

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛИННЫХ ФОТОДИОДОВ С НЕЛИНЕЙНЫМ ПРОФИЛЕМ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

Кудинов В. А., Пека Г. П., Смоляр А. Н.

Теоретически и экспериментально исследованы спектральные характеристики (СХ) вольтовой фоточувствительности  $\Delta V$  длинных диодных структур с нелинейным профилем ширины запрещенной зоны  $E_g$  в базе при различных уровнях инжекции и типах тылового контакта. Нелинейное координатное изменение  $E_g$  в базе инжекционных варизонных фотодиодов (ИВФД) аппроксимируется двумя линейными участками. Получено координатное распределение концентрации неравновесных носителей заряда в варизонной базе диода, необходимое для расчета СХ  $\Delta V$ . Изучено влияние различных профилей  $E_g$  в базе ИВФД на полуширину СХ, спектральное положение и величину максимума вольтовой фоточувствительности. Обнаружена немонотонная (с максимумом) зависимость полуширины СХ  $\Delta V$  от уровня инжекции. Полученные экспериментальные зависимости были описаны расчетными кривыми при аппроксимации профиля ширины запрещенной зоны двумя линейными участками.

Данные исследования показали, что использование в качестве базы ИВФД полупроводников с нелинейным профилем  $E_g$  позволяет формировать СХ заданной формы в требуемой области спектра.

Инжекционные варизонные фотодиоды (ИВФД), предложенные в [1], обладают рядом важных преимуществ по сравнению с аналогичными приборами на основе гомозонных полупроводников [2]. Принципиально новым их свойством является, в частности, обратимое изменение в широких пределах области спектральной вольтовой фоточувствительности с изменением уровня инжекции [1-3]. Этот эффект связан с двумя факторами — инжекционной модуляцией темнового сопротивления длинной варизонной базы, определяющего величину фототовета, а также возможностью локального фотовозбуждения неравновесных носителей заряда (ННЗ) в заданной точке варизонной базы путем изменения энергии фотонов  $h\nu$ . Эффективность токового управления характеризуется зависимостями от величины прямого тока полуширины спектральных характеристик (СХ)  $\delta$ , спектрального положения  $h\nu^{\max}$  и величины максимума вольтовой фоточувствительности  $\Delta V^{\max}$ . Вид этих характеристик определяется координатной зависимостью ширины запрещенной зоны  $E_g$ , а также распределением темновых ННЗ в базе и его изменением с уровнем инжекции.

В работах [1, 3] исследовались ИВФД с линейным изменением  $E_g$  с координатой. Дополнительные возможности для оптимизации параметров таких приборов открывает использование длинной варизонной базы с нелинейным координатным изменением  $E_g$  [4, 5]. Расчетному и экспериментальному исследованию эффекта токового управления СХ вольтовой фоточувствительности в ИВФД с нелинейным профилем  $E_g$  посвящена настоящая работа.

### Р а с ч е т

Для расчета вольтовой фоточувствительности в режиме генератора тока при монохроматическом освещении интенсивностью  $\Phi_0$  использован подход, описанный в работе [4], для модели, показанной на рис. 1, а. При высоком уровне

инжекции рассмотрен перенос ННЗ в диффузионном приближении с учетом их дрейфа во встроенном квазиэлектрическом поле  $E_0 = -(1/q)(dE_g/dz)$ . При низком уровне инжекции учитывалось также влияние токового поля  $E_\tau = j/(q\mu_n n_0)$ , где  $j$  — плотность тока через диод,  $\mu_n$  — подвижность электронов,  $n_0$  — концентрация равновесных носителей заряда.

Расчет концентрации дырок  $\Delta p(z)$  и изменение напряжения на диоде при освещении  $\Delta V(h\nu)$  выполнены на примере  $p^+ - n - n^+$  и  $p^+ - n - m$ -фотодиодов из  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в области прямозонных составов ( $0 \leq x \leq 0.35$ ). Численные расчеты проведены при типичных для экспериментальных структур значениях параметров:  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_p = 200$ ,  $\mu_n = 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , коэффициент диффузии

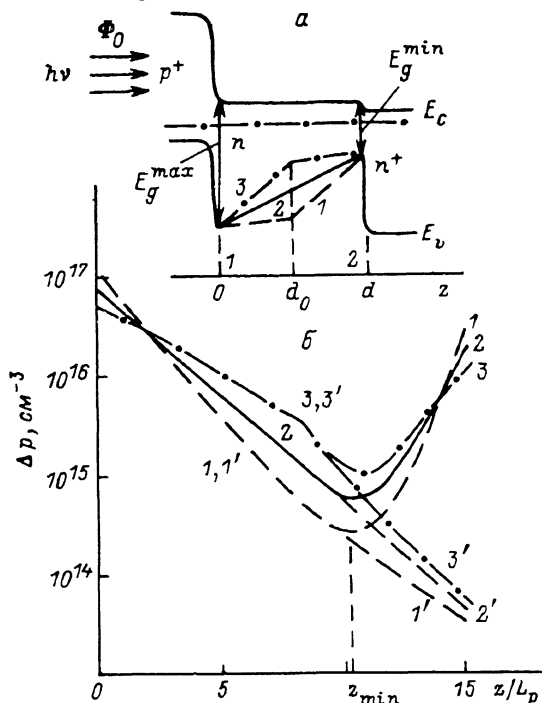


Рис. 1. Зонная диаграмма инжекционного  $p^+ - n - n^+$  ( $p^+ - n - m$ )-фотодиода (а) и темновое распределение дырок в базе диода (б) для различных профилей  $E_g$ .

$d_0 = d/2$ ,  $j = 500 \text{ А см}^2$ .  $E_{01} - E_{02}$ , В/см: 1, 1' — 40—160; 2, 2' — 100—100; 3, 3' — 160—40. Диоды: 1—3 —  $p^+ - n - n^+$ ; 1'—3' —  $p^+ - n - m$ .

дырок  $D_p = 5 \text{ см}^2/\text{с}$ , диффузионная длина  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 3 \text{ мкм}$ , длина базы  $d = 15L_p$ . Рассматриваются низкие интенсивности освещения ( $\Phi_0 = 10^{17} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ), при которых концентрация фотоносителей много меньше  $n_0$ . Различные профили  $E_g$  (рис. 1, а, кривые 1—3) при постоянном значении  $\Delta E_g = E_g^{\text{max}} - E_g^{\text{min}} = 0.45 \text{ эВ}$  задавались комбинацией параметров  $E_{01}$  и  $E_{02}$  при фиксированном значении  $d_0$  ( $E_{01}$  и  $E_{02}$  — встроенные квазиэлектрические поля  $E_0$  в первой и во второй областях базы соответственно,  $d_0$  — граница раздела областей), а также положением точки  $d_0$  ( $0 < d_0 < d$ ) при фиксированном либо  $E_{01}$ , либо  $E_{02}$ .

Низкий уровень инжекции [ $\Delta p(z) \ll n_0$ ]. Спектральные характеристики диодов в таком режиме широкополосные (рис. 2, а). При этом положении низкоэнергетического края определяется  $E_g^{\text{min}}$  и практически не зависит от профиля  $E_g$ .

В высокоэнергетической области наблюдается инверсия знака  $\Delta V$  при генерации ННЗ вблизи  $p^+ - n$ -перехода, что связано с вкладом в общий фотосигнал фотоэдс  $p^+ - n$ -перехода. Спектральное положение точки инверсии  $h\nu_{\text{инв}}$  при заданном токе, а также характер зависимости полуширины СХ  $\Delta V$  от тока существенно зависят от профиля  $E_g$  в базе, в частности от градиента  $E_g$  вблизи  $p^+ - n$ -перехода, т. е.  $E_{01}$  (рис. 1, а). С ростом тока вклад фотоэдс в суммарный фотосигнал уменьшается. Это приводит к увеличению полуширины СХ фото-

чувствительности за счет смещения точки инверсии в высокоэнергетическую область (рис. 2, б).

**Высокий уровень инжекции** [ $\Delta p(z) \gg n_0$ ]. В отсутствие освещения ( $\Phi_0 = 0$ ) координатная зависимость  $\Delta p$  для диодов с двойной инжекцией имеет минимум в глубине базы в точке  $z_{\min}$  (рис. 1, б), где темновое сопротивление максимально. Положение точки минимума и концентрация дырок в ней определяются профилем  $E_g$  (кривые 1—3). Для диодов с омическим тыловым контактом характерна монотонная зависимость  $\Delta p(z)$  (кривые 1'—3'). При этом сопротивление максимально вблизи омического контакта.

Спектр вольтовой фоточувствительности в этом режиме селективный (рис. 3). Максимум  $\Delta V^{\max}$  соответствует генерации ННЗ в наиболее высокоомной части

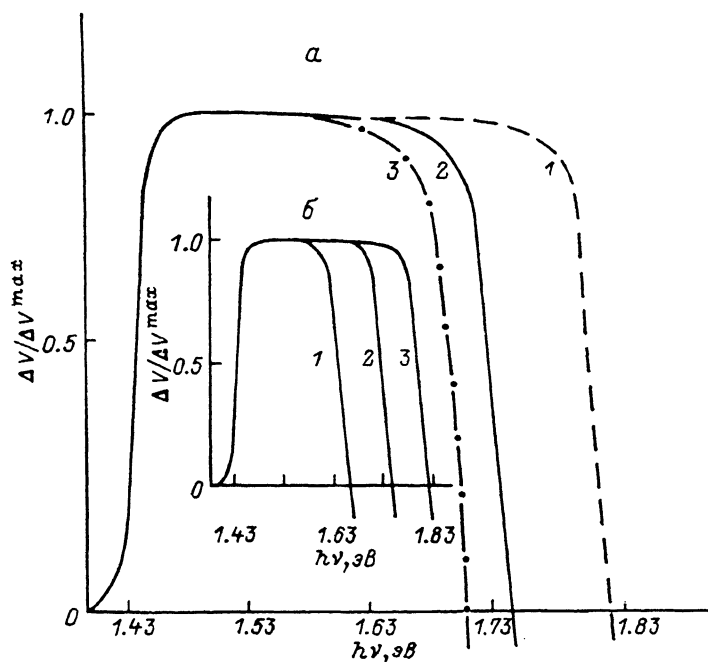


Рис. 2. Расчетные СХ относительной вольтовой фоточувствительности ИВФД при низком уровне инжекции.

$a - j = 0.01 \text{ A/cm}^2$ . 1—3 соответствуют профилям  $E_g$  на рис. 1, а. б —  $E_{01} = E_{02} = 100 \text{ В/см}$ .  $j, \text{ A/cm}^2$ : 1 — 0.001, 2 — 0.01, 3 — 0.1.

базы и его спектральное положение определяется значением  $E_g(z_{\min})$ . Как видно из рис. 3, а, переход от структуры с профилем 1 (рис. 1, а) к структуре с профилем 3 приводит к сдвигу максимума фоточувствительности в низкоэнергетическую область спектра и уменьшению полуширины спектральной кривой. Это связано с трансформацией темнового распределения концентрации ННЗ (рис. 1, б), а также с тем, что генерация фотосенсибилизаторов в точке  $z_{\min}$  для различных профилей  $E_g$  производится фотонами из разных областей спектра [4, 5]. Увеличение плотности тока через  $p^+ - n - n^+$ -диод приводит к сужению спектра  $\Delta V$  с высокоэнергетической и низкоэнергетической сторон спектра (рис. 3, б) за счет изменения ширины высокоомной области в базе с изменением плотности тока.

Таким образом, зависимость полуширины СХ вольтовой фоточувствительности от плотности тока имеет максимум (рис. 4, а) для всех рассмотренных профилей  $E_g$ . Для профиля 3 эта зависимость наиболее сильная, а положение максимума остается практически неизменным (рис. 4, б).

Величина  $\Delta V^{\max}$  также немонотонно зависит от плотности тока (рис. 4, в), что можно объяснить следующим образом. При низком уровне инжекции сопротивление базы определяется равновесной концентрацией электронов  $n_0$  и от величины тока не зависит, поэтому величина фоточувствительности в диапазоне токов  $10^{-3} \div 10^0 \text{ A/cm}^2$  пропорциональна току. При высоком уровне инжекции

с ростом тока сопротивление базы падает за счет инжекционной модуляции, и поэтому  $\Delta V^{\max}$  уменьшается. Величина максимума  $\Delta V^{\max}$  будет наибольшей для профиля 1, при котором наблюдается и наиболее сильное изменение спектрального положения  $h\nu^{\max}$  с изменением тока.

Анализ зависимости формы СХ  $\Delta V$  от положения точки  $d_0$  для профиля 3 при фиксированных значениях  $\Delta E_g$  и  $E_{02}$  показал, что при  $d_0 \leq 7L_p$  обеспечиваются минимальные значения полуширины СХ  $\Delta V$ . Для таких профилей 1, 2, 3 наблюдается наиболее сильная зависимость полуширины СХ фоточувствительности от тока.

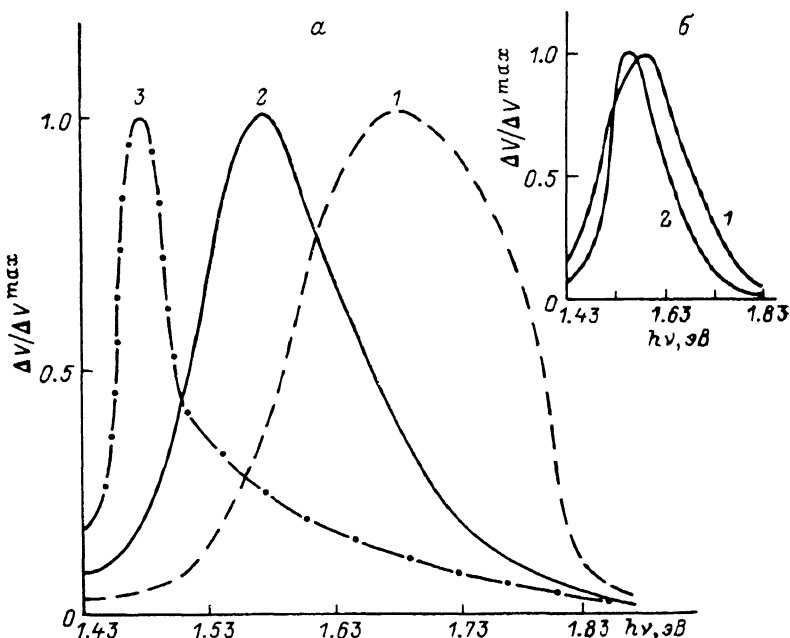


Рис. 3. Расчетные СХ относительной вольтовой фоточувствительности ИВФД при высоком уровне инжекции.

$a - j = 500 \text{ A/cm}^2$ . 1—3 соответствуют профилям  $E_g$  на рис. 1,  $a$ .  $b - E_{01} = E_{02} = 100 \text{ В/см}$ .  $j$ ,  $\text{A/cm}^2$ : 1 — 100, 2 — 500.

Проведенный анализ позволяет выбрать оптимальный профиль  $E_g$  в базе длинного инжекционного фотодиода для формирования требуемой формы СХ вольтовой фоточувствительности при разных уровнях инжекции.

### Эксперимент

Исследовались структуры  $p^+(\text{GaAs})-p(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})-n(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$  на основе варизонного твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в области  $0 \leq x \leq 0.35$ , выращенные методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава. Параметры  $n$ -слоя находились из измерений профиля состава с помощью рентгеновского микроанализатора на базе РЭМ-100У с использованием выражения  $E_g(x) = 1.424 + 1.247x$  [2]. Структуры имели профиль  $E_g$  типа 3 (рис. 1,  $a$ ). Значение  $L_p$  определялось из фотолуминесцентных измерений. Экспериментальные значения параметров для образца 1 типа были следующими:  $d = 24.2 \div 24.4 \text{ мкм}$ ,  $E_g^{\min} = 1.51 \text{ эВ}$ ,  $E_g^{\max} = 1.76 \text{ эВ}$ ,  $d_0 = 11.3 \div 11.5 \text{ мкм}$ ,  $E_g(d_0) = 1.53 \div 1.535 \text{ эВ}$ ,  $L_p = 1.2 \div 1.5 \text{ мкм}$ ,  $E_{01} = [E_g^{\max} - E_g(d_0)]/d_0 \approx 200 \text{ В/см}$ ,  $E_{02} = [E_g(d_0) - E_g^{\min}]/(d - d_0) \approx 16 \text{ В/см}$ , а для образца 2 типа:  $d = 19.2 \div 19.4 \text{ мкм}$ ,  $E_g^{\min} = 1.51 \text{ эВ}$ ,  $E_g^{\max} = 1.90 \text{ эВ}$ ,  $L_p = 1.3 \div 1.6 \text{ мкм}$ ,  $d_0 = 9.6 \div 9.8 \text{ мкм}$ ,  $E_g(d_0) = 1.54 \div 1.543 \text{ эВ}$ ,  $E_{01} \approx 370 \text{ В/см}$ ,  $E_{02} \approx 30 \text{ В/см}$ . При этом  $T = 77 \text{ К}$ .

СХ вольтовой фоточувствительности измерялись в режиме генератора тока по методике усиления на переменном сигнале с последующим синхронным

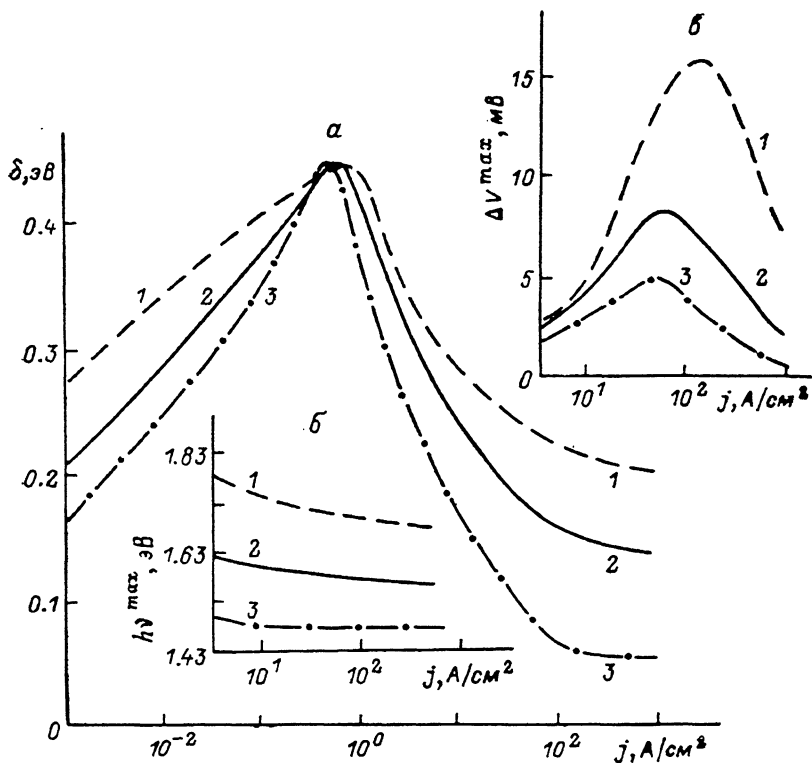


Рис. 4. Зависимость полуширины спектральной кривой фоточувствительности (а), спектрального положения максимума (б) и его абсолютной величины (в) от тока.

1—3 соответствуют профилям  $E_g$  на рис. 1, а.

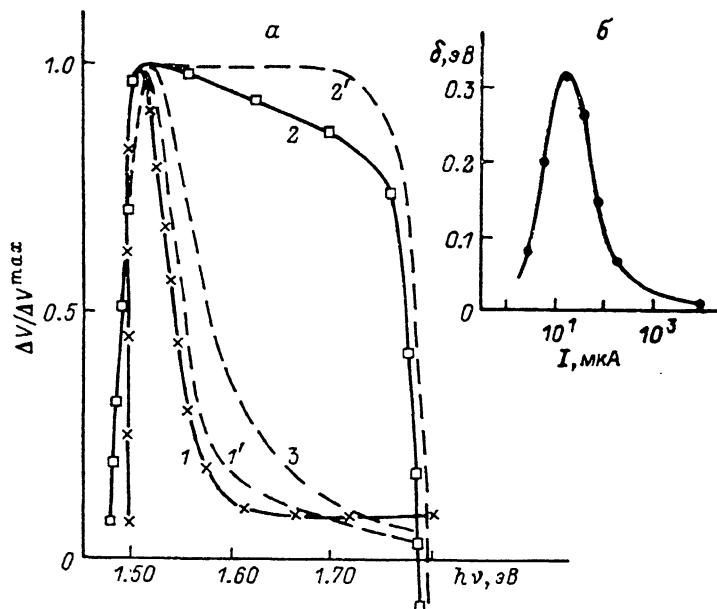


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные (точки и крестики) СХ относительной вольтовой фоточувствительности ИВФД при низком (2, 2') и высоком (1, 1', 3) уровнях инжекции (а), зависимость полуширины СХ  $\Delta V$  от тока (б).

1, 2 — эксперимент при токе  $I=2$  мА и 20 мкА соответственно; 1', 2', 3 — расчет при тех же значениях тока.

детектированием. Все измерения осуществлялись при низкой интенсивности освещения, которое производилось в направлении, перпендикулярном градиенту  $E_g$ . При этом выполнялись полученные в [1] критерии, обеспечивающие условия локальной фотогенерации, когда результаты расчета для продольного и поперечного фотовозбуждений совпадают.

На рис. 5, а изображены экспериментальные СХ относительной вольтовой фоточувствительности при разных уровнях инжекции. При низком уровне инжекции спектр вольтовой фоточувствительности широкополосный с инверсией знака  $\Delta V$  в высокоэнергетической области спектра (кривая 2). При переходе к режиму высокого уровня инжекции происходит сужение СХ (кривая 1) со стороны высокоэнергетической области спектра. При этом максимум селективной характеристики соответствует минимальному значению  $E_g$  в базе. Результаты хорошо описываются расчетными кривыми 1', 2' при подвижности дырок  $\mu_p \approx 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  и параметрах, приведенных для образца 1 типа.

На рис. 5, а (кривая 3) представлена расчетная СХ  $\Delta V$  структуры с вышеприведенными параметрами диода 1 типа при высоком уровне инжекции, но в предположении линейного изменения  $E_g$  от  $E_g^{\text{max}}$  до  $E_g^{\text{min}}$ . Видно, что такой профиль  $E_g$  приводит к увеличению полуширины СХ вольтовой фоточувствительности по сравнению с  $\delta$  СХ структуры с нелинейным профилем (кривые 3 и 1, 1') примерно в 2 раза.

Аналогичные зависимости наблюдаются и для образца 2 типа, для которого экспериментальная зависимость полуширины СХ  $\Delta V$  от тока представлена на рис. 5, б. Расчетная немонотонная зависимость СХ вольтовой фоточувствительности при переходе от низкого уровня инжекции к высокому подтверждается экспериментально.

Таким образом, использование нелинейного профиля  $E_g$  в варизонной базе инжекционных фотодиодов позволяет расширить возможности формирования СХ требуемого вида.

#### Список литературы

- [1] Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Смоляр А. Н. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1480—1482.
- [2] Пека Г. П., Коваленко В. Ф., Смоляр А. Н. Варизонные полупроводники. Киев, 1989. 252 с.
- [3] Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Радзивилюк В. А. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 150—152.
- [4] Кудинов В. А., Пека Г. П., Смоляр А. Н. // УФЖ. 1989. Т. 34. В. 8. С. 1211—1216.
- [5] Кудинов В. А., Пека Г. П., Смоляр А. Н. // Полупроводники и гетеропереходы / Под ред. А. И. Розенталя. Таллинн, 1987. С. 97—99.

Киевский государственный  
университет им. Т. Г. Шевченко

Получена 22.03.1990  
Принята к печати 1.06.1990