющую ход  $\beta_{ex}(N_{Si})$  (рис. 2, б), образуют экспериментальные значения  $\beta_{in}$ , полученные по методу [8], и  $\beta_{in}^{(p)}$  и  $\beta_{in}^{(n)}$ , полученные по методу [7] (рис. 2, в). Следует подчеркнуть, что последние получены независимо от величин  $\beta_{ex}$  и хорошо коррелируют с величиной  $\beta_{in}$ . На рис. 2, б (кривая 7) показаны величины  $\beta_{ex}$ , обратно рассчитанные по экспериментально определенным значениям  $\beta_{in}$ , но с учетом самопоглощения (по измеренным величинам  $\alpha$ ).

Видно, что эффективность самопоглощения незначительна, так как рассчитанная кривая  $\beta_{\text{ex}}(N_{\text{Si}})$  хорошо согласуется с экспериментальными.

Таким образом, причиной изменения  $\beta_{\text{ex}}$  светодиодов из GaAs<Si> в зависимости от уровня легирования является величина внутреннего квантового выхода. Достоверность такого вывода обеспечивается как использованием двух независимых методов определения  $\beta_{\text{in}}$ , так и комплексным характером эксперимента, включающего исследование других возможных механизмов изменения внешней эффективности.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 686 с.
- [2] Ahn B. H., Shurtz R. R., Trussel C. W. — J. Electrochem. Soc., 1971, v. 118, N 6, p. 1015—1016.
- [3] Коваленко В. Ф., Лисенкер В. С., Лисовенко В. Д., Марончук И. Е., Марончук Ю. Е. Арсенид-галлиевые электролюминесцентные диоды с антистоксовым люминофором. — ФТП, 1978, т. 12, в. 2, с. 258—263.
- [4] Коваленко В. Ф., Ганина Н. В., Марончук И. Е. Влияние изovalентной примеси индия на излучательную рекомбинацию  $p-n$ -структур GaAs<Si>. — ФТП, 1982, т. 16, в. 9, с. 1588—1593.
- [5] Баскин Э. М., Винке А. Л., Лисенкер В. С., Сидоров В. Г. Эффективность электролюминесценции в  $p-n$ -переходах из арсенида галлия, легированного кремнием. — ФТП, 1979, т. 13, в. 4, с. 2227—2232.
- [6] Королев В. Л., Россин В. В., Сидоров В. Г. Исследование эффективности излучательной рекомбинации структур из GaAs<Si>. — ФТП, 1984, т. 18, в. 4, с. 635—638.
- [7] Филиппов С. С., Селезнева М. А. О влиянии переноса рекомбинационного излучения в диффузию неравновесных носителей тока в полупроводниках. — ДАН СССР, 1976, т. 231, в. 3, с. 595—598.
- [8] Россин В. В., Сидоров В. Г. Определение внутреннего квантового выхода светодиодных структур. — ФТП, 1980, т. 14, в. 9, с. 1819—1821.
- [9] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Морозов Е. П., Протасов И. И., Третьяков Д. Н. Энергетический спектр арсенида галлия, легированного кремнием. — ФТТ, 1968, т. 10, в. 9, с. 2861—2864.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 22.06.1987  
Принято к печати 7.09.1987

ФТП, том 22, вып. 3, 1988

## СПЕКТР И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННОМ ПРОТОНАМИ КРЕМНИИ

Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е.

Несмотря на широкое применение протонного и альфа-облучения для локального регулирования параметров полупроводниковых структур [1], вопрос об энергетическом спектре радиационных дефектов (РД), ответственных за наблюдаемые изменения характеристик приборов, остается неясным. В данной работе методом фотоемкости (ФЕ) проведено исследование энергетических уровней дефектов, их сечений фотоионизации и профиля распределений дефектов в кремнии  $p$ -типа, облученном протонами с энергией 100 кэВ.

Метод ФЕ подробно описан в [2], а образцы с  $n^+p$ -переходами и базой из кремния КДБ-10 — в [3]. В необлученных образцах сигналы ФЕ и индуцированной ФЕ (ИФЕ) отсутствуют. Облучение протонами с энергией 100 кэВ проводилось на ускорителе НГ-200У при комнатной температуре с плотностью потока, равной 0.3 мкА/см<sup>2</sup>.