

06;12

**О механизмах усиления фототока
в изотипных гетероструктурах** **$n^+ - \text{GaSb} - n^0 - \text{GaInAsSb} - n^+ - \text{GaAlAsSb}$** © С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Ю.П. Яковлев,
Б.Е. Саморуков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 2 октября 1997 г.

На основе измерений вольт-амперных характеристик, фототока и зависимости его от напряжения смещения (прямого и обратного) и магнитного поля на изотипных гетероструктурах $n^+ - \text{GaSb} - n^0 - \text{GaInAsSb} - n^+ - \text{GaAlAsSb}$ определены механизмы токопереноса. Обнаружены два механизма усиления фототока. В структурах с двойной инжекцией в диффузионном приближении усиление определяется изменением времени жизни с уровнем инжекции темновых носителей тока. В структурах с дрейфовым переносом усиление связано с "пролетным" эффектом. В обоих случаях велика роль уровней захвата.

Гетероструктуры на основе GaSb с узкозонными тройными и четверными твердыми растворами находят важное практическое применение. На основе $p-n$ гетероструктур созданы светодиоды [1], лазеры [2] и фотодиоды [3] в средней ИК-области. Меньшее внимание уделялось изучению электрических и фотоэлектрических свойств изотипных гетероструктур. В работе [4] были опубликованы некоторые результаты исследования фотоэлектрических характеристик этих изотипных гетероструктур, где обнаруженное усиление фототока объяснялось увеличением прозрачности барьера на гетерогранице.

В настоящей работе приведены новые данные, выявляющие связь между механизмом токопереноса и механизмом усиления фототока в структурах $n^+ - \text{GaSb} - n^0 - \text{GaInAsSb} - n^+ - \text{GaAlAsSb}$ (рис. 1, *a*). Технология изготовления гетероструктур была в основном та же, что и в [4]. Используя стандартный метод фотолитографии и метод вакуумного напыления, создавались мезафотоструктуры с диаметром мезы $\varnothing 300 \mu\text{m}$ и точечным омическим контактом $\varnothing 50 \mu\text{m}$ к освещаемой $n^+ - \text{GaAlAsSb}$ поверхности и сплавным контактом к $n^+ - \text{GaSb}$. Для проведения исследований структуры монтировались на стандартный корпус ТО-18.

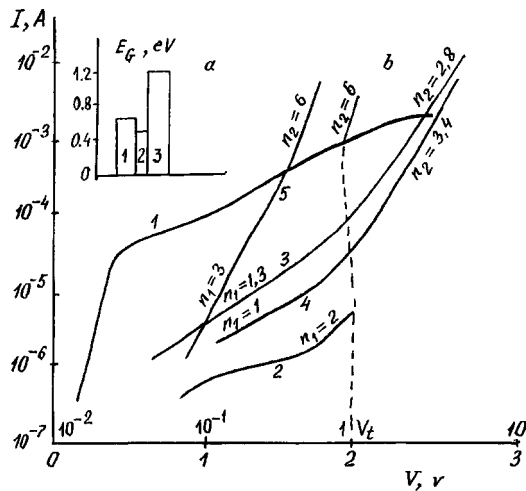


Рис. 1. *a* — зонный профиль гетероструктуры $n^+-\text{GaSb}-n^0-\text{GaInAsSb}-n^+-\text{GaAlAsSb}$. *b* — вольт-амперные характеристики (ВАХ). Структура "а": 1 — прямая ветвь $\lg I = f(V)$, $T = 300$ К; 2 — ВАХ при $T = 78$ К $\lg I = f(\lg V)$. Структура "б": 3 и 4 — прямая и обратная ветви ВАХ [$\lg I = f(\lg V)$], 5 — ВАХ при $T = 78$ К.

Были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ), фотоэдс и фототок в зависимости от прямого (— на $n^+-\text{GaSb}$) и обратного смещения, а также зависимость фототока от магнитного поля. На рис. 1, *b* представлены ВАХ, измеренные при $T = 300$ и 78 К. Характерными были два вида ВАХ при $T = 300$ К: *a*) с экспоненциальной зависимостью тока от напряжения при невысоких смещениях $I \sim \exp \frac{qV}{nkT}$ с $n = 1.7-2$ (кривая 1) и *b*) со степенной зависимостью $I = b_1 V^{n_1} + b_2 V^{n_2}$ с $n_1 = 1-1.3$ и $n_2 = 2.8-3.4$ (кривые 3, 4). Можно считать, что полученные зависимости обусловлены двойной инжекцией неравновесных носителей в n^0 -слой, причем в первом случае с преобладанием диффузионного, а во втором — дрейфового механизма токопереноса. ВАХ при 78 К подтверждает это предположение (кривые 2, 5). На кривой 2 после небольшого участка зависимости $I \sim V^2$ наблюдается срыв ВАХ, приводящий к S -образной характеристике, и далее переход к участку пробоя $I \sim V^6$. В структурах группы "б" прямая и обратная ветви

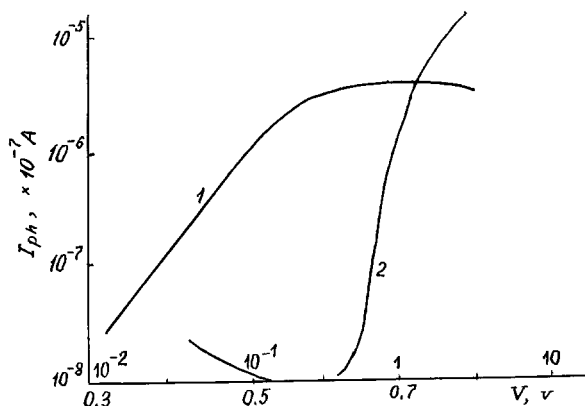


Рис. 2. Зависимость фототока от смещения. Структура "a": 1 — прямое смещение $I_{ph} = f(V)$; структура "б": 2 — обратное смещение $lg I_{ph} = f(lg V)$.

показывают два участка с $n_1 = 3$ и $n_2 = 6$. S-образная ВАХ обусловлена модуляцией времени жизни инжектированных в n^0 -слой носителей тока из-за наличия центров захвата дырок большой плотности. Условие полного заполнения уровней захвата [5] $V_t = \frac{qN_0 w^2}{\epsilon} c V_t = 1$ V при толщине n^0 -слоя $w = 4 \cdot 10^{-4}$ cm и $\epsilon = 12$ дает плотность центров $N_t = 5 \cdot 10^{14}$ cm^{-3} . Зависимость $I \sim V^{2.8-3.4}$ отражает режим диэлектрической релаксации инжектированных в n^0 -слой носителей. Отклонение от теоретической зависимости $I \sim V^3$ связано либо с уменьшением эффективной длины базы ($n_2 > 3$), либо с ее увеличением ($n_2 < 3$), что определяется степенью идеальности инжектирующих контактов [6]. Существенно, что режим диэлектрической релаксации реализуется, когда время пролета базы t_{tr} будет меньше как времени максвелловской релаксации, так и времени жизни τ_p . На рис. 2 представлены кривые зависимости фототока от прямого смещения для структуры типа "a" с экспоненциальной ВАХ и от прямого и обратного смещения для структур типа "б". Максимальный коэффициент усиления в первом случае при освещении светом с длиной волны $\lambda = 1.2$ μm составлял величину ~ 200 и убывал с увеличением λ : при $\lambda = 1.6$ μm — на 30%, при $\lambda = 1.9$ μm — на 60%. Это изменение связано с ростом фототока при нулевом смещении. Коэффициент усиления структур "б" был существенно ниже (~ 25) и не зависел от длины волны. Фототок в структурах "a" приблизительно

экспоненциально возрастает в зависимости от прямого смещения в интервале 0.3–0.6 В. В отличие от экспериментальных данных [4] в изученных структурах нет усиления при малых прямых смещениях, так же как и при обратном смещении. Мы полагаем, что экспоненциальный рост фототока $I_{ph} \sim \exp \frac{qV}{nkT}$ с $n = 2.3$ определяется двойной инжекцией в диффузионном режиме с изменяющимся с уровнем инжекции временем жизни фотоносителей. В этом случае $n = \text{ch} \frac{w}{L}$ (при $w > L$), где L — длина диффузионного смещения. При $\mu_n \sim 10^3 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$, $\frac{w}{L} = 1.5$. Модуляция времени жизни неравновесных носителей обусловлена в большей степени захватом на глубокие уровни, чем в потенциальной яме разрыва валентной зоны у гетерограницы, хотя последняя и не исключается совсем. В образцах группы "б" последний фактор практически не играет роли. Для этих образцов характерно, что при малых смещениях (рис. 2, кривая 2) фототок с ростом напряжения уменьшается и затем начинает возрастать, достигая максимальной величины в режиме диэлектрической релаксации, где $I \sim V^{2.8-3.4}$. Это связано с тем, что при большой величине N_t , вероятно большей, чем в образцах группы "а", идет интенсивный захват и рекомбинация инжектированных как темновых, так

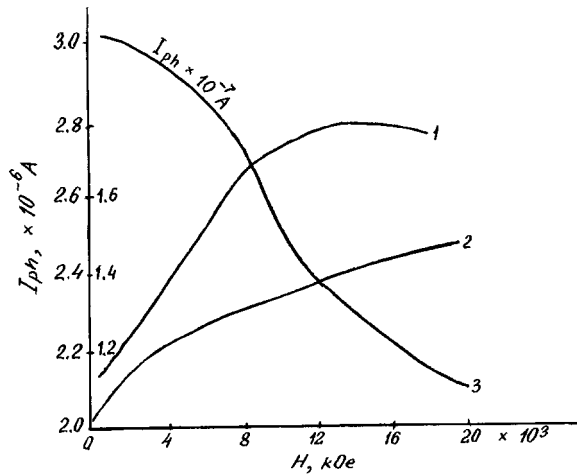


Рис. 3. Зависимость фототока от магнитного поля. Структура "а": 1 — освещение светом с $\lambda = 1.8 \mu\text{m}$, 2 — освещение светом с $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$ (правая шкала по оси координат); структура "б": 3 — освещение светом с $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$.

и световых носителей тока и время их жизни резко падает. Увеличение инжекции темновых носителей приводит к заполнению центров захвата, что снижает рекомбинацию световых носителей и увеличивает их время жизни. Это и приводит к усилению фототока за счет "пролетного" эффекта n^0 -слоя, когда коэффициент усиления определяется как $\frac{\tau}{t_{tr}}$ и $t_{tr} = \frac{w^2}{\mu_n V}$. Если принять для n^0 -слоя $\mu_n = 10^3 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$, $w = 4 \cdot 10^{-4}$ см, $V = 1$ В, то $t_{tr} = 8 \cdot 10^{-11}$ с, что дает $\tau = 2 \cdot 10^{-9}$ с. Усиление наблюдается как в прямой, так и в обратной ветви ВАХ, хотя, естественно, его величина при одном и том же смещении во втором случае ниже и достигает тех же максимальных значений при более чем вдвое высоких напряжениях.

Влияние магнитного поля на фототок (рис. 3) совершенно различно и может указывать на тип механизма усиления. Для структур с диффузионным механизмом токопереноса наблюдается рост фототока, составляющий при $H = 20$ кОе величину 40–50%, для структур с дрейфовым током — уменьшение фототока на 20%. В первом случае причину роста фототока можно связать с увеличением градиентов $\frac{dn}{dx}$ и $\frac{dp}{dx}$, так как холловское поле темновых носителей "сжимает" диффузионные потоки, препятствуя растеканию параллельно плоскости гетероструктур.

Во втором случае магнитное поле уменьшает длину диффузного смещения носителей тока электронно-дырочной плазмы в n^0 -слое вследствие дополнительного рассеяния, что увеличивает время пролета t_{tr} .

Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что в гетероструктурах $n^+ - \text{GaSb} - n^0 - \text{GaInAsSb} - n^+ - \text{GaAlAsSb}$ могут быть реализованы несколько механизмов усиления в зависимости от конкретных технологических условий изготовления.

Список литературы

- [1] Popov A.A., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P., Baranov A.N., Alibert C. // *Electron. Lett.* 1997. V. 33. N 1. P. 86.
- [2] Yakovlev Yu.P., Baranov A.N., Imenkov A.N., Popov A.A., Sherstnev V.V. // *J. de Physique IV*. 1994. V. 4. С. 4–671.
- [3] Андреев И.А., Абраилов М.А., Баранов А.Н., Данильченко В.Г., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. // *Письма в ЖТФ*. 1986. Т. 12. В. 21. С. 1311–1315.

- [4] *Андреев И.А., Баранов А.Н., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Рогачев А.А., Филаретова Г.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 5. С. 389.*
- [5] *Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. Гл. 1. С. 37.*
- [6] *Адирович Э.И., Карагеоргий–Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инъекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978, п. 3.3. С. 73, 122.*