

Транспорт электронов в квантовой яме $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с δ -легированным Si барьером в сильных электрических полях

© И.С. Васильевский*, Г.Б. Галиев*, Ю.А. Матвеев*, Е.А. Климов*, Ю. Пожела^{†*},
К. Пожела⁺, А. Сужделелис⁺, Ч. Пашкевич⁺, В. Юцене⁺

* Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

[†] Институт физики полупроводников,
01108 Вильнюс, Литва

(Получена 14 декабря 2009 г. Принята к печати 21 декабря 2009 г.)

Исследована электронная проводимость двумерного канала квантовой ямы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с δ -легированным Si барьером. Показано, что введение в квантовую яму тонких барьеров InAs снижает скорость рассеяния электронов на захваченных полярных оптических и поверхностных (интерфейсных) фононах и повышает подвижность электронов. Экспериментально установлено, что за насыщение тока проводимости в канале $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ в сильных электрических полях ответственны не только сублинейная зависимость дрейфовой скорости электронов от электрического поля, но и изменение концентрации электронов n_s с ростом приложенного к каналу напряжения. Эффект зависимости n_s от приложенного к каналу напряжения обусловлен наличием параллельного квантовой яме $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ слоя зарядов ионизованных доноров в области δ -легированного Si барьера $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$.

1. Введение

Гетероструктуры $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с селективным легированием благодаря высокой подвижности и максимальной дрейфовой скорости электронов в сильных электрических полях в квантовой яме (КЯ) InGaAs являются базовыми структурами для создания полевых транзисторов в области частот 10^2 ГГц. В последнее время они рассматриваются и как перспективные структуры для создания полупроводниковых генераторов и детекторов электромагнитного излучения до частот 10^3 ГГц [1,2].

Транспорт электронов в сильных электрических полях в структурах InGaAs/InAlAs исследовался многими авторами [3–13]. Показано, что дрейфовая скорость электронов в сильных полях достигает значения $5 \cdot 10^7$ см/с [3,4,6,7]. Обнаружено, что подвижность электронов в InGaAs-канале можно повышать путем введения тонких слоев (1–5 нм) InAs в КЯ InGaAs [5,6], а также путем улучшения структуры спейсерного слоя в InAlAs-барьере [9].

В то же время экспериментальные измерения показывают зависимость вольт-амперных характеристик в канале КЯ InGaAs/InAlAs от деталей технологии изготовления структур [3,5,9,14–16]. Уже в ранних работах [3,5] отмечалось, что насыщение в сильных электрических полях дрейфовой скорости электронов в КЯ InGaAs/InAlAs сопровождается изменением концентрации электронов, причем изменение различно от образца к образцу и зависит от способа его изготовления. Это явление и сегодня остается недостаточно понятным [14].

В настоящей работе теоретически и экспериментально определяются возможности повышения подвижности и максимальной дрейфовой скорости электронов

в сильных электрических полях путем регулирования электрон-фононного рассеяния электронов в канале КЯ InGaAs/InAlAs с помощью введения тонких вставок — фононных стенок InAs.

С этой целью по единой технологии изготовлена серия образцов $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ как с одиночной квантовой ямой, так и с введенными в квантовую яму одной или двумя InAs-вставками, определены скорости электрон-фононного рассеяния в этих образцах и детально измерены вольт-амперные зависимости вплоть до полей 20 кВ/см.¹ Также рассматривается возможный механизм, объясняющий эффект изменения концентрации носителей в КЯ InGaAs в сильных электрических полях.

2. Образцы

Для исследования влияния введения фононных стенок InAs на подвижность и дрейфовую скорость электронов в сильных электрических полях в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ была выращена серия образцов с различными конфигурацией КЯ и расположением в ней InAs-вставок.

В табл. 1 схематически показаны структуры, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Выращены три пары гетероструктур $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с толщиной КЯ InGaAs 16–17 нм. Два образца представляли собой однородную квантовую яму с двусторонним (образец 794) или односторонним легированием кремнием (образец 802). В остальных образцах при сохранении суммарной толщины КЯ выращивались соответствующие структуры с тонкими (12 или 35 Å)

¹ Образцы изготовлены в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН (Москва), измерения проведены в Институте физики полупроводников (Вильнюс, Литва).

[†] E-mail: pozela@pfi.lt

Таблица 1. Образцы структур

№ образца	Верхний слой	Барьер	δ -Si	Спейсер	Канал					Спейсер	δ -Si	Буферный слой	Подложка InP		
	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	$In_{0.52}Al_{0.48}As$		$In_{0.52}Al_{0.48}As$	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$					$In_{0.52}Al_{0.48}As$		$In_{0.52}Al_{0.48}As$			
794	6	17	+	4.5	17					4.5	+	0.24	400		
796	6	17	+	4.5	6.75	InAs 3.5	6.75				4.5	+	0.24	400	
802	6	30	+	6.5	16					—	—	0.24	400		
803	6	30	+	6.5	4.5	InAs 1.2	4.5	InAs 1.2	4.5			—	—	0.24	400
804	6.1	28.1	+	6	GaAs 1.1	13.8				GaAs 1.1	—	—	0.225	400	
805	6.1	28.1	+	6	GaAs 1.1	3.47	InAs 1.2	4.5	InAs 1.2	3.47	GaAs 1.1	—	—	0.225	400

Примечание. Указаны состав слоев, толщины подложки InP и буферного слоя $In_{0.52}Al_{0.48}As$ в мкм, остальных слоев в нм.

Таблица 2. Концентрация электронов n_{s0} , холловская подвижность μ_H , низкополевая подвижность μ_{exp} , ток насыщения I_{sat} , дрейфовая скорость v_{max} и пороговое поле F_C насыщения тока

№ образца	n_{s0} , 10^{12} см^{-2}	μ_H , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	μ_{exp} , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	I_{sat} , мА	v_{max} , 10^7 см/с	F_C , 10^3 В/см
794	3.49	10195	6620	69	2.47	3.73
796	2.53	12300	9400	69	3.41	3.6
802	1.31	11693	10000	28	2.67	2.67
803	1.29	11410	10000	30	2.91	2.91
804	0.98	9940	13400	31	3.95	2.95
805	1.22	8446	12810	89	3.4–5.1	~ 4.0

InAs-вставками в КЯ. В структуре 796 вводилась одна InAs-вставка в центре КЯ, а в структурах 803 и 805 вводились две InAs-вставки симметрично относительно центра КЯ. Образцы 804 и 805 содержат дополнительные вставки GaAs (1.1 нм) в InGaAs/InAlAs-переходах КЯ, введенные в структуру в качестве фоновых стенок. Толщины вставок GaAs и InAs выбраны такими, чтобы рост этих слоев сохранял двумерный характер без дефектов релаксации решетке, а влияние на электронную зонную структуру было бы небольшим.

Экспериментально определенные холловская подвижность μ_H и концентрация носителей заряда n_{s0} в структурах показаны в табл. 2.

3. Скорость рассеяния электронов полярными оптическими и интерфейсными фононами в квантовой яме $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As$ с фоновой стенкой InAs

Определим скорость рассеяния электронов полярными оптическими (ПО) и интерфейсными (ИФ) фононами

в исследуемых структурах и оценим возможности повышения подвижности электронов в КЯ $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ путем регулирования параметров локализации ПО и ИФ фононов в КЯ с помощью фоновых стенок InAs. Полагается, что тонкая InAs-вставка, прозрачная для электронов, является отражающей для оптических фононов, т. е. фоновой стенкой.

Методы расчета скорости рассеяния электронов в КЯ на локализованных ИФ и захваченных ПО фононах рассмотрены в работах [15,16].

На рис. 1 показаны вычисленные согласно [15,16] зависимости скорости электрон-фононного рассеяния в КЯ $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ без фоновых стенок для образцов с различной толщиной КЯ от энергии электронов, $W(E)$.

Скорость рассеяния на захваченных ПО фононах, W_C , почти не меняется при изменении толщины КЯ в пределах 17–28 нм, в то время как скорость рассеяния

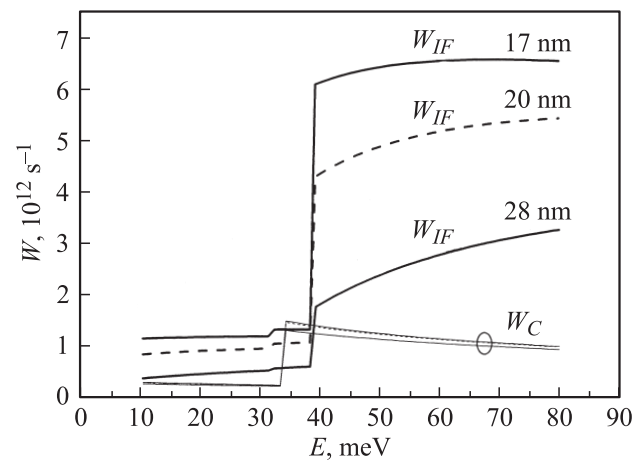


Рис. 1. Зависимость от энергии электронов (E) скорости рассеяния (W) на локализованных ИФ фононах (W_{IF}) и захваченных ПО фононах (W_C) в КЯ $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ толщиной 17, 20 и 28 нм.

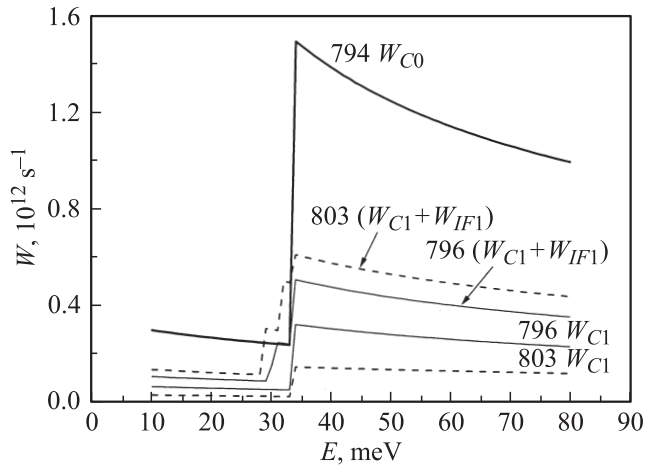


Рис. 2. Зависимость от энергии электронов (E) скорости рассеяния (W) на ИФ фононах фоновых барьеров InAs (W_{IF1}) и на захваченных между барьерами InAs ПО фононах (W_{C1}) в образцах 796 и 803. W_{C0} — скорость рассеяния на ПО фононах в образце 794 без InAs-барьера.

на ИФ фононах внешних барьеров КЯ, W_{IF} , снижается в несколько раз. Однако скорость рассеяния на ИФ фононах внешних барьеров всегда значительно превышает рассеяние на захваченных ПО фононах, W_C . Рассеяние на ИФ фононах является доминирующим рассеянием в КЯ при ширине меньше чем 30 нм.

Введение фоновых стенок InAs в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ приводит к локализации захваченных (confined) ПО фононов и ИФ фононов фоновой стенки InAs в более узких двух (образец 796) и трех (образцы 803 и 805) фоновых ямах.

На рис. 2 представлены зависимости скорости рассеяния от энергии электронов для образцов с InAs-вставками. Для сравнения на этом же рисунке представлена зависимость скорости рассеяния на ПО фононах для образца 794 без InAs-вставки (W_{C0}). Для образцов 796 и 803 отдельно показаны зависимости скорости рассеяния от энергии электронов, когда учитывается рассеяние на захваченных ПО фононах, W_{C1} , и когда дополнительно учитывается только рассеяние на ИФ фононах InAs-вставок, W_{IF1} .

Введение тонких фоновых стенок InAs уменьшает на порядок скорость рассеяния электронов на захваченных ПО фононах. Это снижение скорости рассеяния не компенсируется дополнительным рассеянием на ИФ фононах InAs-вставок, W_{IF1} . В КЯ с InAs-вставками сумма скоростей рассеяния на захваченных в фоновые ямы ПО фононах и на ИФ фононах InAs-вставок, $W_{C1} + W_{IF1}$, оказывается ниже скорости рассеяния электронов на ПО фононах в КЯ без введенных InAs-вставок, W_{C0} .

При введении одной InAs-вставки (образец 796) имеет место снижение скорости рассеяния в 2.8 раза, а при введении двух вставок (образец 803) — в 2.3 раза (рис. 2). Это означает, что введение в КЯ фоновых стенок значительно снижает скорость рассеяния и повышает подвижность электронов в КЯ.

Однако фоновая стенка InAs оказывается относительно прозрачной для ИФ фононов от внешних барьеров $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с большой энергией. Ее введение в КЯ не изменяет скорость рассеяния на ИФ фононах от внешних барьеров $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, W_{IF0} . Поэтому отношение суммарной скорости рассеяния на ПО и ИФ фононах в отсутствие InAs-вставок, $W_{C0} + W_{IF0}$, к суммарной скорости рассеяния при наличии барьеров, $W_{C1} + W_{IF1} + W_{IF0}$, оказывается равным только 1.23 в случае введения в КЯ одной InAs-вставки (796) и 1.2 в случае двух InAs-вставок (803). Соответственно низковолевая подвижность электронов $\mu \approx \frac{1}{W_C + W_{IF1} + W_{IF0}}$ при введении InAs-вставок возрастает лишь в 1.23 раза для пары образцов 794 и 796 и в 1.2 раза для пары образцов 802 и 803.

Таким образом, доминирующее над всеми другими видами рассеяние на ИФ фононах большой энергии от внешних барьеров $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ сильно ограничивает повышение подвижности электронов, получаемое при введении в КЯ вставок InAs.

Поэтому поиски возможностей увеличения подвижности в КЯ InGaAs с помощью вставок следует дополнить поисками способов регулирования скорости рассеяния на ИФ фононах внешних барьеров КЯ, которыми являются спейсерные слои InAlAs.

Возможно, что наблюдаемое в работе [9] значительное повышение подвижности электронов с повышением температуры роста спейсерного слоя AlGaAs вызвано изменением состава слоя, приводящим к снижению амплитуды (частоты) ИФ фонона и, следовательно, скорости доминирующего рассеяния электронов на ИФ фононах.

Существенное снижение скорости рассеяния на ИФ фононах от внешних барьеров КЯ можно также получить, увеличивая ширину КЯ до 28 нм (рис. 1).

4. Эксперимент

Для измерения полевой зависимости проводимости КЯ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ были изготовлены образцы, представляющие собой беззатворные мезоструктуры шириной 100 мкм с нанесенной линейкой омических контактов (Au/Ni/Ge) площадью 100×100 мкм² с различными зазорами между ними: $d = 5, 10, 50$ и 100 мкм.

Полевая зависимость проводимости канала КЯ определялась из измерений зависимости тока вдоль канала I_D от приложенного напряжения V_{SD} . Во избежание разогрева образца измерения проводились с помощью импульсов напряжения длительностью до 1.2 мкс и частотой повторения 100 Гц. Была установлена зависимость характеристик $I_D - V_{SD}$ от величины контактных сопротивлений и длины зазора между контактами. Измерения в каждом образце полной серии характеристик $I_D - V_{SD}$ с различными зазорами позволяют определить величину контактных сопротивлений и внести коррекцию в определение величины поля.

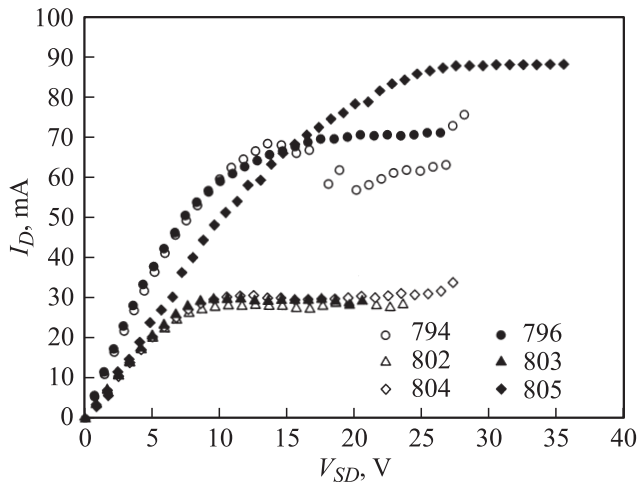


Рис. 3. Зависимость тока I_D вдоль канала КЯ от приложенного напряжения V_{SD} для трех пар образцов 794/796, 802/803, 804/805. Длина зазора между контактами $d = 50$ мкм.

Определенные из характеристик I_D-V_{SD} низкополевые подвижности электронов μ_{exp} показаны в табл. 2. В парах образцов (802, 803) и (804, 805) не отмечено заметного увеличения подвижности при введении InAs-барьеров в КЯ InGaAs. Однако в образце 796 с барьером InAs в центре КЯ подвижность оказалась в 1.4 раза выше, чем в образце 794 без барьера, что даже превышает теоретически предсказанное снижение скорости рассеяния на ПО фононах в 1.23 раза. Мы полагаем, что этот рост подвижности в образце 796 обусловлен так же относительно большой толщиной (3.5 нм) InAs-вставки и влиянием вставки на электронную подсистему, как это наблюдалось в работах [6,9].

Таким образом, экспериментально подтверждено, что захват ПО фононов в фононные ямы при введении InAs-барьера в КЯ может приводить к снижению электрон-фононного рассеяния и к повышению подвижности электронов. Однако повышение подвижности лимитирует высокая скорость рассеяния на ИФ фононах боковых барьеров КЯ.

Характеристики I_D-V_{SD} в сильных полях представляют собой сублинейные зависимости тока от напряжения с выходом тока на насыщение, совершенно различные для разных образцов (рис. 3). Если полагать, что характеристика I_D-V_{SD} определяется зависимостью от поля дрейфовой скорости $v_{\text{dr}}(F)$ в InGaAs, то приходим к парадоксальному выводу: зависимость $v_{\text{dr}}(F)$ в разных образцах существенно различна. Величины дрейфовой скорости насыщения v_{sat} в InGaAs и критического поля перехода к насыщению в КЯ InGaAs в несколько раз различаются от образца к образцу.

Поэтому наблюдаемые в наших образцах сублинейные зависимости тока от напряжения и насыщение тока вдоль КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ не могут быть объяснены только полевой зависимостью подвижности электронов, и объяснение этих явлений требует привлечения дополнительного механизма, учитывающего изменение концен-

трации электронов в канале КЯ с ростом приложенного к каналу напряжения.

Один из возможных механизмов изменения концентрации электронов в КЯ при приложении напряжения вдоль канала КЯ состоит в индуцировании заряда в КЯ при изменении напряжения между двумя параллельными каналами, которые образуют δ -легированный слой положительно заряженных доноров в InAlAs-барьере и отрицательно заряженный слой электронов — носителей тока в КЯ InGaAs.

На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости потенциала дна зоны проводимости в гетероструктурах $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с односторонним (образец 802) и двухсторонним легированием δ -Si (толщина $d_\delta = 3$ нм) InAlAs-барьера (образец 794). Хорошо видны параллельные КЯ InGaAs каналы — δ -легированные слои в InAlAs-барьерах, отделенные от КЯ спейср-барьерами толщиной 4.5–6.5 нм.

При приложении продольного (координата x) напряжения V_{SD} к двум параллельным каналам — КЯ и

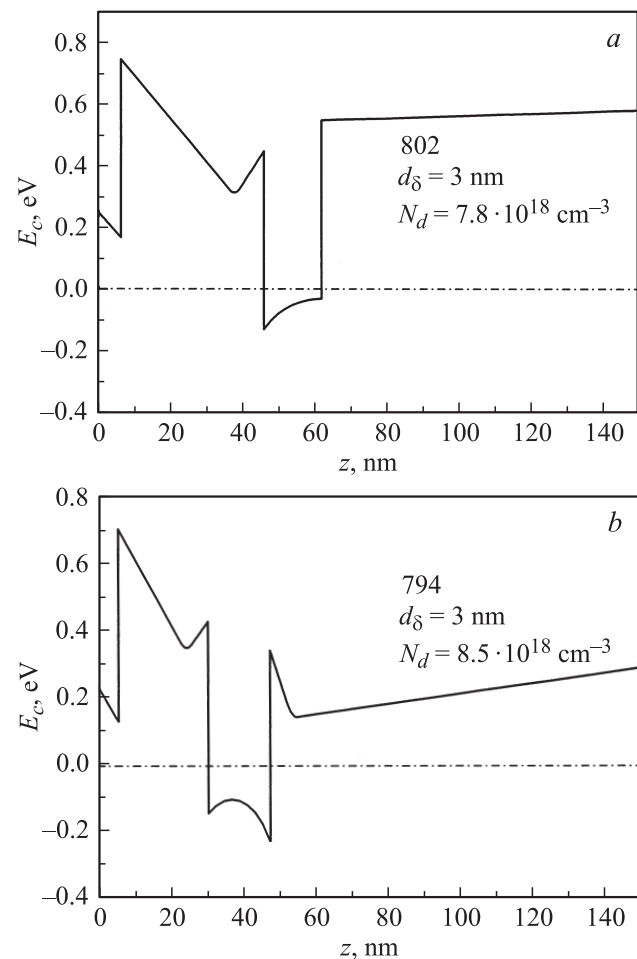


Рис. 4. Профили зоны проводимости $E_c(z)$ при 295 К гетероструктур $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$: *a* — образец 802 с односторонним легированием δ -Si; *b* — образец 794 с двухсторонним легированием δ -Si. Концентрация доноров в спейсерных слоях $N_d = 7.8 \cdot 10^{18}$ и $8.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

δ -легированному слою — поперечное КЯ напряжение V_{12} между каналами возникает за счет разности распределения по координате x продольных потенциалов в КЯ, $\varphi_1(x)$, и втором параллельном КЯ канале, $\varphi_2(x)$:

$$V_{12}(x) = \varphi_2(x) - \varphi_1(x). \quad (1)$$

Разность потенциалов $V_{12}(x)$ между каналами определяет изменение индуцированной концентрации электронов в КЯ Δn :

$$q\Delta n(x) = C_{12}V_{12}(x), \quad (2)$$

где q — заряд электрона и C_{12} — емкость между каналами, которая в рассматриваемых образцах определяется толщиной спейсерного слоя.

Относительное изменение концентрации электронов в КЯ есть

$$\frac{\Delta n(x)}{n_{s0}} = \frac{V_{12}(x)}{V_T}, \quad (3)$$

где V_T соответствует равновесной концентрации электронов: $n_{s0} = (C_{12}/q)V_T$.

Плотность тока в сечении x канала КЯ с учетом изменения концентрации электронов равна

$$j(x) = \sigma_0 \left(1 + \frac{V_{12}(x)}{V_T} \right) \frac{d\varphi_1(x)}{dx}. \quad (4)$$

Соответственно ток в КЯ InGaAs длиной d и шириной w равен

$$I_D = \frac{w}{d} \int_0^d j(x) dx. \quad (5)$$

Модель индукции электронов в КЯ при наличии параллельного δ -легированного канала позволяет объяснить значительные различия экспериментальных вольт-амперных характеристик от образца к образцу различием условий формирования разности потенциалов V_{12} между параллельными каналами.

Мы полагаем, что в наших образцах $V_{12}(x) = \varphi_2(x) - \varphi_1(x)$ формируется за счет возмущения потенциала $\varphi_1(x)$ в приконтактных областях стока, $\varphi_D(d)$, и истока, $\varphi_S(0)$. Потенциал в области истока определяет уровень обеднения канала, $\varphi_2(0) - \varphi_S(0) = V_{12} < 0$, а в области стока — уровень обогащения канала, $\varphi_2(d) - \varphi_D(d) = V_{12} > 0$. При $\varphi_D(d) > \varphi_S(0)$ в канале КЯ имеет место увеличение концентрации индуцированных электронов, а при $\varphi_D(d) < \varphi_S(0)$ канал обедняется.

Полагая для определенности в случае обеднения канала $V_{12}(x) = -\gamma\varphi_1(x)$, согласно (5), получаем

$$I_D = \frac{w\sigma_0}{d} \left(V_{SD} - \frac{\gamma}{V_T} \frac{V_{SD}^2}{2} \right). \quad (6)$$

Выражение (6) описывает сублинейную зависимость $I_D - V_{SD}$ в предположении независимости подвижности электронов μ_0 от поля. Максимальное значение тока $I_{D \max}$ мы связываем с хорошо экспериментально наблюдаемым насыщением тока, обусловленным изменением концентрации электронов в канале: $I_{\text{sat}} = I_{D \max}$.

Согласно (6), изменение концентрации электронов при $I_{D \max}$ достигает в канале $\Delta n/n = 0.5$. Соответственно дрейфовая скорость электронов при $I_{D \max}$ достигает значений $v_{\max} = I_{D \max} / (0.5wn_{s0})$. Значения дрейфовой скорости v_{\max} , рассчитанные с использованием экспериментальных значений тока насыщения I_{sat} для трех пар образцов, приведены в табл. 2. Там же приведены оценки электрического поля $F_C = v_{\max} / \mu_0$, при котором происходит насыщение тока.

Эти грубые оценки показывают очень большое изменение концентрации электронов в КЯ, приводящее, несмотря на линейную зависимость дрейфовой скорости от поля, к насыщению тока в канале проводимости гетероструктуры $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$.

Особое место в этих оценках занимает образец 805, в котором при изготовлении структуры с двумя InAs-вставками и GaAs-барьерами реализовалось условие $\varphi_D(d) > \varphi_S(0)$, а также имело место увеличение с ростом V_{SD} концентрации Δn и наблюдалось большое значение тока насыщения I_{sat} . Отметим, что в образцах 804 и 805 при близких значениях начальной концентрации n_{s0} в КЯ токи насыщения различаются в 3 раза.

Можно полагать, что за насыщение тока в случае образца 805 ответственно насыщение в поле выше 4 кВ/см дрейфовой скорости на уровне $v_{\max} \approx (3.4 - 5.1) \cdot 10^7$ см/с. Эти величины дрейфовой скорости и порогового поля показаны в табл. 2 в качестве ориентировочных значений.

Величина поля перехода к насыщению F_C в образце 794 близка к критическому значению поля (4 кВ/см), выше которого в InGaAs дифференциальная дрейфовая скорость становится отрицательной. Поэтому эффект уменьшения концентрации электронов может сопровождаться эффектом уменьшения дрейфовой скорости и приводить к образованию отрицательной проводимости и неустойчивости тока в КЯ. О такой неустойчивости тока свидетельствует экспериментально наблюдаемый срыв тока в образцах типа 794 (рис. 3). Возможно, что природа этого срыва подобна той, которая наблюдается в транзисторах с нанометровыми затворами [1,2,14,17].

5. Заключение

Введение в квантовую яму $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ шириной 17 нм тонкого фононного барьера InAs приводит к многократному снижению скорости рассеяния электронов на захваченных полярных оптических фононах. Скорость рассеяния электронов на интерфейсных фононах фононного барьера InAs не превышает снижения скорости рассеяния на захваченных продольных оптических фононах. Суммарная скорость электрон-фононного рассеяния в КЯ с барьером оказывается ниже, чем скорость рассеяния в КЯ без барьера. Однако повышение подвижности лимитирует высокая скорость рассеяния на интерфейсных фононах боковых барьеров КЯ. Рассеяние на интерфейсных фононах боковых барьеров КЯ является доминирующим рассеянием для электронов в КЯ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$.

В сильных электрических полях дрейфовая скорость электронов в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ не насыщается вплоть до полей 4 кВ/см и достигает $(4-5) \cdot 10^7$ см/с. Однако ток вдоль канала КЯ насыщается уже в полях 2.5–4 кВ/см вследствие эффекта изменения концентрации электронов.

Эффект изменения концентрации электронов объясняется наличием параллельных каналов проводимости в гетероструктуре и возникновением поперечной КЯ разности потенциалов между каналами в сильном продольном электрическом поле. Эффект возрастания концентрации электронов в слабых электрических полях приводит к тому, что ток насыщения в канале КЯ превышает свое равновесное максимальное значение, соответствующее максимальной дрейфовой скорости электронов.

Работа выполнена при поддержке программы президента РАН № 27.П, гранта президента РФ для поддержки молодых ученых МК-138.2008.2.

Список литературы

- [1] W.J. Stillman, M.S. Shur. *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, **2**, 209 (2007).
- [2] N. Dyakonova, A. E1 Fatimy, J. Lusakowski, W. Кнар. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 141 906 (2006).
- [3] W.P. Hong, P.K. Bhattacharya. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-34**, 1491 (1987).
- [4] K.S. Yoon, G.B. Stringfellow, R.J. Huber. *J. Appl. Phys.*, **63**, 1126 (1988).
- [5] D. Xu, H.G. Heiß, S.A. Kraus, M. Sexl, G. Böhm, G. Tränkle, G. Weimann, G. Abstreiter. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **45**, 21 (1998).
- [6] T. Akazaki, K. Arai, T. Enoki, Y. Ishii. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **13**, 325 (1992).
- [7] T. Sadi, R. Kelsall, N. Pilgrim. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **53**, 1768 (2006).
- [8] V.A. Kulbachinskii, I.S. Vasil'evskii, R.A. Lunin, G. Galistu, A. de Visser, G.B. Galiev, S.S. Shirokov, V.G. Mokerov. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 222 (2007).
- [9] Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, А.А. Черечукин. *ФТП*, **40**, 1479 (2006).
- [10] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42**, 1102 (2008).
- [11] I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev, V.G. Mokerov, V.A. Kulbachinskii, R.A. Lunin, G. Galistu, A. de Visser. *Proc. 15th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (Novosibirsk, 2007) p. 321.
- [12] В.Г. Мокеров, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю. Пожела, К. Пожела, А. Сужеделис, В. Юцене, Ч. Пашкевич. *ФТП*, **43**, 478 (2009).
- [13] Ю.К. Пожела, В.Г. Мокеров. *ФТП*, **40**, 362 (2006).
- [14] М.Л. Орлов, Л.К. Орлов. *ФТП*, **43**, 679 (2009).
- [15] Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене, А. Сужеделис, А.С. Школьник, С.С. Михрин, В.С. Михрин. *ФТП*, **43**, 1634 (2009).
- [16] J. Požela, K. Požela, A. Shkolnik, A. Sužiedėlis, V. Jucienė, S. Mikhrin, V. Mikhrin. *Phys. Status Solidi C*, **6**, 2713 (2009).

- [17] W. Knap, J. Lusakowski, T. Parenty, S. Bollaert, A. Cappy, V.V. Popov, M.S. Shur. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 2331 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron transport in an $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum well with a δ -Si doped barrier in high electric fields

I.S. Vasil'evskii*, G.B. Galiev*, Yu.A. Matveev*, E.A. Klimov*, J. Požela^{+,*}, K. Požela⁺, A. Sužiedėlis⁺, Č. Paškevič⁺, V. Jucienė⁺

* Institute of Microwave Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, 117105 Moscow, Russia

⁺ Semiconductor Physics Institute, LT-01108 Vilnius, Lithuania

Abstract The electron conduction in a two-dimensional channel of the $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ quantum well with a δ -Si doped barrier is studied. It is found that the insertion of thin InAs barriers into the quantum well decreases the scattering rate of electrons by localized in the quantum well polar optical and interface phonons and enhances electron mobility. It is experimentally established that saturation of the conduction current in the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ channel in high electric fields is determined not only by the sublinear field dependence of the drift velocity, but also by the decrease of the concentration of charge carriers, n_s , as the voltage applied to the channel increases. It is shown that the dependence of n_s on the applied voltage is due to the additional conduction channel parallel to the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ quantum well, in the region of δ -Si doped $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ barrier.