

Подвижность электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs/AlGaAs

© В.Г. Мокеров, Г.Б. Галиев, Ю. Пожела*, К. Пожела*, В. Юцене*

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия

* Институт физики полупроводников,
2600 Вильнюс, Литва

(Получена 19 ноября 2001 г. Принята к печати 21 ноября 2001 г.)

Экспериментально установлено осциллирующее изменение подвижности электронов с изменением толщины квантовой ямы гетероструктуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs с модулированным двухсторонним легированием. Установлено резкое падение подвижности с ростом концентрации электронов в квантовой яме. Определены условия увеличения подвижности при введении в квантовую яму тонкого барьера. Впервые экспериментально наблюдалось увеличение подвижности в 1.3 раза в квантовой яме толщиной $L = 26$ нм при введении тонкого (1–1.5 нм) барьера AlAs.

1. Введение

В квантовых ямах (КЯ) гетероструктур с модулированным легированием AlGaAs/GaAs/AlGaAs при температурах выше 77 К рассеяние электронов определяется полярными оптическими (ПО) фононами. Подавление этого рассеяния в каналах полевых транзисторов ведет к дальнейшему увеличению подвижности электронов и росту быстродействия транзисторов с модулированным легированием. Рассеяние электронов на ПО фононах является неупругим и зависит от заполнения электронных состояний. Расчеты, выполненные в работах [1,2], показали, что ПО рассеяние электронов в КЯ можно регулировать, управляя спектром и заполнением состояний в КЯ. Такое регулирование позволяет как повысить, так и понизить подвижность электронов, что изменяет и позволяет улучшать параметры быстродействия транзисторов. Во многих работах рассматривалась возможность регулирования величиной подвижности путем введения в КЯ тонкого барьера AlAs [3–5].

В настоящей работе исследованы возможности экспериментальной реализации такого регулирования в КЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs. Для этого были исследованы изменения подвижности электронов от ширины и уровня легирования КЯ, а также возможности увеличения подвижности электронов путем введения тонкого барьера AlAs в центр КЯ.

2. Структуры AlGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Образцы выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) ЦНА-24 (г. Рязань). Температура роста слоев GaAs составляла 600°C, а слоев AlGaAs — 640°C. Исследуемые образцы имели двухстороннее легирование слоев AlGaAs, так что форма КЯ в GaAs была близкой к прямоугольной. Структуры исследуемых образцов показаны на рис. 1, *a, b*.

Для определения зависимости подвижности от толщины и легирования КЯ были изготовлены две серии образцов: с относительно низким и высоким легированием ($n_s \lesssim 10^{16} \text{ м}^{-2}$, $n_s > 10^{16} \text{ м}^{-2}$) и с различной толщиной КЯ. Серия образцов с низким легированием имела толщины КЯ GaAs $L = 13, 18, 26, 30, 35$ нм (рис. 1, *a*). Серия образцов с высоким легированием (рис. 1, *b*) имела толщины $L = 13, 26, 35$ нм. Образцы этой серии изготовлялись в двух вариантах: без введенного в центр КЯ тонкого барьера AlAs и с таким барьером (рис. 1, *b*). Толщина барьера AlAs составляла 10 Å. Подвижность и концентрация электронов в КЯ определялась из измерений эффекта Холла.

Таблица 1. Подвижность и концентрация электронов в слабо легированной серии образцов (рис. 1, *a*) со структурой n -AlGaAs/GaAs/ n -AlGaAs, где квантовая яма (КЯ) GaAs имеет разные толщины

Толщина КЯ GaAs L , нм	$n_{2D}, 10^{15} \text{ м}^{-2}$		$\mu, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$n_{2D}, 10^{15} \text{ м}^{-2}$, в темноте		$\mu, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, в темноте	
	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К
13	1.9	2.2	0.4836	3.9479	2.6	1.6	0.2669	4.6022
18	3.3	1.2	0.3069	3.8051	3.1	0.99	0.2577	3.5832
26	8.6	4.4	0.2920	2.6565	9.6	3.2	0.2181	3.0774
30	5.6	4.5	0.2661	1.3323	6.8	3.5	0.1907	1.2545
35	6.1	1.7	0.2168	4.6476	6.7	1.3	0.1483	4.5885

3. Зависимость подвижности электронов от толщины квантовой ямы

В табл. 1 представлены результаты измерений подвижности и концентрации в образцах различной толщины слабо легированной серии.

На рис. 2 экспериментально измеренные подвижности электронов в зависимости от толщины КЯ приведены в сравнении с расчетными значениями подвижности при предположении доминирующего рассеяния электронов на ПО фононах.

Рассеяние электронов на ПО фононах в GaAs является неупругим [1], поэтому подвижность электронов μ будем полагать пропорциональной обратной частоте рассеяния электронов на ПО фононах, W :

$$\mu \propto \frac{1}{W}. \quad (1)$$

Это приближение позволяет оценивать изменение подвижности по относительному изменению частоты рассеяния.

Рассеяние электронов на ПО фононах, согласно модели диэлектрического континуума, описывается следующим образом. Частота переходов электронов, захваченных в КЯ, из начального состояния с моментом \mathbf{k}_i в E_{si} -подзоне в любое финальное состояние с моментом \mathbf{k}_f в E_{sf} -подзоне на ν -моду ПО фонона определяется как

$$W_{if\nu}^{\pm}(k_i, E_{si}) = \sum_{\mathbf{k}_f} \frac{4\pi m e^2}{\hbar^3} |G_{\nu}(z)|^2 F_{q\nu}^2 \times \left(N_{q\nu} + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \delta(k_f^2 - k_i^2 + \beta_{\pm}), \quad (2)$$

$$G_{\nu}(z) = \int_L \varphi_{e1}(z) \varphi_{e2}(z) \varphi_{q\nu}(z) dz. \quad (3)$$

Здесь z есть направление, перпендикулярное стенкам КЯ; L — ширина КЯ; $\varphi_{ei}(z)$ и $\varphi_{qv}(z)$ — z -компоненты волновых функций электронов и фононов соответственно; N_{qv} — число фононов в ν -моду, и

$$\beta_{\pm} = \frac{2m}{\hbar^2} (E_{sf} - E_{si} \pm \hbar\omega_{\nu}). \quad (4)$$

Знак плюс соответствует эмиссии фонона, а минус — поглощению фонона. F_{qv} — нормализованный коэффициент электрон-фононной связи.

Подвижность электронов в КЯ определяется как

$$\mu \propto \frac{e}{m} \sum_i \frac{n_i}{W_i n_s}, \quad (5)$$

где n_i и W_i — концентрация и частота рассеяния электронов в i -подзоне, n_s — полная концентрация электронов в КЯ. На рис. 2 приведены расчетные изменения

<i>a</i>	
<i>n</i> -GaAs	$d_1 \approx 80 \text{ \AA}$
<i>n</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_2 = 145 \text{ \AA}$
<i>i</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_3 = 180 \text{ \AA}$
<i>i</i> -GaAs	$L = 13; 18; 26; 30; 35 \text{ nm}$
<i>i</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_4 = 180 \text{ \AA}$
<i>n</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_5 = 145 \text{ \AA}$
<i>i</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_6 = 800 \text{ \AA}$
<i>i</i> -GaAs	$d_7 = 0.5 \text{ \mu m}$
GaAs (substrate)	

<i>b</i>	
<i>n</i> -GaAs	$d_1 \approx 80 \text{ \AA}$
<i>n</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_2 = 165 \text{ \AA}$
<i>i</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_3 = 165 \text{ \AA}$
<i>i</i> -GaAs	$L = 65; 130; 175 \text{ \AA}$
----- AlAs barrier, $d_{\text{AlAs}} \approx 10 \text{ \AA}$	
<i>i</i> -GaAs	$L = 65; 130; 175 \text{ \AA}$
<i>i</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_4 = 165 \text{ \AA}$
<i>n</i> -Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$d_5 = 165 \text{ \AA}$
<i>i</i> -GaAs	$d_6 = 0.5 \text{ \mu m}$
GaAs (substrate)	

Рис. 1. Структура образцов: *a* — слабо легированные структуры ($n_s < 10^{16} \text{ м}^{-2}$); *b* — сильно легированные структуры ($n_s > 10^{16} \text{ м}^{-2}$).

подвижности в зависимости от ширины КЯ при различных уровнях легирования структуры. Рассчитанная подвижность приведена к ее экспериментальному значению $\mu = 4.9 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $L = 35 \text{ нм}$ и $n_s = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$.

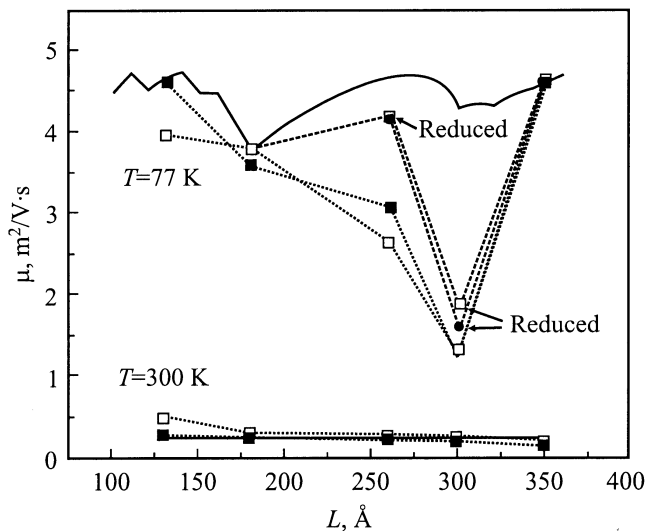


Рис. 2. Зависимости подвижности от ширины квантовой ямы. Сплошные линии — расчет. Экспериментальные значения — квадраты. Приведенные к $n_s = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ значения μ при $L = 26$ и 30 нм показаны стрелками с обозначением Reduced.

Подвижность в КЯ при $L = 35 \text{ нм}$ близка по своей величине к подвижности в объемном образце [6].

Можно видеть, что расчетные кривые имеют осциллирующий характер с двумя минимумами при $L \approx 18$ и 30 нм . В прямоугольной КЯ GaAs при $L \approx 18 \text{ нм}$ энергетический зазор между первой и второй подзонами, а при $L = 30 \text{ нм}$ — между первой и третьей подзонами — оказываются близкими к энергии ПО фонона. При этих толщинах квантовой ямы имеет место резонансное возрастание межподзонного рассеяния электронов с поглощением фононов [1,7,8], которое ответственно за формирование осциллирующего изменения подвижности электронов в КЯ. Как видно из рис. 2, экспериментальные измерения подвижности электронов в зависимости от ширины КЯ подтверждают наличие спада подвижности электронов при изменении L от 13 до 18 нм, а также при $L \approx 30 \text{ нм}$.

Экспериментально наблюдаемое дополнительное снижение подвижности в структурах с толщиной КЯ 26 и 30 нм обусловлено высокой концентрацией электронов в этих КЯ. Приведение с помощью рассчитанной зависимости подвижности от концентрации (рис. 3) экспериментальных значений подвижности к одинаковой концентрации ($n_s = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$) позволяет оценить изменение подвижности в КЯ толщиной $L = 26$ и 30 нм при этих концентрациях. С учетом этой оценки получаем осциллирующую с двумя минимумами зависимость подвижности электронов от толщины КЯ, хорошо согласующуюся с теоретической оценкой в предположении доминирующего рассеяния электронов на ПО фононах (рис. 2).

Экспериментально наблюдаемый спад подвижности при $L = 30 \text{ нм}$ заметно превышает рассчитанный, что свидетельствует о наличии дополнительного к рассеянию на ПО фононах механизма рассеяния электронов в этой структуре.

При 300 К, как показывают расчеты, должен наблюдаться один спад подвижности при $L \approx 18 \text{ нм}$, обусловленный резонансным рассеянием на ПО фононах между первой и второй подзонами [9]. Эксперимент подтверждает эту особенность в зависимости подвижности от толщины КЯ (рис. 2).

Таким образом, осцилляции подвижности электронов в зависимости от толщины КЯ, обусловленные неупругим резонансным рассеянием электронов на ПО фононах, в КЯ GaAs впервые подтверждены экспериментально. Наименьшие значения подвижностей электронов имеют место при толщинах КЯ в области 15–20 нм. Это следует иметь в виду при конструировании быстродействующих транзисторов MODFET.

4. Подвижность электронов в квантовых ямах AlGaAs/GaAs/AlGaAs при вырождении электронного газа

В табл. 2 представлены результаты измерений подвижности и концентрации электронов в сильно легированных образцах с введенным барьером AlAs и без него. Повышение уровня модулированного легирования КЯ значительно уменьшает подвижность электронов в КЯ. На рис. 3 приведены экспериментально измеренные при 77 К подвижности. Зависимости подвижности электронов от концентрации n_s для КЯ с толщинами $L = 13, 26$ и 35 нм приведены в сравнении с расчетными значениями изменения подвижности относительно величины экспериментального значения измеренной подвижности при $L = 35 \text{ нм}$ и $n_s = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, соответствующей ее значению в объемном образце. Как видим, рост рассеяния электронов на ПО фононах при вырождении электронного газа в КЯ, вследствие роста рассеяния с поглощением фонона [6], объясняет экспериментально наблюдаемый спад подвижности с ростом n_s . Однако наблюдаемый экспериментально при $n_s > 10^{16} \text{ м}^{-2}$ значительный рост подвижности с ростом ширины КЯ обусловлен не только снижением рассеяния электронов на ПО фононах, хотя вклад последнего весьма значителен. При увеличении ширины КЯ естественным является снижение рассеяния на неоднородностях и дефектах гетерограниц, которое и наблюдается в исследованных структурах (рис. 3).

Введение барьера AlAs в КЯ изменяет межподзонные энергетические зазоры, что приводит к снижению рассеяния электронов ПО фононами в нижней подзоне и соответственно к повышению подвижности электронов в КЯ. Расчетные кривые изменения подвижности от концентрации в КЯ при введении тонкого ($d \approx 10 \text{ Å}$)

Таблица 2. Подвижность и концентрация электронов в сильно легированной серии образцов (рис. 1, б) со структурой $n\text{-AlGaAs}/\text{GaAs}/n\text{-AlGaAs}$, где квантовая яма (КЯ) GaAs — с барьером AlAs и без него

Толщина КЯ GaAs L , нм	Барьер AlAs в КЯ GaAs		$n_{2D}, 10^{16} \text{ м}^{-2}$		$\mu, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$n_{2D}, 10^{16} \text{ м}^{-2}$ в темноте		$\mu, \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ в темноте	
			300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К
			13	Да	Нет	1.88	1.6	0.4578	1.3775	1.89
	Да	1.85	1.6		0.4141	1.2519	1.9	1.6	0.3854	1.1667
26	Да	Нет	1.89	1.5	0.5173	2.3250	1.96	1.4	0.4738	2.0978
		Да	2.14	1.1	0.4486	3.0363	2.1	1.1	0.4423	2.7108
35	Да	Нет	2.1	1.4	0.5845	3.3740	2.13	1.4	0.5410	3.1515
		Да	2.04	1.1	0.4746	3.7212	2.1	1.1	0.4473	3.1440

барьера AlAs показывают увеличение подвижности в КЯ толщиной 13 нм при $8 \cdot 10^{15} < n_s < 2.1 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ и в КЯ толщиной 26 нм при $2 \cdot 10^{15} < n_s < 1.7 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ (рис. 3). В широкой (35 нм) КЯ введение барьера не приводит к увеличению подвижности. Наоборот, при $n_s > 10^{16} \text{ м}^{-2}$ в КЯ толщиной 35 нм введение барьера уменьшает подвижность электронов.

Экспериментально увеличение подвижности при введении в центр КЯ барьера AlAs наблюдается при 77 К в КЯ толщиной 26 нм. В узкой КЯ толщиной 13 нм не наблюдается предсказываемое увеличение подвижности при введении барьера. Это следует связать с тем, что в узкой КЯ доминирующим рассеянием оказывается рассеяние на неоднородностях гетерограниц. В широкой (35 нм) КЯ небольшое наблюдаемое увеличение подвиж-

ности следует связывать с уменьшением концентрации электронов при введении барьера.

В КЯ толщиной 26 нм наблюдается значительное (в 1.3 раза) увеличение подвижности при введении барьера (см. табл. 2). Расчетные оценки дают рост подвижности в 1.3 раза при $n_s < 1.1 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ за счет снижения рассеяния электронов ПО фононами при введении барьера AlAs в КЯ (см. рис. 3). Поэтому экспериментально наблюдаемое повышение подвижности при введении барьера следует связывать с рассеянием в КЯ электронов ПО фононами.

5. Заключение

Таким образом, экспериментальные данные по зависимости подвижности электронов от их концентрации, ширины КЯ GaAs, а также от введения в КЯ барьера подтверждают теоретические выводы о доминирующей роли неупругого рассеяния электронов на ПО фононах, которое существенно зависит от структуры энергетического спектра и степени вырождения электронного газа.

1. Получены экспериментальные доказательства возможностей регулирования подвижности в КЯ. Показано, что подвижность в КЯ снижается в пределах 30% по сравнению с подвижностью в объеме при толщинах КЯ $L = 18$ и 30 нм, при которых имеет место резонансное межподзонное рассеяние электронов на ПО фононах. Некоторое повышение подвижности в КЯ в сравнении с объемной имеет место при толщине КЯ около 13 и 25 нм. Пульсирующая зависимость подвижности от толщины КЯ и минимумы в области резонансного рассеяния электронов ПО фононами экспериментально наблюдались впервые.

2. Показано, что подвижность электронов в КЯ резко падает при вырождении электронного газа в КЯ ($n_s > 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$). Определены условия, при которых введение в КЯ тонкого барьера позволяет увеличить подвижность электронов. Впервые экспериментально установлен факт повышения подвижности в 1.3 раза при введении в центр КЯ AlGaAs/GaAs/AlGaAs толщиной 26 нм тонкого (1–1.5 нм) барьера AlAs.

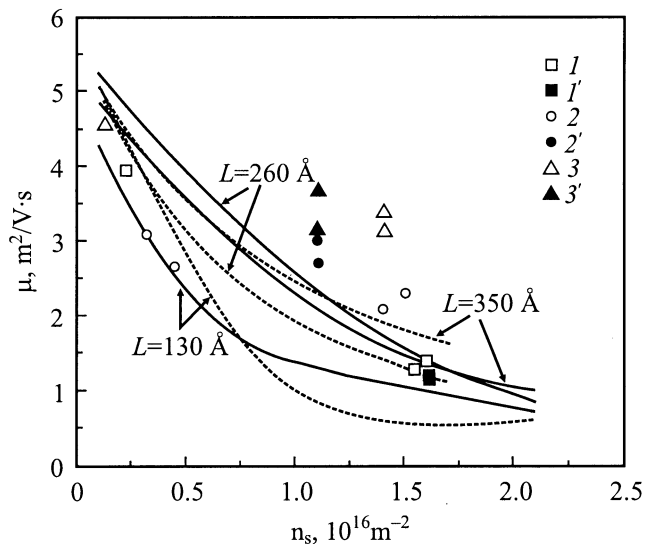


Рис. 3. Подвижность электронов при $T = 77 \text{ К}$ в квантовых ямах GaAs в зависимости от концентрации электронов n_s . Линии — расчет, точки 1–3, 1'–3' — эксперимент. Расчет для квантовых ям: с барьером AlAs ($d_{\text{AlAs}} \approx 10 \text{ Å}$) — сплошные линии; без барьера — штриховые. 1–3 — экспериментальные значения для квантовых ям без барьера, 1'–3' — с барьером. Толщины квантовых ям L , Å: 1, 1' — 130, 2, 2' — 260, 3, 3' — 350.

Работа выполнена при финансовой поддержке по межотраслевой научно-технической программе России „Физика твердотельных наноструктур“, проект № 99-2044.

Список литературы

- [1] J. Pozela, V. Jucienė, A. Namajūnas, K. Pozela. *Physica E*, **5**, 108 (1999).
- [2] I. Lee, S.M. Goodnick, M. Gulia, E. Molinary, P. Lugli. *Phys Rev. B*, **51**, 7046 (1995).
- [3] C.R. Bennet, M.A. Amato, N.A. Zakhleniuk, B.K. Ridley, M. Babiker. *J. Appl. Phys.*, **83**, 1499 (1998).
- [4] Q.X. Zhao, S. Wongmanerod, M. Willander, P.O. Holtz, E. Selvig, B.O. Fimland. *Phys. Rev. B*, **62**, 10 984 (2000).
- [5] K.W. Kim, A.R. Bhatt, M.A. Stroscio, P.J. Turley, S.W. Teitsworth. *J. Appl. Phys.*, **72**, 2282 (1992).
- [6] J. Pozela, K. Pozela, V. Jucienė. *Semiconductors*, **34**, 1011 (2000).
- [7] T. Tsuchiya, T. Ando. *Phys. Rev. B*, **47**, 7240 (1993); *Phys. Rev. B*, **48**, 4599 (1993).
- [8] W. Xu, F.M. Peeters, J.T. Devreese. *Phys. Rev. B*, **48**, 1562 (1993).
- [9] J. Pozela, V. Jucienė, A. Namajūnas, K. Pozela. *J. Appl. Phys.*, **81**, 1775 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Electron mobility in a AlGaAs/GaAs/AlGaAs quantum well

V.G. Mokerov, G.B. Galiev, J. Pozela, K. Pozela*,
V. Juciene**

Institute of Radio Engineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
103907 Moscow, Russia

* Semiconductor Physics Institute,
2600 Vilnius, Lithuania

Abstract The electron mobility oscillating has been observed alongside with the change in the thickness of the quantum well (QW) AlGaAs/GaAs/AlGaAs due to modulating double doping. A steep drop of the mobility as a function of the electron density in the QW has been found. Conditions for the mobility increase, as the thin barrier is being incorporated into the QW, have been formulated. It is 1.3 times mobility increase that has been experimentally observed for the first time throughout the incorporation of 1–1.5 nm AlAs barrier in the QW of $L = 26$ nm thickness.