

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ТОНКИМИ АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ

Акулова Ю. А., Яковенко А. А., Груздов В. Г., Гуламов Р. А.,
Корольков В. И., Мезрин О. А.

Изложена электролюминесцентная методика измерения квазибаллистического транспорта неосновных носителей в гетероструктурах в системе InP—InGaAsP , имеющих широкозонный n -эмиттер, узкозонную p -базу и коллектор того же типа проводимости. Определено, что при энергетическом зазоре эмиттер—коллектор ~ 0.25 эВ и базовой области толщиной 200 \AA , выполненной из $p\text{-In}_{0.57}\text{Ga}_{0.43}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ ($p \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), коллектор достигают практически все инжектированные электроны.

Введение. В резких изотипных и анизотипных гетеропереходах благодаря наличию разрывов зон на гетерогранице инжектируемые носители обладают высокой кинетической энергией (порядка величины разрыва зоны проводимости для n - N - и p - N -гетеропереходов). Реализация высоких скоростей электронов, когда их распределение становится существенно неравновесным, возможна в гетероструктурах с длиной активной области порядка длины свободного пробега горячих носителей, что позволяет создавать быстродействующие биполярные и полевые транзисторы, вертикальные фотосопротивления и т. д.

По мере развития технологии выращивания исследованию таких структур уделяется все большее внимание. При этом главным объектом исследования являются структуры на основе GaAs—AlGaAs . Думается, не меньший интерес представляют гетероструктуры системы InGaAsP—InP . Преимущество InGaAsP перед GaAs заключается не только в более высокой подвижности, но и в большем разное боковых долин относительно центральной, что приводит к снижению междолинного рассеяния.

Из-за малых времен релаксации горячих носителей прямые измерения характеристик переноса связаны с известными трудностями [1], поэтому более предпочтительны стационарные методы [2].

В данной работе описан электролюминесцентный метод определения средней длины релаксации горячих носителей, предложенный в [3].

1. *Методика измерения и экспериментальные образцы.* Методика заключается в исследовании спектров электролюминесценции (ЭЛ) диодных структур, зонная энергетическая диаграмма которых изображена на рис. 1. p -Область этих структур включает узкозонную часть (базу) толщиной d , являющуюся потенциальной ямой для электронов, коллектор толщиной d_1 и приконтактный слой, ограничивающий носители в коллекторе, причем ширина запрещенной зоны коллектора выбирается меньше, чем эмиттера. Инжектирующий p - n -переход смещен от базы в эмиттерную область на расстояние, существенно меньшее диффузионной длины неосновных носителей, например электронов, которые при инжекции из p - n -перехода приобретают направленную скорость движения за счет скачка потенциала зоны проводимости. Таким образом, неосновные носители, которые в процессе рассеяния существенно изменили импульс или энергию на величину, превышающую энергетический зазор между эмиттером и коллектором, рекомбинируют в базе, а носители, пролетевшие базу и остывшие в коллекторе, будут в нем рекомбинировать или сваливаться обратно в базу. По интенсивности полос излучения базы и коллектора можно судить

о доле квазибаллистических электронов, имеющих длину релаксации энергии, равную ширине базы или больше ее. При этом необходимо ввести поправки, учитывающие разницу во внешнем квантовом выходе излучения из базы и коллектора, а также поправку, учитывающую уход носителей из коллектора в базу. Так, связь доли тока квазибаллистических электронов, достигших коллектора (I_k), с наблюдаемой интенсивностью излучения коллектора (Φ_k) при условии рекомбинации носителей только в базе и коллекторе будет

$$\frac{I_k}{I} = \frac{\Phi_k / \Phi}{k_2 [k_1 - \Phi_k / \Phi (k_1 - 1)]} \quad (1)$$

Здесь I , Φ — ток и интенсивность излучения всей структуры, $k_1 = \eta_k / \eta_0$ учитывает разницу квантового выхода коллектора η_k и базы η_0 ; $k_2 = I_p / I_k$, где I_p — рекомбинационный ток в коллекторе структуры. Коэффициент k_2 может быть найден из решения уравнения диффузии в коллекторе с нулевыми граничными условиями для концентрации и тока, обусловленными зонной энергетической диаграммой структуры (рис. 1). При этом должен быть учтен генерационный

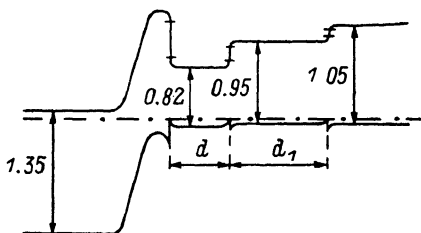


Рис. 1. Зонная энергетическая диаграмма диодной структуры в системе InP/InGaAsP.

Ширина запрещенной зоны приведена в эВ при 295 К по данным электро- и фотолюминесценции.

член, определяемый квазибаллистическими электронами, термализующимися в коллекторе. В первом приближении генерация этих электронов может быть описана экспоненциальной функцией $\alpha e^{-\alpha x}$ со значением параметра α , удовлетворяющего условию $\alpha L_n \gg 1$, где L_n — диффузионная длина электронов в коллекторе. В этом случае

$$k_2 = \frac{\alpha L_n}{1 - (\alpha L_n)^2} \left\{ \frac{2}{1 + e^{2\alpha d_1 / L_n}} + \frac{1}{\alpha L_n} - 1 \right\} \quad (2)$$

Структуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии. На n^+ -подложку InP последовательно наращивались буферный слой InP ($n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной ~ 5 мкм и слой твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, изопериодические с InP. Эпитаксиальные слои легировались Cd до концентраций: в базе — $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в коллекторе (1.5–2.5 мкм) — до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в приконтактном слое к коллектору (0.9–1 мкм) — до 10^{19} см^{-3} . Холловская подвижность дырок в базе составляла 95, в коллекторе — 63 см²/В·с (77 К) при диффузионной длине электронов порядка 2 мкм.

Из выращенных структур изготавливались планарные меза-диоды с диаметром мезы 100 мкм и контактной площадкой 80 мкм. Контактные кольца к InP-подложке имели ширину 10 мкм и диаметр 300 мкм. Излучение выводилось через InP-подложку перпендикулярно плоскости p - n -перехода. Толщина базы варьировалась от 100 до 2000 Å. При этом на образцах с толщиной базы 2000 Å полоса ЭЛ коллектора практически отсутствовала. Из-за неоднородности структуры по площади пластин наблюдался разброс характеристик диодов.

Толщина слоев определялась на растровом электронном микроскопе JXA-50A, что давало усредненное значение по сколу пластины. При выращивании структур с «тонкой» базой, в которой важны эффекты размерного квантования, в тех же условиях выращивалась пластина-аналог, имеющая практически те же спектры люминесценции. В однородной области этой пластины измерялся профиль состава твердых растворов методом [4] и по нему определялась толщина базовой области с учетом интерфейсов.

Для конкретных меза-диодов определение толщины базы при ее величине

$\geq 500 \text{ \AA}$ проводилось по расчетной зависимости тока через диод, соответствующего началу заполнения носителями базы, от ее толщины.

Значение квазиуровня Ферми принималось равным половине полуширины спектра излучения базы (16 мэВ), использовалась реальная форма ее профиля, измеренная по методике [4]. Расчет проводился для 77 К. Толщина базы определялась из экспериментальных значений токов через меза-диоды, соответствующие резкому уширению полосы ЭЛ при 77 К.

2. *Экспериментальные результаты и их обсуждение.* Проведенные исследования показали, что ЭЛ коллектора существенно зависит от толщины базы, температуры и величины протекающего тока. Изучались две группы образцов [B48 («тонкие») и B50 («толстые»)], имевших трапециевидальную форму профиля базы с размерами по «дну» 120 и 350 \AA и с интерфейсами 50 и 120 \AA соответственно.

Изученные спектры ЭЛ имеют две полосы излучения, обусловленные рекомбинацией носителей в базе (низкоэнергетическая полоса) и коллекторе

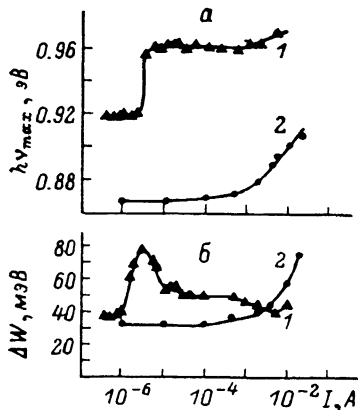


Рис. 2. Зависимость положения максимума (а) и полуширины (б) спектров электролюминесценции от тока при 77 К.

Образцы: 1 — 48№12, 2 — 50№16.

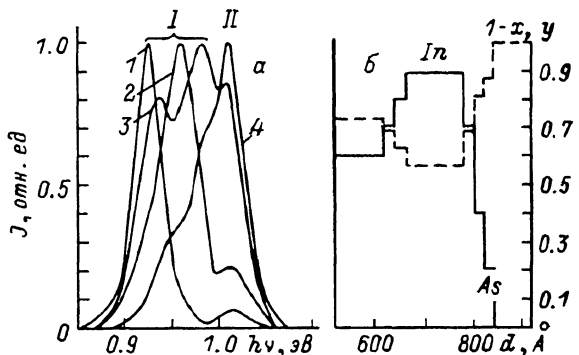


Рис. 3. Спектры электролюминесценции одной из «тонких» структур (а) при 77 К и соответствующие ей профили состава твердых растворов (б) при 295 К.

I — излучение базы, II — коллектора. I, Δ : 1 — $4 \cdot 10^{-4}$, 2 — $6 \cdot 10^{-5}$, 3 — $2 \cdot 10^{-4}$, 4 — $7 \cdot 10^{-5}$.

структуры (высокоэнергетическая полоса). Интенсивность коллекторной полосы излучения росла с уменьшением толщины базы и ростом температуры, причем более резко — у тонких образцов. Это вызвано ростом с температурой теплового выброса носителей из базы в коллектор. Термический выброс носителей из базы увеличивался с ростом тока в связи с заполнением базы инжектируемыми носителями, что особенно существенно для тонких образцов. Сказанное иллюстрируется зависимостью максимума и полуширины полосы излучения от тока, приведенной на рис. 2. Резкий рост энергии максимума излучения и увеличение полуширины (кривая I) связаны с заполнением у тонких образцов второго уровня размерного квантования электронов. В структурах с тонкой базой наблюдался разный характер этой зависимости. На рис. 3 приведены спектры ЭЛ одного из тонких образцов (а), а также профиль состава этой структуры, полученный методом [4] на пластине-аналоге. Видно, что с ростом уровня возбуждения наблюдаются смещение максимума излучения к большим значениям энергии и появление второй высокоэнергетической полосы с энергией максимума, на 45 мэВ большей энергии максимума первой полосы.

Зависимость интенсивности ЭЛ от тока для двух образцов с разной толщиной базы приведена на рис. 4. При 295 К у тонких образцов интенсивность коллекторного излучения в изученном интервале токов преобладает над излучением из базы. Причина этого уже отмечалась выше и не связана с баллистическим транспортом носителей.

На рис. 5 дана экспериментальная зависимость относительной интенсивности излучения коллектора от толщины базы с учетом интерфейсов со стороны

эмиттера и коллектора. Определенная по наклону этой зависимости эффективная длина релаксации энергии квазибаллистических электронов составила $\sim 200 \text{ \AA}$ при начальной энергии электронов 0.3 эВ ($\Delta E_c = 0.6 \Delta E_g$ [5]). Формулы (1) и (2) позволяют оценить число квазибаллистических электронов, достигающих коллектора при фиксированной толщине базы. Принимая из условия $\alpha^{-1} \ll L_n$ значения $\alpha^{-1} = 0.3$ и 0.2 мкм для тонких и толстых образцов и рассчитывая k_1 по данным работ [6, 7], получаем, что при 200 \AA практически все квазибаллистические электроны достигают коллектора, а при 700 \AA — только 10 %.

Полученная нами резкая зависимость доли квазибаллистических электронов, достигающих коллектора, от толщины базы не может быть получена при учете

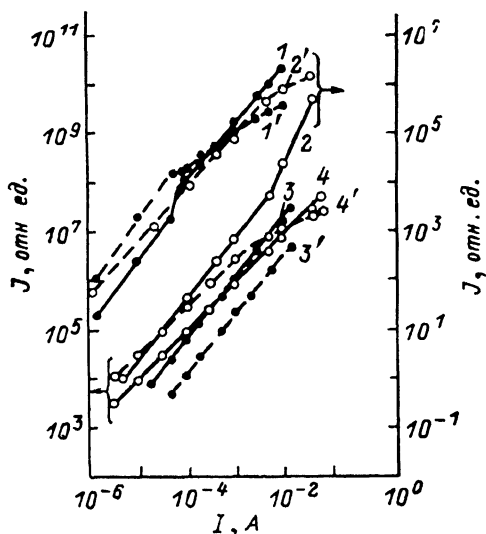


Рис. 4. Зависимость интенсивности электролюминесценции от тока для двух образцов при 77 и 295 К.

Сплошные кривые — интенсивность излучения коллектора, штриховые — базы. Образцы: 1, 1', 3, 3' — 48№1; 2, 2', 4, 4' — 50№2. Т, К: 1, 1', 2, 2' — 77; 3, 3', 4, 4' — 295. Справа приведены значения интенсивностей для кривых 1, 1', 2, 2'; слева — 3, 3', 4, 4'.

проводились методом Монте-Карло при учете рассеяния на полярных оптических фононах, ионизированных примесях, акустических фононах и сплавного рассеяния. Возможно, в нашем случае существует дополнительный, неучтенный механизм рассеяния.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность К. Ю. Погребницкому и Н. Н. Фалееву за проведенные измерения профиля состава структур, Н. М. Шмидт за помощь в изготовлении образцов, В. Б. Халфину за полезные советы и Ж. И. Алфёрову за внимание и интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] Leheny R. F., Shank J., Fork R. L., Shank C. V., Migos A. — Sol. St. Commun., 1979, v. 31, N 10, p. 809—813.
- [2] Hayes J. R., Levi A. F. J., Wiegman W. — Electron. Lett., 1986, v. 20, N 21, p. 851.
- [3] Груздов В. Г., Гуламов Р. А., Корольков В. И., Мезрин О. А., Рябов В. С., Трошков С. И., Шмидт Н. М., Яковенко А. А. — В кн.: Тез. докл. X Всес. конф. по физике полупроводников. Минск, 1985, т. 2, с. 72.
- [4] Арсеньев И. Н., Антонишкис Н. Ю., Конников С. Г., Гарбузов Д. З., Погребницкий К. Ю., Чалый В. П., Чудинов А. В., Фалеев Н. И. — В кн.: Тез. докл. IV Всес. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах. Минск, 1986, т. 2, с. 331.
- [5] Brunemeier P. E., Deppe P. G., Holonyak N. J. — Appl. Phys. Lett., 1985, v. 46, N 8, p. 755.
- [6] Гарбузов Д. З., Агаев В. В., Соколова З. Н., Халфин В. Б., Чалый В. П. — ФТП, 1984, т. 18, в. 6, с. 1069—1076.
- [7] Алфёров Ж. И., Агафонов В. Г., Гарбузов Д. З., Давидюк Н. Ю., Ларионов В. Р., Халфин В. Б. — ФТП, 1976, т. 10, в. 8, с. 1497—1506.

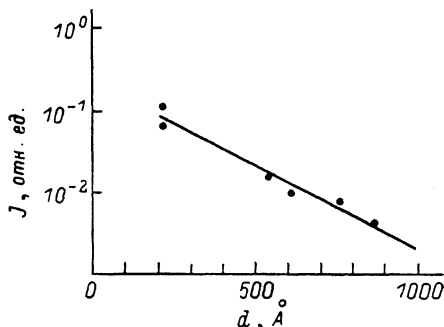


Рис. 5. Зависимость от толщины базы относительной интенсивности излучения коллектора ($T = 77 \text{ К}$).

всех основных механизмов рассеяния, существенных для твердых растворов $\text{In}_{0.57}\text{Ga}_{0.43}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ с концентрацией акцепторов $\sim 10^{17}$ при 77 К. Расчеты