

©1995 г.

МЕЖДОЛИННЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ S-ТИПА В КОРОТКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

А.М.Белянцев, Ю.Ю.Романова

Институт прикладной физики Российской академии наук,
603600, Нижний Новгород, Россия
(Получена 5 ноября 1993 г. Принята к печати 8 февраля 1995 г.)

Методом Монте-Карло исследован токоперенос в двухбарьерной гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-AlAs}$ с «катодным» барьером треугольной формы. Показано, что при низкой концентрации электронов в потенциальной яме отрицательная дифференциальная проводимость (ВАХ S-типа) обусловлена в основном междулинейными переходами.

Отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) S-типа и быстрое переключение тока наблюдались в последние годы в разнообразных многослойных и коротких гетероструктурах (ГС) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ [1-9]. Предложен и ряд теоретических моделей, объясняющих возникновение ОДП S-типа в большинстве исследуемых структур [1,3,5,8-12]. Однако S-образная вольт-амперная характеристика (ВАХ), наблюдаемая в работе [5], в короткой гетероструктуре $n^+\text{-GaAs-n-GaAs-i-AlAs-n}^+\text{-GaAs}$ с широкой слабо легированной ямой ($d_1 = 1300 \text{ \AA}$, $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и широким ($d = 1500 \text{ \AA}$) i-AlAs барьером трудно объяснима в рамках разработанных механизмов возникновения ОДП.

Авторы [5] предполагают, что в данной ГС возникновение ОДП S-типа может быть связано с переходом электронов в слое GaAs под действием сильного поля из Г-долины в X-долину. Так как для Г-электронов арсенида галлия барьер AlAs туннельно-слабо прозрачен, а для X-электронов прозрачен, с возникновением X-канала приток электронов в предбарьерную область резко сокращается, а отток вследствие туннелирования и термоэмиссии продолжается. В результате ухода части объемного заряда из предбарьерной области произойдет перераспределение напряжений между барьером и ямой. Падение напряжения на яме возрастает и это будет способствовать достижению электронами энергии X-долины на выходе из потенциал-

Параметры		GaAs	AlAs
Отношение эффективной массы к массе свободного электрона	m_{Γ}^*/m	0.067	0.15
	m_L^*/m	0.22	0.34
	m_X^*/m	0.58	0.58
Расстояние между долинами, эВ	$\epsilon_{\Gamma L}$	0.3	-0.237
	$\epsilon_{\Gamma X}$	0.48	-0.671
Константы междолинного взаимодействия, 10^9 эВ/см	$\epsilon_{\Gamma\Gamma}$	0.861	
	$\Xi_{\Gamma L}$	0.18	1
	$\Xi_{\Gamma X}$	0.5	1
	Ξ_{LX}	0.3	1
	Ξ_{XX}	1.0	1
	Ξ_{LL}	0.5	1
Энергия междолинного фонона, эВ		0.0299	
Энергия оптического фонона, эВ		0.036	

ной ямы при меньших напряжениях на всей ГС. Представляется интересным проверить правильность этой идеи о механизме возникновения ОДП S -типа и «усиление» его в структуре типа предложенной в [5] введением «катодного» барьера аналогично тому, как это сделано в [10] при высоких концентрациях электронов в яме.

Токоперенос в двухбарьерной гетероструктуре со слабо легированной ямой исследовался методом Монте-Карло (метод макрочастиц [13]) с учетом рассеяния на примесях, акустических и оптических фононах, междолинного рассеяния [14]. Так как электрон-электронные столкновения при концентрациях $n \sim 10^{15}$ см⁻³ не существенны (см., например, [15]), они при расчетах не учитывались. Основные параметры GaAs и AlAs, используемые в расчетах, соответствуют работам [16-18] и приведены в таблице. Левый контакт рассматривается как неистощимый резервуар электронов с максвелловским распределением по скоростям. Часть контактных областей (шириной 200 Å) также включена в рассмотрение. При расчетах контролировалось как распределение поля по структуре, так и количество электронов в Γ -, L - и X -долинах при фиксированных напряжениях и вклад их в ток.

Проведенные исследования подтвердили высказанные в [5] предположения. При этом выяснилось, что существенный вклад в токи верхней ветви ВАХ дают не только электроны X -долины, но Γ - и L -электроны, которые из-за увеличения падения напряжения на яме (рис. 1) смогут пролетать над барьером AlAs. Переход на нижнюю ветвь ВАХ будет происходить при меньших напряжениях и связан в основном с исчезновением потока электронов над барьером AlAs, накоплением заряда перед ним и соответствующим обратным перераспределением напряжений.

На рис. 2 показаны рассчитанные таким образом вольт-амперные характеристики как для структур с различными по высоте треуголь-

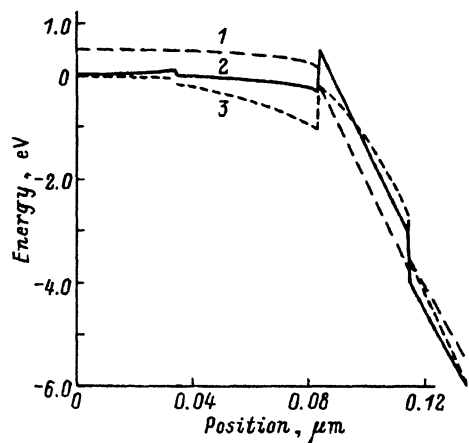


Рис. 1. Зона проводимости ГС в высокоомном (1, 2) и низкоомном состоянии (3) при напряжении на структуре 6 В. 1 — X-долина, 2, 3 — Г-долина, $\Delta_1 = 0.086$ эВ.

ными барьерами, так и для ГС с одним прямоугольным барьером (кривая 1). Влияние высоты катодного барьера на S-образность не будет столь однозначным, как для структур с сильно легированной ямой (разогревный механизм) [10-12]. Введение треугольного барьера действительно понижает напряжение «включения» тока, однако слишком высокий барьер сужает область неоднозначности. Последняя особенность связана с тем, что высокий барьер, обеспечивая влетающим электронам большую энергию и способствуя переходу на верхнюю ветвь ВАХ при меньших напряжениях, вызывает тем самым и меньшие изменения зарядов и напряжений при переходе с одной ветви на другую. Поэтому область напряжений на яме (и, соответственно, полного), обеспечивающая большой поток как X-, так и надбарьерных Г- и L-электронов, оказывается уже.

В заключение скажем несколько слов о быстродействии. В отличие от структур с разогревным механизмом [3,6,10], в которых быстродействие ограничено временем охлаждения электронного газа при «выключении» тока, для ГС с междолинным механизмом формирования ВАХ наибольшими будут времена включения тока, определяемые «рассасыванием» заряда перед барьером АІА. В рассмотренных ГС это время было порядка 200 пс. Надо заметить, что сильное перерас-

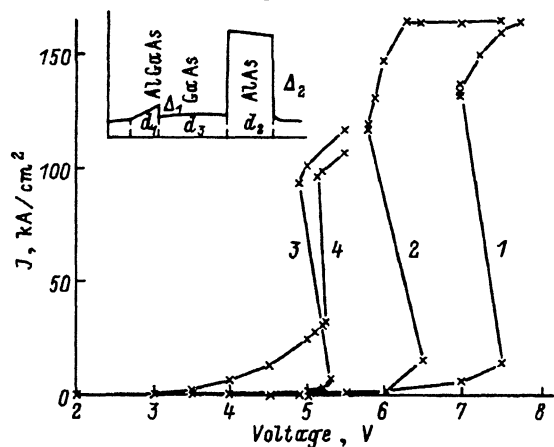


Рис. 2. ВАХ для структур с различным по высоте первым барьером Δ_1 , эВ: 1 — 0, 2 — 0.086, 3 — 0.172, 4 — 0.086. Параметры структуры: $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $n^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\Delta_2 = 0.86$ эВ, $d_1 = 200 \text{ \AA}$, $d_2 = 300 \text{ \AA}$, $d_3 = 600 \text{ \AA}$, $T_0 = 300 \text{ K}$.

пределение электронов в слое GaAs, как следствие, их высокая концентрация вблизи барьера AlAs должна привести к квантованию энергии в предбарьерной области (по оценкам $n_s \sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $E_s \sim 0.3 \text{ эВ}$ вблизи точки включения), что не было учтено на данном этапе исследований. Однако, очевидно, что такое увеличение энергии предбарьерных электронов усилит туннельный ток из этой области и тем самым может ускорить «переключение» на верхнюю ветвь ВАХ. Большое быстродействие будет также соответствовать структурам с более низким и узким вторым барьером, но это же приведет к сужению области неоднозначности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики Российской Федерации (проект № 1-030) и Международного научного фонда (проект № N0L000).

Список литературы

- [1] А.М. Белянцев, А.А. Игнатов и др. Письма ЖЭТФ, **43**, 339 (1986).
- [2] K. Hess, T.K. Higman et al. J. Appl. Phys., **60**, 3775 (1986).
- [3] Ж.И. Алферов, О.А. Мезрин и др. ФТП, **24**, 494 (1987).
- [4] J. Kolodzey, J. Laskar et al. IEEE Electron. Dev. Lett., **9**, 272 (1988).
- [5] T.K. Higman, L.M. Miller et al. Appl. Phys. Lett., **53**, 1623 (1988).
- [6] A.M. Belyantsev, A.L. Zheleznuak et al. Cryst. Struct., **19/20**, 53 (1989).
- [7] A. Kastalsky, M. Milshtein et al. Appl. Phys. Lett., **54**, 2452 (1989).
- [8] H. Goronkin, S. Tehrani, J. Shen. Superlat. Microstr., **10**, 315 (1991).
- [9] C. Song, K.P. Roenker. J. Appl. Phys., **72**, 4417 (1992).
- [10] А.М. Белянцев, Ю.Ю. Романова. ФТП, **24**, 692 (1990).
- [11] В.И. Толстихин. ФТП, **20**, 3199 (1986).
- [12] А.М. Белянцев, Ю.Ю. Романова. В кн.: *Многослойные полупроводниковые структуры и сверхрешетки* (Н. Новгород, 1990) с. 74.
- [13] Р. Хокни, Дж. Иствуд. *Численное моделирование методом частиц* (М., Мир, 1987).
- [14] W. Fawcett, A.D. Broadman, S. Swain. J. Phys. Chem. Sol., **34**, 1963 (1970).
- [15] P. Lugli, D.K. Ferry. IEEE Electron. Dev. Lett., **6**, 25 (1985).
- [16] S. Adachi. J. Appl. Phys., **58**, R1 (1985).
- [17] Р. Мицкявичус, А. Реклайтис. ФТП, **20**, 1693 (1986).
- [18] K. Kim, K. Hess. Sol. St. Electron., **31**, 877 (1988).

Редактор В.В. Чалдышев

An intervalley mechanism of forming negative differential *S*-type conductivity in short heterostructures

A.M. Belyantsev, Yu.Yu. Romanov

Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603600, Nizhny Novgorod, Russia

Monte Carlo method was applied to a study of current transport in a $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{AlAs}$ double barrier heterostructure with a triangular «cathode» barrier. It has been shown that the negative differential conductivity (*S*-shaped current voltage characteristic) under low electron density in the potential well is primarily caused by intervalley transitions.