

ОСОБЕННОСТИ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА В КОМБИНИРОВАННО ЛЕГИРОВАННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs

© Н.Б.Брандт, В.А.Кульбачинский, В.Г.Кытин, Р.А.Лунин,
В.И.Кадушкин, Е.Л.Шангина, А.де Виссер*

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* Амстердамский университет, лаборатория ван-дер-Ваальса-Зеемапа,
Нидерланды

(Получена 30 июня 1995 г. Принята к печати 24 июля 1995 г.)

Исследованы температурные и магнитополевые зависимости проводимости гетероструктур с комбинированным легированием кремнием, заключавшемся в δ -легировании GaAs с одновременным однородным легированием слоя Al_xGa_{1-x}As. Из экспериментальных данных получены концентрация и подвижность двумерных электронов в подзонах размерного квантования. Рассчитаны зонные диаграммы структур с различным расстоянием δ -слоя от гетерограницы и показана возможность сильного увеличения проводимости таких структур по сравнению с обычными.

Введение

Существует определенный научный интерес к двумерным системам с высокой плотностью двумерных носителей, в которых электронами заняты несколько подзон размерного квантования [1-3]. Строго говоря, такие системы нельзя считать чисто двумерными, поскольку, если занято более одной подзоны, то волновые функции электронов более высоких подзон не столь резко локализованы в направлении, перпендикулярном двумерному слою, как волновые функции первой подзоны. Поведение электронов в таких системах существенно более сложно по сравнению с чисто двумерными. Существует взаимодействие электронов в различных подзонах, существенным является также межподзонное рассеяние электронов, в результате чего подвижности электронов в каждой подзоне различаются. С другой стороны, существует практический интерес создания мощных транзисторов на основе гетероструктур, для чего необходимо повысить концентрацию двумерных электронов. Существуют различные методы легирования гетероструктур [4,5]. В настоящей работе нами исследованы структуры с комбинированным легированием, т.е. было выполнено δ -легирование кремнием в

слое GaAs по одну сторону гетерограницы и однофазное легирование тройного соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ по другую сторону гетерограницы. Исследовался эффект Шубникова-де-Гааза, эффект Холла и самосогласованным образом, на основе экспериментальных результатов, были рассчитаны зонные диаграммы исследованных структур.

Образцы

Схема структуры приведена на рис. 1. На полуизолирующей подложке GaAs(Cr) выращивался буферный слой $i\text{-GaAs}$ (1 мкм), затем на поверхности осаждался δ -слой кремния, который зарастивался слоем $i\text{-GaAs}$ толщиной L_δ . Далее выращивалась обычная гетероструктура — спейсер $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной $d = 4$ нм ($x = 0.36$) и $d = 5$ нм ($x = 0.25$), легированный слой $n\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ $d = 25$ нм, варизонный слой $i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $d = 9$ нм (с уменьшением x от 0.25 до 0). Структура закрывалась контактным слоем GaAs толщиной 10 нм; δ -слой кремния располагался на расстоянии $L_\delta = 20, 40, 60, 75, 100$ и 120 нм в образцах с номерами 1–6 соответственно. Все структуры выращены в едином технологическом цикле с одинаковым уровнем легирования кремнием $N = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ как в δ -слое, так и в тройном соединении, в As-стабилизированном режиме.

При отработке технологии синтеза таких структур мы исследовали режимы роста. Особое внимание было уделено росту арсенида галлия, который определяет геометрию микрорельефа границы гетероперехода (шероховатости, островки роста). Для контроля качества границы GaAs/GaAlAs использовался метод дифракции быстрых электронов на отражение. С помощью этого метода одновременно контролировалась скорость роста арсенида галлия и арсенида алюминия с высокой точностью. Основными факторами, определяющими качество получаемых структур, были температура подложки и прерывание роста GaAs. При прерывании роста GaAs закрытием заслонки источника галлия при температуре подложки 500–650°C поверхность GaAs становится более гладкой.

$n^+ - \text{GaAs}$	100 Å
$i - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} (x \rightarrow 0)$	90 Å
$n - \text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	250 Å
$i - \text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	50 Å
$i - \text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	40 Å
$\delta - \text{Si}$	L_δ ↓
$i - \text{GaAs}$	1 мкм
GaAs (Cr)	

Рис. 1. Схема исследованных структур.

На рис. 2 приведены проводимость σ (1) и холловская подвижность $\mu = R\sigma$ (2) в зависимости от расстояния дельта-слоя L_δ от гетерограницы при температуре 77 К. Отметим, что величина проводимости на квадрат в исследованных образцах при температуре жидкого азота $\sigma \simeq (5-9) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$ существенно превосходит известные аналоги: $\sigma \simeq 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}$ [6], $\sigma \simeq 3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}$ [7], $\sigma \simeq 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}$ [8].

На рис. 3 приведены зависимости сопротивления на квадрат образцов 2, 3 и 5 от температуры. Вначале наблюдается металлический ход зависимости $\sigma(T)$, при дальнейшем понижении температуры сопротивление образцов растет.

Исследование эффекта Шубникова-де-Гааза выявило сложную осцилляционную картину биений различных частот, что естественно связать с осцилляциями от различных заполненных подзон. На рис. 4, а приведены квантовые осцилляции магнитосопротивления образца 2 при $T = 4.2 \text{ К}$, а на рис. 4, б — их фурье-спектр.

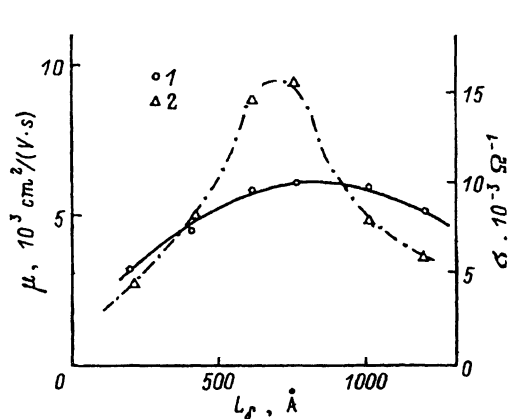


Рис. 2. Зависимости проводимости σ (1) и холловской подвижности $\mu = R\sigma$ (2) от расстояния дельта-слоя L_δ от гетерограницы при температуре 77 К.

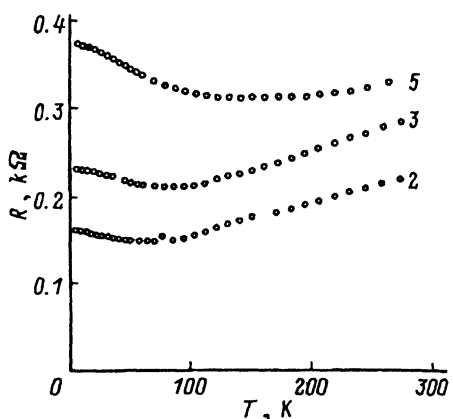


Рис. 3. Температура зависимости сопротивления на квадрат для образцов 2, 3 и 5.

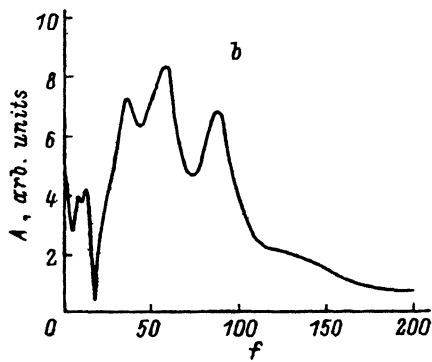
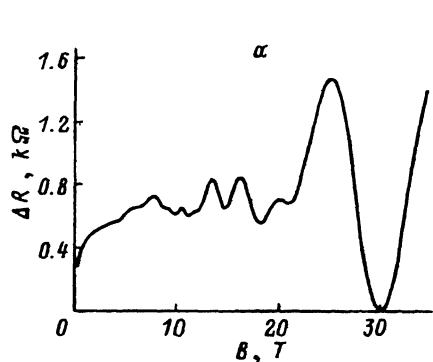


Рис. 4. Осцилляции поперечного магнитосопротивления при $T = 4.2 \text{ К}$ (а) и их фурье-спектр (б) для образца 2 при $L_\delta = 40 \text{ нм}$.

Концентрации и подвижности электронов в каждой из двумерных подзон определялись по следующей методике. Известно, что зависимость осциллирующей части магнитосопротивления ρ_{xx} от магнитного поля для i -й подзоны определяется выражением [9].

$$(\Delta\rho_{xx}/\rho_0)_i = A_i(X/\sinh X) \exp(-\pi/\mu_i B) \cos\{2\pi(E_f - E_i)/\hbar\omega_c + \pi\}, \quad (1)$$

где $E_f - E_i$ — энергетическое положение i -й подзоны относительно энергии Ферми, $X = 2\pi^2 k_B T/\hbar\omega_c$ и $\omega_c = eB/m^*$. Поскольку плотность состояний в двумерном случае равна $m^*/\pi\hbar^2$, концентрации электронов в двумерных подзонах n_i могут быть определены путем численного фурье-преобразования осциллирующей части экспериментальной зависимости $\rho_{xx}(1/B)$, так как частоты осцилляций равны $\pi\hbar n_i/e$.

Путем варьирования амплитуды A_i и подвижности μ_i теоретическая зависимость осцилляций Шубникова-де-Гааза была подогнана к экспериментальным данным методом поисковой оптимизации [10]. Подвижности и концентрации для 3-й и 4-й подзон (в образцах 2 и 3) определялись в той области слабых магнитных полей, где осцилляциями от низкоподвижных электронов можно пренебречь. В результате были определены подвижность и концентрация электронов в каждой из подзон, приведенные в таблице для образцов 2, 3 и 5.

Полученные экспериментальные величины концентраций электронов в подзонах использовались для расчета зонных диаграмм структур. Профиль зоны проводимости $E_c(z)$, энергетический спектр и волновые функции для системы связанных квантовых ям (одна образована гетеропереходом и вторая δ -легированием) в области гетероперехода были рассчитаны путем самосогласованного решения уравнений Шредингера

$$[(\hbar^2/2m^*)d^2/dz^2 + E_c]\psi_{sn}(z) = E_x\psi_{sn}(z) \quad (2)$$

и Пуассона

$$d^2 E_c(z)/dz^2 = -[N_{d(z)}^+ - N_{a(z)}^- - nz]/\epsilon\epsilon_0. \quad (3)$$

Здесь $N_{d(z)}^+$, $N_{a(z)}^-$ и $n(z)$ — концентрации ионизированных доноров, акцепторов и электронов соответственно, ϵ и ϵ_0 — диэлектрические проницаемости. Расчет производился для $T = 4.2$ К при параметре разры-

Номер подзоны	Образцы					
	2		3		5	
	n , 10^{12} см $^{-2}$	μ , м 2 /В·с	n , 10^{12} см $^{-2}$	μ , м 2 /В·с	n , 10^{12} см $^{-2}$	μ , м 2 /В·с
1	4.25	0.124	4,47	0.125	4.10	0.087
2	2.82	0.127	2.61	0.13	2.24	0.107
3	1.66	0.123	2.21	0.124	1.40	0.270
4	0.90	0.90 ¹	0.77	0.65	—	—
5	0.57	2.1	0.24	4.0	—	—

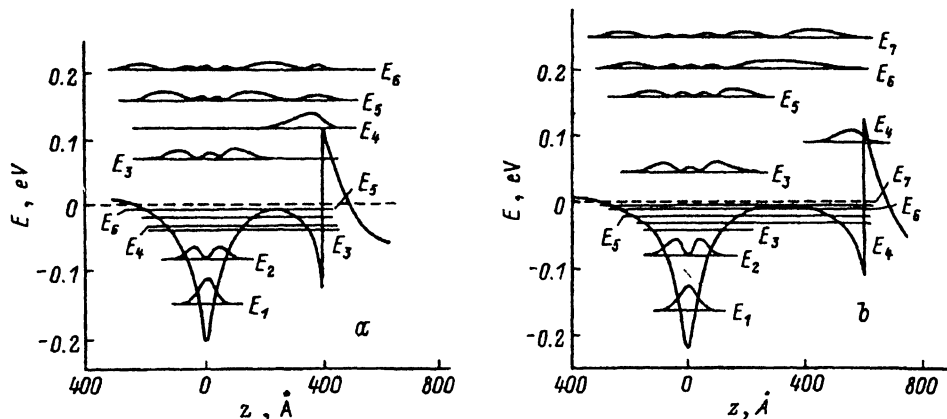


Рис. 5. Зонные диаграммы для образцов 2 (а) и 3 (б).

ва зон $\Delta E_c/\Delta E_g = 0.6$ в предположении квадратичного закона дисперсии. Концентрация доноров в области δ -слоя и тройного легированного соединения n -GaAlAs приравнивалась при расчете к сумме экспериментальных значений концентрации электронов в подзонах. Толщина распределения доноров в δ -слое принималась равной 60 \AA . Результат расчета показан на рис. 5 для гетероструктур 2 и 5. Выявлена следующая тенденция. Нижние уровни локализируются в δ -слое, и подвижности электронов на них достаточно низкие. Более высокие уровни локализируются у гетерограницы или являются общими, и подвижности электронов на них существенно больше. С увеличением расстояния δ -слоя от гетерограницы все большее число уровней локализуется в нем, где подвижность электронов меньше. Таким образом, при использованном способе легирования существует оптимальное расстояние δ -слоя в тройном соединении от гетерограницы, при котором концентрация электронов и подвижность достаточно большие.

Заключение

На основании исследования электрофизических свойств гетероструктур с комбинированным легированием были оптимизированы технологии синтеза и композиционное построение структур. Это позволило получить в проводящем канале концентрацию электронов, близкую к концентрации электронов в δ -слое, но с более высокой подвижностью. Такая структура может использоваться для мощных полевых транзисторов, работающих в сильных электрических полях. В этом случае очень важна большая концентрация электронов, а в исследованных структурах она превышает известные аналоги.

Эта работа была поддержана Международным научным фондом и Российским правительством, грант М30300.

- [1] H. van Houten, J.G. Williamson, M.E.I. Broekaart, C.T. Foxon, J.J. Harris. Phys. Rev. B, **37**, 2756 (1988).
- [2] R. Fletcher, E. Zaremba, M.D'Iorio, C.T. Foxon, J.J. Harris. Phys. Rev. B, **38**, 7866 (1968).
- [3] R.M. Kusters, F.A. Wittekamp, J. Singleton, J.A.A.J. Perenboom, G.A.C. Jones, D.A. Ritchie, J.E.F. Frost, J.-P.Andre. Phys. Rev. B, **46**, 10207 (1992).
- [4] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1985).
- [5] А.Я. Шик. ФТП, **26**, 1161 (1992).
- [6] S. Sasa, K. Kondo, H. Jshikawa, T. Fujii, S. Muto, S. Higamizu. Surf. Sci., **174**, 433 (1986).
- [7] S. Yamada, T. Makimoto. Appl. Phys. Lett., **57**, 1022 (1990).
- [8] Г.М. Гусев, З.Д. Квон, Д.И. Лубышев, В.П. Мигаль, А.Г. Погосов. ФТП, **25**, 601 (1991)
- [9] J.P. Harrang, R.J. Higgins, R.K. Goodal, P.R. Jay, M. Laviron, P. Delescluse. Phys. Rev. B, **32**, 8126 (1985).
- [10] А.С.Рыков. *Поисковая оптимизация. Методы деформируемых конфигураций*. (М., Физматлит, 1993).

Редактор Т.А. Полянская

Particular features of transport phenomenon in alternately doped GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heterostructures

*N.Brandt, V.A.Kulbachinskii, V.G.Kytin, R.A.Lunin, V.I.Kadushkin, E.L.Shamgins, A.de Visser**

M.V.Lomonosov Moscow State University, 119899 Moscow

*Amsterdam University, the Netheriands
