

[4] Брагинский А.П. – В сб.: Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов, Л., 1985, с. 123–128.

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

Поступило в Редакцию
9 сентября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 5

12 марта 1988 г.

УСИЛЕНИЕ ФОТОТОКА В ИЗОТИПНОЙ СТРУКТУРЕ $n-n$ $GaSb-GaInAsSb$

И.А. Андреев, А.Н. Баранов,
М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова,
А.А. Рогачев, Г.М. Филаретова,
Ю.П. Яковлев

В настоящей работе сообщается об обнаружении значительного усиления фототока в изотипных p^+ - n гетероструктурах на основе $GaSb-GaInAsSb$, обусловленного особенностями гетерограницы второго типа. В гетеропереходе второго типа скачки потенциала в зоне проводимости и валентной зоне на гетерогранице имеют один и тот же знак [1], что приводит к специфическим особенностям в свойствах полупроводниковых приборов, созданных на основе таких структур [2].

Исследуемые структуры изготавливались методом ЖФЭ. В качестве подложки использовался $p-GaSb \langle 111 \rangle$ В, легированный Te , с концентрацией носителей заряда $n = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Узкозонный эпитаксиальный слой не легировался, концентрация носителей заряда в $p-GaInAsSb$ ($E_g = 0.52$ эВ) составляла $5 \cdot 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина 2–3 мкм. Для создания омического контакта далее выращивался слой легированного $p^+ GaInAsSb$ того же состава толщиной 2 мкм с концентрацией $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 1).

Как показали рентгенографические исследования, структуры $GaSb-GaInAsSb$ были изопериодными – рассогласование постоянных решеток $\frac{\Delta a}{a} \approx 10^{-3} \%$. Омические контакты наносились вжиганием сплава $In+Te$. Структуры изготавливались в виде мезодиодов с диаметром чувствительной площадки $\varnothing = 300$ мкм.

Исследовалось спектральное распределение фоточувствительности, вольт-амперные характеристики, а также зависимость фототока от напряжения смещения и интенсивности излучения при $T = 296$ и 78 К. Спектры снимались на монохроматоре $SPM-2$ с глобаром в качестве источника излучения.

Вольт-амперные характеристики структур имели диодный характер (рис. 2, врезка). При интенсивной засветке наблюдалось спрямление характеристик вплоть до омических ($\rho > 10^{-3}$ Вт). Харак-

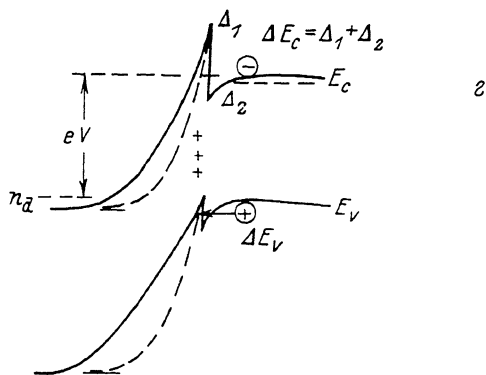
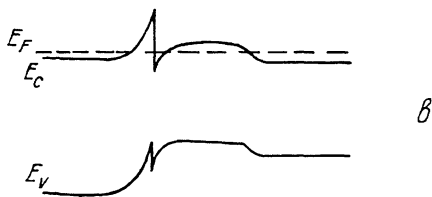
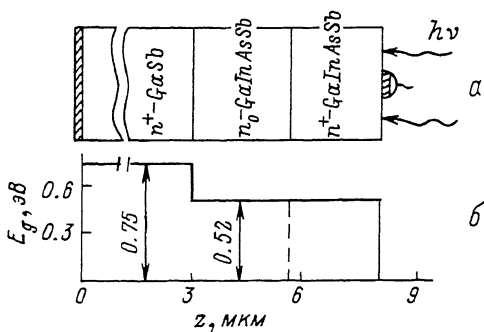


Рис. 1. Схематическое изображение и зонная диаграмма изотопной гетероструктуры $p^+-p^0-p^+$ - $GaSb-GaInAsSb-GaInAsSb$.

а - схематическое изображение структуры, б - изменение ширины запрещенной зоны по координате, в - зонная диаграмма структуры в термодинамическом равновесии, г - зонная диаграмма структуры при обратном смешивании ($GaSb$ смещен положительно по отношению к $GaInAsSb$).

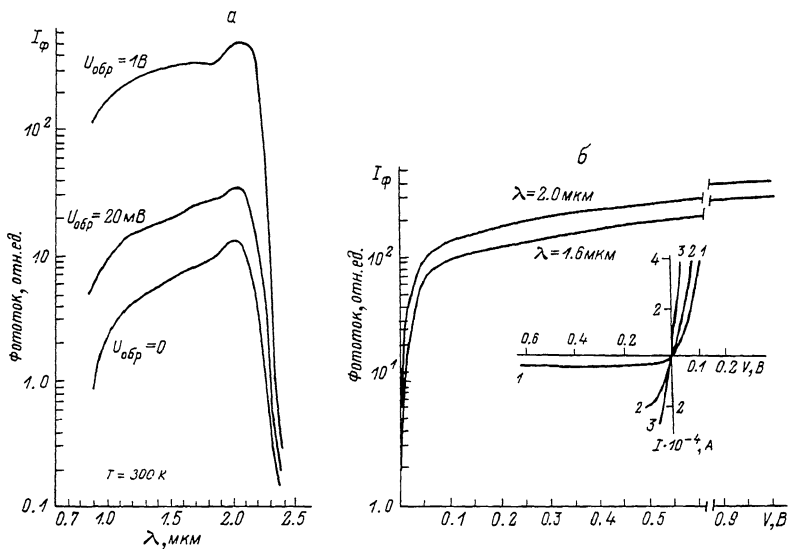


Рис. 2. а) Спектральное распределение фоточувствительности $n-n$ GaSb-GaInAsSb структуры при обратном напряжении: 1 – 0В, 2 – 50 мВ, 3 – 1 В. б) Зависимость фототока от обратного смещения в п-п GaSb-GaInAsSb при освещении монохроматическим светом, λ : 1 – 1.6 мкм, 2 – 2 мкм. $T=296$ К. На врезке: ВАХ структуры (1 – в темноте, 2, 3 – при интенсивной белой засветке).

терным для темновых ВАХ было также отсутствие отсечки для прямой ветви и слабое изменение тока с напряжением на начальном участке в обратной ветви.

Спектр фотоответа структуры $n-n$ GaSb-GaInAsSb представлен на рис. 2, а для случая малого и „большого“ напряжения на структуре. Длинноволновой край характеристики соответствовал ширине запрещенной зоны твердого раствора, широкое крыло в области больших энергий фотонов, вероятно, обусловлено поглощением в GaSb при боковой засветке структуры.

При приложении к структуре небольшого напряжения порядка нескольких милливольт и освещения ее монохроматическим светом из интервала 1.3–2.2 мкм наблюдалось резкое возрастание фототока почти на два порядка, которое затем сменялось более плавным его увеличением (рис. 2, б). Такой характер изменения фототока наблюдался как при прямом, так и при обратном смещении (обратным считалось напряжение, при котором GaSb был смещен положительно). Усиление фототока определялось как отношение фототока

при данном напряжении на структуре к значению фоточувствительности идеального фотодиода, равной 0.6 электрона/фотон на длине волны 1.6 мкм. Усиление фототока составляло 50-300 при 296 К и слегка возрастало при $T=78$ К. Отметим, что в изучаемых образцах фоточувствительность в нуле напряжения была на уровне 0.3-0.5 элект/фотон при $\lambda=1.8-2$ мкм и $T=296$ К. Время фотоответа в таких структурах составляло $\tau \approx 10^{-6}$ с.

Ранее в работе [3] сообщалось о влиянии освещения на ВАХ изотипных гетеропереходов $p-p$ $Ge-Si$. Авторы отмечали возрастание фототока в такой структуре почти на порядок по сравнению со стандартным Si фотодиодом. Авторы [3] объясняли наблюдаемый эффект модуляцией за счет накопления дырок на поверхностных состояниях, концентрация которых была велика ($n_s \approx 10^{13}$ см $^{-2}$)

из-за большого несоответствия в периодах решеток ($\frac{\Delta a}{a} \approx 4\%$),

высоты барьера на границе раздела.

В гетеропереходах второго типа накопление дырок может происходить за счет захвата потенциальной ямой, образованной разрывом валентной зоны на гетерогранице. Последнее важно для объяснения наблюдаемого эффекта, поскольку исследуемые структуры были изопериодными ($\frac{\Delta a}{a} \approx 10^{-3}\%$) и ожидаемая плотность поверхностных состояний, вызванных несоответствием постоянных решетки, не превышала $\sim 5 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$.

Рассмотрим коротко возможную модель усиления тока в изотипном гетеропереходе П типа (см. рис. 1, в).

В структуре такого типа на гетерогранице формируется туннельно-прозрачный барьер для электронов в зоне проводимости, высота и ширина которого определяется составом твердого раствора и уровнем легирования слоев. При освещении структуры созданные светом неравновесные дырки захватываются в потенциальную ловушку, созданную скачком потенциала в валентной зоне на гетерогранице (по оценкам $\Delta E_V \approx 0.05$ эВ [4]). Наличие таких дырок приводит к сужению и увеличению прозрачности туннельного барьера, что ведет к возрастанию туннельного тока электронов и усилению фототока. Отметим, что аналогичный эффект будет иметь место и в случае захвата дырок на состояния, которые могут присутствовать на гетерогранице.

При достаточно большом обратном смещении величина туннельного тока из узкозонной области в широкозонную определяется выражением:

$$J = env S \exp \left\{ -\frac{2}{3} \sqrt{\frac{2m_2}{\hbar^2}} \frac{(\Delta - e\varphi_0)^{3/2} L}{a + eV} \right\}, \quad (1)$$

$$L = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 (\Delta + eV)}{2\pi e^2 n d}}, \quad S - \text{площадь структуры,}$$

n_d – концентрация носителей заряда в $n \pm GaSb$,

где

$$e\varphi_0 = 11.7 e^{4/5} \left(n_d \sqrt{\frac{\varepsilon_2 (\Delta + eV)}{2\pi e^2 n_d}} + I\tau \right)^{4/5},$$

а n, v – концентрация электронов и их скорость, соответствующая энергии $e\varphi$; $m_1, \varepsilon_1, m_2, \varepsilon_2$ относятся к твердому раствору и

$GaSb$ соответственно. При этом усиление $G = \frac{1}{e} \frac{dJ}{dI}$, где I – интенсивность света.

При выводе (1) предполагалось, что все неравновесные дырки захватываются на гетерогранице. Формула (1) справедлива при достаточно низкой температуре, однако оценки показывают, что при обратном смещении J и G практически не зависят от температуры.

Для получения наблюдаемых в эксперименте значений J и G в (1) было положено значение $n_d = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\Delta = 0.2 \text{ эВ}$. Из независимых измерений величина $n_d \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Возможно, расхождение расчетных значений с опытными величинами токов при учете последнего значения n_d связано с пренебрежением зарядом, находившимся на гетерогранице.

Небольшое изменение концентрации неравновесных дырок (член $I\tau$ в формуле) приводит к резкому изменению туннельной прозрачности квантово-размерного барьера, и ток экспоненциально возрастает. Поскольку наблюдаемый механизм усиления является непороговым в отличие, например, от процесса ударной ионизации, идущего с высоким порогом $\varepsilon_{ie} \geq \varepsilon_g$, то значительные усиления фототока достигается уже при малых обратных напряжениях (менее 100 мВ), как видно из рис. 2. Оценки по формуле (1) показывают, что описанный механизм позволяет получать усиления до 10^4 – 10^5 .

В заключение авторы благодарят И.Н. Ясиевич и О.М. Сресели за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] К р о е м е р Н. – J. Vac. Sci. Technol., 1984, В 2, N 3, p. 433–439
- [2] Б а р а н о в А.Н., Д ж у р т а н о в Б.Е., И м е н - к о в А.Н., Р о г а ч е в А.А., Ш е р н я к о в Ю., Я к о в л е в Ю.П. – ФТП, 1986, т. 20 в. 12, с. 2217–2221.
- [3] Y a w a t a S., A n d e r s o n R.L. – Phys., Stat. Sol., 1965, v. 12, N 2, p. 297–304.
- [4] N a k a o M., Y o s h i d a S., G o n d S. – Sol. State Comm., 1984, v. 49, N 7, p. 633–666.