

СЕЛЕКТИВНАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЛИННЫХ $p^+ - n$ -ДИОДОВ С ВАРИЗОННОЙ БАЗОЙ НА ОСНОВЕ $Al_xGa_{1-x}As$

Пека Г. П., Кавалаяускас А. А., Пулеметов Д. А.,
Смоляр А. Н., Шимулите Е. А.

Рассчитаны спектральные характеристики (СХ) дифференциальной вольтовой фоточувствительности S_V инжекционных $p^+ - n$ -фотодиодов с длинной варизонной базой в режиме высокого уровня инжекции при низкой интенсивности освещения. Проанализирована зависимость формы спектра S_V от параметров базы диода и функции оптической генерации. Показано, что в таком режиме инжекционные $p^+ - n$ -фотодиоды с варизонной базой имеют селективный спектр S_V , описываемый двумя экспонентами. Ширина и форма СХ S_V определяются крутизной края поглощения, диффузионной длиной дырок в базе и градиентом E_g . Теоретические результаты подтверждены экспериментально на структурах $Al_xGa_{1-x}As - GaAs$.

Варизонные полупроводники используются в ряде приборов, в частности в фоточувствительных элементах на основе поверхностно-барьерных структур и $p - n$ -переходов [1-4]. Такие структуры работают при обратном смещении либо в вентильном режиме, а фотосигнал формируется за счет разделения носителей полем перехода. Применение варизонного полупроводника в данных структурах позволяет получить широкополосную либо селективную фоточувствительность в зависимости от параметров варизонного слоя.

Другим типом фоточувствительных приборов являются инжекционные фотодиоды (ИФД) с длинной варизонной базой. В отличие от [1-4] такие диоды работают при прямом смещении инжектирующего перехода, а фотосигнал формируется за счет изменения проводимости варизонной базы при освещении. Использование в ИФД варизонной базы позволяет управлять спектром фоточувствительности, т. е. получать широкополосную либо селективную спектральную характеристику (СХ) путем изменения режима работы диода [5, 6].

Цель настоящей работы — теоретическое описание селективного спектра инжекционных $p^+ - n$ -фотодиодов с длинной варизонной базой, анализ зависимости этого спектра от параметров базы диода и функции оптической генерации, экспериментальная проверка полученных результатов на различных типах структур $Al_xGa_{1-x}As - GaAs$.

Расчет. Рассмотрим $p^+ - p - n$ -диод с длинной варизонной n -базой, схематически изображенный на рис. 1. Как показано в [6], селективная фоточувствительность таких структур наблюдается при высоком уровне инжекции и низкой интенсивности освещения Φ_0 , когда $\Delta p_1 \gg n_0$, Δp_2 , где $\Delta p_{1,2}$ — стационарные концентрации неравновесных дырок в базе, созданных соответственно инжекцией и фотовозбуждением, n_0 — концентрация равновесных электронов. В инжекционных фотодиодах с варизонной базой максимум фоточувствительности наблюдается при энергиях фотонов $h\nu$, соответствующих E_g в той области длинной базы, где минимальна темновая концентрация инжектированных носителей. В рассматриваемом случае эта область соответствует генерации неравновесных дырок вблизи омического контакта, т. е. при $h\nu \simeq E_g^{\min}$.

Рассчитаем спектральную зависимость дифференциальной вольтовой фоточувствительности диода $S_V = dV/d\Phi_0$, рассмотрев две спектральные области.

1. $h\nu \geq E_g^{\min}$. В этом спектральном диапазоне функцию оптической генерации можно описать выражением

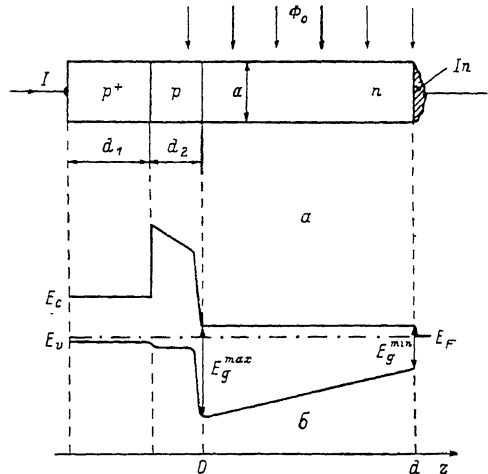
$$G(z) = A_1 \begin{cases} \exp\left(\frac{z-z_0}{\delta_1}\right), & z < z_0, \\ \exp\left(-\frac{z-z_0}{\delta_2}\right), & z > z_0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь z_0 — точка, где $h\nu = E_g$; A_1 — константа, не зависящая от z и $h\nu$; δ_1, δ_2 — параметры функции генерации, характеризующие ее полуширину. Такая аппроксимация для функции $G(z)$ экспериментально обоснована в [7] при освещении варизонной базы монохроматическим собственным светом параллельно ∇E_g . Как показано в [6], она может быть применена также при освещении перпендикулярно ∇E_g (рис. 1).

При высоком уровне инжекции и низкой интенсивности освещения дифференциальная вольтовая фоточувствительность длинного $p^+ - n$ -фотодиода с варизонной базой

$$S_V = A_2 \int_0^d \frac{\Delta p_2(z)}{\Delta p_1^2(z)} dz. \quad (2)$$

Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры (а) и зонная диаграмма в термодинамическом равновесии (б).



Явные выражения для Δp_1 и Δp_2 получаются из дифференциального уравнения диффузии—дрейфа для неравновесных дырок [1] при учете высокого уровня инжекции и функции генерации (1)

$$\Delta p_1(z) = A_3 \exp(-z/L^+), \quad (3)$$

$$\Delta p_2(z) = \begin{cases} A_4 \exp\left(\frac{z-z_0}{L^-}\right) + A_5 \exp\left(\frac{z-z_0}{\delta_1}\right), & z < z_0, \\ A_6 \exp\left(-\frac{z-z_0}{L^+}\right) + A_7 \exp\left(-\frac{z-z_0}{\delta_2}\right), & z > z_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $A_3 - A_7$ — константы, не зависящие от z и $h\nu$; L^\pm — диффузионно-дрейфовые длины в ускоряющем и тормозящем встроенных полях при высоком уровне инжекции,

$$\frac{1}{L^\pm} = \sqrt{\left(\frac{|\nabla E_g|}{4kT}\right)^2 + \frac{1}{2} L_p^{-2} \mp \frac{|\nabla E_g|}{4kT}}, \quad (5)$$

L_p — диффузионная длина неравновесных дырок в базе. При записи (5) получается, что отношение подвижностей электронов и дырок $b \gg 1$.

В рассматриваемой спектральной области $h\nu \geq E_g^{\min}$ выполняется соотношение $z_0 \approx d$, поэтому в (2) верхним пределом интегрирования можно взять z_0 . Тогда, используя (3), (4) и учитывая, что $d > L^+$, получаем зависимость, описывающую высокоэнергетичный спад селективной спектральной характеристики,

$$\ln |S_V| = B_1 - \frac{2}{L^+ |\nabla E_g|} h\nu, \quad (6)$$

где B_1 — константа, не зависящая от $h\nu$.

Данный результат можно пояснить качественно. Действительно, в инжекционном фотодиоде с варизонной базой спад фотоответа в коротковолновой области определяется координатным распределением темновой концентрации инжектированных дырок $\Delta p_1(z)$, а это распределение характеризуется длиной L^+ (3).

2. $h\nu \ll E_g^{\text{min}}$. В этой спектральной области функция оптической генерации [1]

$$G(z) = \Phi_0 \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu - E_g(z)}{\varepsilon}\right), \quad (7)$$

где ε — параметр, характеризующий крутизну края поглощения, α_0 — коэффициент поглощения при $h\nu = E_g$. Тогда концентрация фотодырок $\Delta p_2(z)$ в базе

$$\Delta p_2(z) = \left[A_8 \exp\left(\frac{z}{L^-}\right) + A_9 \exp\left(\frac{|\nabla E_g|}{\varepsilon} z\right) \right] \exp\left(\frac{h\nu}{\varepsilon}\right), \quad (8)$$

где A_8, A_9 — константы, не зависящие от z и $h\nu$.

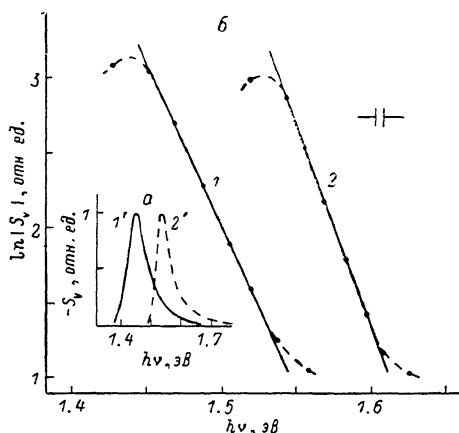


Рис. 2. Селективные спектральные характеристики S_V образца II типа (а) и высокоэнергетичный край спектра S_V (б).

Т, К: 1, 1' — 300; 2, 2' — 77.

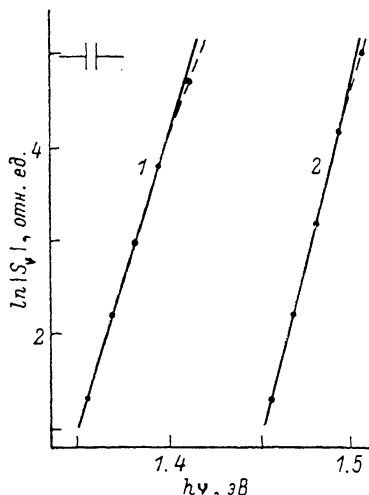


Рис. 3. Низкоэнергетичный край селективного спектра S_V образца II типа.

Т, К: 1 — 300, 2 — 77.

Используя (3), (8), из (2) получаем зависимость, описывающую низкоэнергетический спад селективной спектральной характеристики,

$$\ln |S_V| = B_2 + \frac{h\nu}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где B_2 — константа, не зависящая от $h\nu$.

Такая спектральная зависимость S_V качественно объясняется следующим образом. Спад фотоответа в длинноволновой области связан с уменьшением коэффициента поглощения, который определяется параметром ε (7).

Из полученных аналитических выражений (7), (9) видно, что форма спектра S_V и его ширина на уровне спада в e раз $\Delta h\nu \simeq L^+ |\nabla E_g| / 2 + \varepsilon$ определяются крутизной края поглощения, градиентом E_g , диффузионной длиной неравновесных дырок в базе L_p и не зависят от параметров функции генерации δ_1 и δ_2 .

Эксперимент. Исследовались p^+ (GaAs)— p ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)— n ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)-структуры (рис. 1), полученные методом жидкостной эпитаксии. Варизонный $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слой выращивался на низкоомных подложках GaAs(Zn) и специально не легировался. В процессе роста цинк из подложки диффундировал в эпитаксиальный слой на расстояние d_2 (рис. 1, а), формируя p — n -переход.

Концентрация равновесных электронов n_0 в варизонном n -слое определена из измерения стационарных C — V -характеристик, и методом [8] найдены зна-

чения E_g^{\min} , E_g^{\max} , $|\nabla E_g|$, а также распределение E_g по координате z в n -слое. Зависимость $E_g(z)$ была линейной.

В p^+ - и n -областях в вакууме $p=10^{-5}$ мм рт. ст. в течение $t=5$ мин при температуре 300 °С впалялись индиевые омические контакты.

Структуры освещались в направлении, перпендикулярном ∇E_g , монохроматическим световым потоком интенсивностью Φ_0 (рис. 1), который формировался с помощью спектрометра ИКС-21. Измерения проводились в режиме генератора тока при подаче напряжения, соответствующего прямому смещению p - n -перехода.

Спектральные зависимости дифференциальной вольтовой фоточувствительности S_V измерялись для структур с различными значениями $|\nabla E_g|$ и d при комнатной и азотной температурах (см. таблицу). Измерения проводились при

Тип образца	T, К	E_g^{\min} , эВ	E_g^{\max} , эВ	$ \nabla E_g $, эВ/см	$n_0 \cdot 10^{-15}$, см $^{-3}$	$\epsilon \cdot 10^2$, эВ	L_p , мкм	d , мкм
I	300	1.52	1.84	91	1	1.1	3.5	35
	77	1.6	1.92	91	0.7	1	2	35
II	300	1.43	1.73	139	4	1.5	2.8	21.6
	77	1.51	1.81	139	3.5	1.3	1.5	21.6
III	300	1.62	2.0	155	1.2	1.5	2	37
IV	300	1.65	2.0	155	0.9	1.9	3.3	35

Примечание. Параметры $d_1=300$ мкм, $d_2=8.5$ мкм, $a=1$ мм для всех типов структур были одинаковыми.

высоком уровне инжекции и низкой интенсивности освещения. Для обеспечения такого режима ток выбирался на спадающем участке зависимости ΔV от тока [8], а интенсивность — на линейном участке зависимости ΔV от Φ_0 ; здесь ΔV — разность напряжений на диоде в темноте и при освещении.

На рис. 2, 3 представлены спектры S_V для образца II типа при температурах 300 и 77 К. Видно, что в соответствии с расчетом низко- и высокоэнергетичных участки спектра описываются экспоненциальными зависимостями. Наилучшее совпадение экспериментальных СХ S_V с расчетными наблюдается при значениях L_p и ϵ , приведенных в таблице.

Важно отметить, что наклон высокоэнергетичного участка спектра S_V увеличивается с понижением температуры (рис. 2, б), что связано с уменьшением L_p . Такая температурная зависимость диффузионной длины наблюдалась для исследуемого материала также другими методами [8].

Наклон низкоэнергетичного края СХ S_V также увеличивается с понижением температуры (рис. 3) из-за увеличения крутизны края поглощения. Такая температурная зависимость параметров ϵ и L_p приводит к тому, что ширина селективного спектра S_V уменьшается с понижением температуры (рис. 2, а). Например, для образца II типа при $T=77$ К получено значение $\Delta h\nu \approx 0.07$ эВ, что позволяет судить об эффективности сужения спектра S_V при высоком уровне инжекции. Действительно, при низком уровне инжекции ширина спектра S_V таких структур составляет примерно $\Delta E_g = E_g^{\max} - E_g^{\min}$ и значительно превосходит $\Delta h\nu$.

Таким образом, в работе получены и экспериментально подтверждены на структурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ аналитические зависимости, описывающие селективные спектральные характеристики длинных p^+ - n -диодов с варизонной базой.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бывалый В. А., Волков А. С., Гольдберг Ю. А., Дмитриев А. Г., Царенков Б. В. — ФТП, 1979, т. 13, в. 6, с. 1110—1115.
 [2] Вуль А. Я., Петросян С. Г., Шик А. Я., Шмарцев Ю. В. — ФТП, 1976, т. 10, в. 4, с. 673—676.

- [3] Бывалый В. А., Волков А. С., Гольдберг Ю. А., Дмитриев А. Г., Царенков Б. В. — ФТП, 1979, т. 13, в. 7, с. 1385—1393.
- [4] Баранов А. Н., Именков А. Н., Лидейкис Т. П., Царенков Б. В., Шерняков Ю. М., Яковлев Ю. П. — ФТП, 1978, т. 12, в. 7, с. 1414—1417.
- [5] Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Смоляр А. Н. — ФТП, 1984, т. 18, в. 8, с. 1480—1483.
- [6] Пека Г. П., Пулеметов Д. А., Радзивилюк В. А., Смоляр А. Н., Шпмулите Е. А. — ФТП, 1988, т. 22, в. 1, с. 150—152.
- [7] Габараев Р. С., Кравченко А. Ф., Морозов Б. В. — ФТП, 1983, т. 17, в. 9, с. 1588—1591.
- [8] Коваленко В. Ф., Пека Г. П., Шепель Л. Г. — ФТП, 1980, т. 14, в. 7, с. 1350—1354.

Кисчский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Получена 23.02.1987
Принята к печати 21.08.1987

НОВЫЕ КНИГИ ПО ПОЛУПРОВОДНИКАМ

Козуб В. И.

Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе / Под ред. Ю. К. Пожелы, Л. Е. Воробьева. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 175 с.

Книга представляет собой сборник оригинальных работ, посвященных физическим принципам действия мазеров коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на циклотронном резонансе горячих носителей в Ge и их излучательным характеристикам. Приведены общие сведения, относящиеся к стимулированному циклотронному излучению в полупроводниках. Последовательно рассмотрены мазеры в параллельных и скрещенных электрическом и магнитном полях. Освещены физические принципы мазера на циклотронном резонансе дырок с отрицательными массами; приведены данные спектральных исследований такого прибора. Описано численное моделирование отрицательной проводимости тяжелых дырок. Обсуждаются индуцированное субмиллиметровое излучение на переходах между уровнями Ландау легких дырок, а также генерация миллиметрового излучения горячими электронами в *n*-Ge в сильных полях.

Корольков В. И., Рахимов Н. Диоды, транзисторы и тиристоры на основе гетероструктур. Ташкент: Фан, 1986. 152 с.

Освещены основные вопросы, связанные с использованием гетероструктур (ГС) на основе широкозонных материалов $A^{III}B^V$ для создания полупроводниковых приборов. Изложены современные представления о свойствах ГС и физических процессах, протекающих в них. Описаны особенности протекания тока, влияние туннельного эффекта, процессы при отрицательных смещениях, фотоэлектрические свойства и т. д. Даны сведения о методах получения многослойных эпитаксиальных ГС (в частности, о газовой, жидкостной и молекулярной эпитаксии, о выращивании велегированных слоев GaAs, а также многослойных ГС в системе GaAs—AlAs). Рассмотрены полупроводниковые диоды на основе GaAs и ГС GaAs—AlGaAs (прежде всего силовые и высоковольтные диоды в условиях фотонного переноса неравновесных носителей). Значительное место отведено биполярным транзисторам, в том числе транзисторам с широкозонным эмиттером, быстродействующим гетеротранзисторам в системе GaAs—AlAs, транзисторам на основе двойной гетероструктуры с базовой областью переменного состава, мощным арсенид-галлиевым транзисторам и электронно-фотонным транзисторам. Анализируются особенности полевых транзисторов на основе ГС (в том числе транзисторов с буферным слоем, с гетеропереходом в качестве затвора, транзисторов с высокой подвижностью электронов). Специальная глава посвящена тиристорам на основе ГС. Обсуждаются 4-слойные *p-n-p-n*-структуры, импульсные тиристоры на основе GaAs—AlAs, тиристоры с оптическим управлением и фотонно-инжекционные тиристоры. Проиллюстрированы новые возможности существенного улучшения параметров полупроводниковых приборов за счет использования ГС.