

Увеличение подвижности электронов в НЕМТ гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs

© А.Н. Виниченко[¶], В.П. Гладков, Н.И. Каргин, М.Н. Стриханов, И.С. Васильевский

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

(Получена 29 мая 2014 г. Принята к печати 9 июня 2014 г.)

Теоретически и экспериментально показано влияние гибридизации квантовых состояний на электронный транспорт в δ -легированной через спейсер двухбарьерной квантовой яме в пределе сильного легирования. Предложен способ увеличения подвижности электронов в квантовой яме за счет подавления туннельной связи с областью доноров за счет введения наноразмерного барьера AlAs в спейсер. Экспериментально показано, что в образцах с неглубокой КЯ введенный в спейсер нанобарьер AlAs приводит к более чем 3-кратному увеличению подвижности электронов при низких температурах.

1. Введение

Гетероструктуры с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе арсенидов III группы имеют высокую дрейфовую скорость электронов и одновременно, большую концентрацию двумерного электронного газа. Важной задачей в транзисторных НЕМТ гетероструктурах является сохранение высокой подвижности при увеличении концентрации электронов. При модулированном или δ -легировании через спейсеры с ростом концентрации доноров возрастает рассеяние электронов на удаленных ионах примеси. Однако при значительном увеличении концентрации доноров некоторая часть электронов движется уже в области легированного широкозонного барьера. Принято считать, что в этом случае наступает параллельная проводимость по двум слоям: с высокой подвижностью электронов в квантовой яме и с низкой — в легированном барьерном слое, где рассеяние электронов на примесях является прямым. Данное явление широко обсуждалось для классических НЕМТ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ гетероструктур [1–3] с достаточно толстым спейсерным слоем и невысокой концентрацией электронов $2 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, когда параллельные проводящие каналы можно считать независимыми. В транзисторных гетероструктурах с высокой концентрацией электронов $(1.5 - 3) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ спейсер более тонкий, обычно толщиной от 2 до 6 нм, несмотря на это, явление параллельной проводимости также наблюдалось, например, в работе [4]. В данной работе проведена экстракция значений подвижности электронов в двух проводящих каналах без учета их взаимодействия. Однако столь малое расстояние между двумя областями локализации электронов открывает вопрос о необходимости квантово-механического описания их взаимного влияния для корректного рассмотрения явления.

Рассеяние на ионизированных примесях является одним из определяющих механизмов для транзисторных гетероструктур наряду с фононным рассеянием и влияет на частотные и шумовые характеристики приборов. Наличие параллельного проводящего канала приводит

к нелинейностям затворных характеристик транзистора [5]. Простой способ устранения параллельной проводимости за счет увеличения высоты широкозонного барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с ростом содержания AlAs ограничен несколькими факторами. Во-первых, в барьере с высокой мольной долей алюминия (x) часть электронов захватываются на ловушки — DX-центры в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{Si}$ [6]. Во-вторых, с ростом x увеличивается сопротивление доступа к двумерному электронному газу от омических контактов, что в транзисторе означает увеличение сопротивления истока и стока и снижение предельной внешней частоты генерации f_{max} . Таким образом, актуален поиск путей по устранению параллельной проводимости без использования толстых однородных барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с повышенным содержанием AlAs.

В данной работе явление „параллельной проводимости“ рассматривается в рамках квантово-механического подхода. Разобраны особенности электронного транспорта в гетероструктурах с высокой концентрацией электронов и спейсером средней толщины (5–20 нм). Показано, что для таких структур более корректным является описание явлений переноса в формализме двух подзон размерного квантования, а не двух пространственно-независимых каналов проводимости. Учет туннельной связи состояний в КЯ и в потенциальной яме ионизированных доноров ведет к существенному изменению подвижностей электронов одновременно в двух подзонах. Предложен способ изменения условий рассеяния электронов в КЯ при введении в спейсерную область нанобарьеров AlAs, подавляющих гибридизацию состояний в областях квантовой ямы и потенциальной ямы ионизированных доноров.

2. Моделирование зонного профиля

Для анализа эффекта многоподзонной проводимости проведены два типа расчетов квантовых ям различной конструкции с двусторонним δ -легированием кремнием через спейсерные слои. Во-первых, рассчитывалась зонная структура, профиль потенциала, энергии подзон и профили волновых функций электронов, для чего

[¶] E-mail: vanaxel@gmail.com

численно решалась одномерная система самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона. Во-вторых, по полученным данным рассчитывались скорости рассеяния и подвижности электронов в двух заполненных подзонах при рассеянии на ионах примеси с учетом взаимного расположения примеси и электронов, в борновском приближении с учетом экранировки флуктуирующего кулоновского потенциала, аналогично работе [7].

Для моделирования выбрана базовая структура с неглубокой двухбарьерной КЯ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0.11$ и двусторонним легированием кремнием через спейсеры одинаковой толщины. Для получения в КЯ концентрации электронов $\geq 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ концентрация доноров в верхнем δ -слое (ближний к поверхности) составила $1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а в нижнем $7.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Такое соотношение легирования обеспечивало то, что энергия зоны проводимости в окрестности верхнего δ -слоя была заметно ниже, чем в окрестности нижнего. В этом случае параллельная проводимость наступала только для области вблизи верхнего δ -слоя.

В качестве основного параметра задачи выбрана толщина спейсерного слоя, а концентрация легирования не варьировалась. В работе [8] отмечалось, что параллельная проводимость наступает при увеличении толщины спейсерного слоя при неизменной концентрации доноров. Отметим, что подобный эффект может проявляться и по мере увеличения концентрации легирования при постоянной толщине спейсера, что наблюдалось нами ранее в двусторонне легированных РНЕМТ гетероструктурах [9].

Моделирование проведено для двух типов гетероструктур: первая имела однородный верхний спейсер, вторая — с нановставкой AlAs в спейсер. Расчеты проведены в диапазоне толщины спейсеров $d_s = 2-18 \text{ нм}$. На рис. 1 представлены рассчитанные зонные профили и волновые функции электронов двух нижних подзон размерного квантования для структуры с однородным спейсером (а) и для структуры с нанобарьером AlAs в спейсере (b) для промежуточного значения $d_s = 8 \text{ нм}$. За нуль энергии принято положение уровня Ферми.

2.1. Структура с однородным спейсером

В структуре с однородным спейсером по мере увеличения d_s наблюдается понижение энергии дна зоны проводимости в области ионизированных доноров. При сильном легировании в системе оказываются заполнены две подзоны размерного квантования. Потенциальный профиль системы представляет собой систему из двух близко расположенных потенциальных ям: V-образной ямы, возникающей в окрестности δ -слоя доноров, и гетероструктурной квантовой ямы GaAs (далее — ПЯ и КЯ соответственно). Волновые функции описывают состояния в единой квантовой системе. В структуре с однородным спейсером, как видно из рис. 1, при снижении энергии зоны проводимости в области ПЯ профили волновых функций имеют заметные амплитуды в обеих

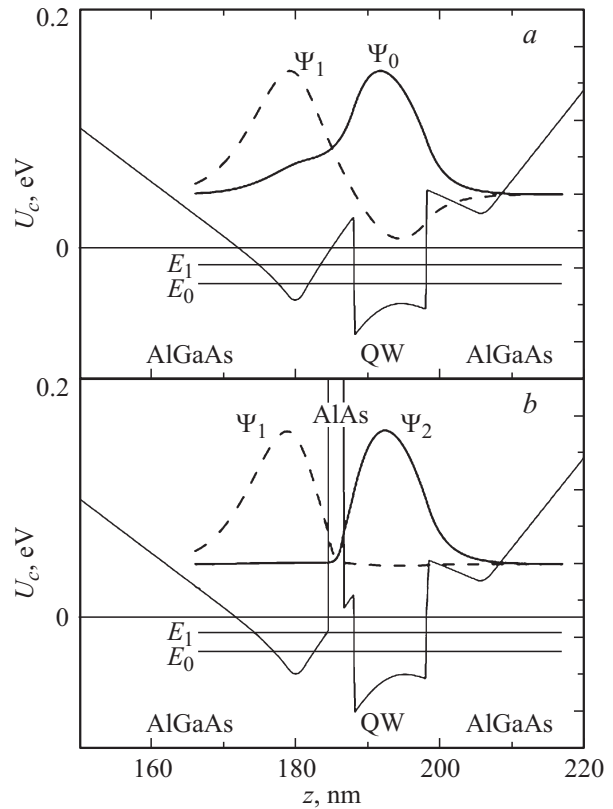


Рис. 1. Профили зоны проводимости и электронные волновые функции в системе „КЯ с двусторонним δ -легированием через спейсер“ с однородным спейсером (а) и с нанобарьером AlAs в спейсере (b).

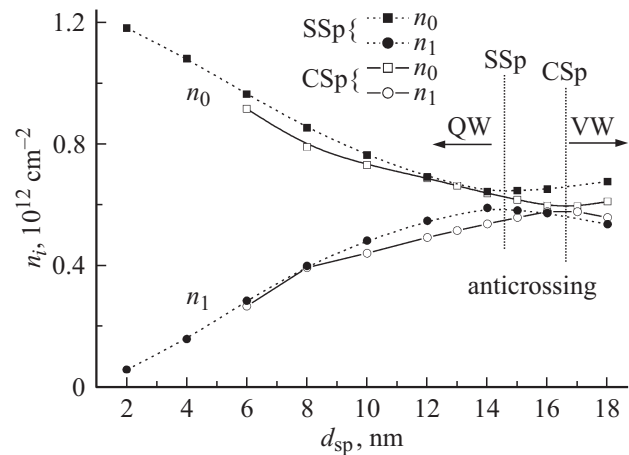


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов в подзонах от толщины спейсера d_{sp} для структур с однородным спейсером (SSp) и составным спейсером, содержащим барьер AlAs (CSp). Справа от точки антикроссинга (отмечена пунктирной вертикальной линией) области локализации состояний меняются местами.

областях, таким образом, ПЯ и КЯ имеют сильную туннельную связь. Состояния электронов в ПЯ и КЯ смешиваются. Это явление представляет собой аналог $s-p$ -гибридизации состояний в твердотельном представ-

лении. При этом неверно было бы разделять движение электронов в двух подзонах на их движение в слоях КЯ и ПЯ, поскольку, вероятно, электроны пребывают в обеих областях и испытывают рассеяние на ионах примеси. На рис. 2 представлена зависимость концентрации электронов двух нижних подзон размерного квантования от толщины спейсерных слоев d_s .

При тонком спейсере электронами заполнена одна подзона, расположенная в КЯ (n_0). С увеличением d_s концентрация электронов в КЯ n_0 уменьшается, а в верхней подзоне n_1 возрастает. Волновая функция (ВФ) Ψ_1 электронов верхней подзоны расположена в КЯ и ПЯ. Начало гибридизации верхней подзоны проявляется с $d_s \approx 5$ нм, при этом максимум амплитуды ВФ Ψ_1 располагается в окрестности δ -слоя. Далее уровни энергии подзон размерного квантования сближаются, амплитуды ВФ Ψ_0 и Ψ_1 в смежных областях возрастают. Наибольшая гибридизация состояний наблюдается при минимальном расщеплении уровней подзон при $d_s \approx 14$ нм, при этом амплитуды ВФ в каждой из ям сравнимы по модулю. При дальнейшем увеличении d_s происходит антикроссинг состояний — уровни вновь расходятся, и нижней подзоне с номером 0 соответствует уже состояние с преимущественной локализацией в ПЯ δ -слоя. Вблизи точки антикроссинга возникает наибольшее взаимодействие ПЯ и КЯ, а концентрации в подзонах максимально близки.

Важно отметить, что при увеличении d_s не только возрастает заполнение ПЯ, но и возрастает амплитуда „хвоста“ ВФ Ψ_0 основного состояния КЯ-типа. Это должно приводить к негативному эффекту — усилению рассеяния электронов на ионизированных примесях для нижней подзоны и падению подвижности, несмотря на увеличение толщины спейсера.

Поскольку туннельная связь подвержена сильному влиянию барьерных слоев, в настоящей работе предложено для подавления квантового характера параллельной проводимости использовать высокий потенциальный барьер AlAs наноразмерной толщины (2 нм), введенный в спейсер для устранения туннельного просачивания ВФ в смежную область.

2.2. Структура с составным спейсером

Эффект введения наноразмерного барьера AlAs в спейсер, когда в роли барьера выступает составной спейсер из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слоев, приводит к сильному качественному изменению профилей волновых функций электронов в рассматриваемой квантовой системе. Гибридизация состояний разрушается потенциальным барьером AlAs даже при весьма малой его толщине ~ 2 нм. Влияние барьера на зонную структуру рассматривалось и ранее в работах [10,11]. В случае рассматриваемой структуры расчет показывает, что амплитуды ВФ оказываются локализованы преимущественно в различных пространственных областях. Основное состояние локализуется в КЯ, а подзона с номером 1 — в ПЯ (см. рис. 1, b). При этом пространственное распреде-

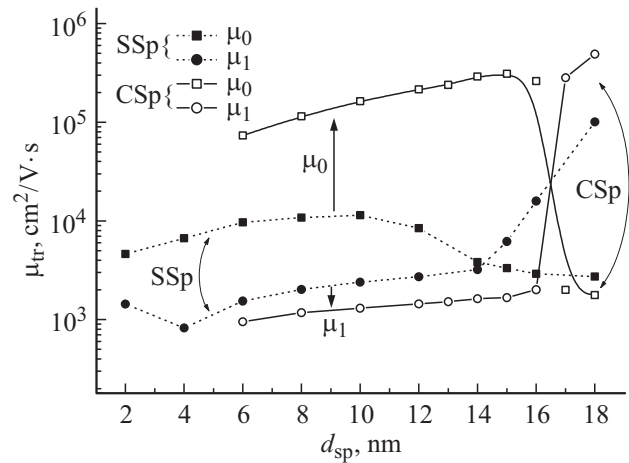


Рис. 3. Зависимость транспортной подвижности электронов в двух нижних подзонах от толщины спейсерного слоя. SSp — однородный спейсер, CSp — составной спейсер с нанобарьером AlAs

ление электронной плотности и концентрации электронов в подзонах размерного квантования изменяются не очень сильно (на 3–8%, в зависимости от d_s). Таким образом, эффект от введения нанобарьера AlAs связан не с перераспределением концентрации электронов в пространстве, а с разрушением гибридизации состояний и снижением туннельной связи областей, т.е. является чисто квантовым.

Для оценки влияния отмеченных особенностей на подвижности в структурах как с однородным, так и с составным спейсером были проведены расчеты скоростей рассеяния и подвижностей электронов в двух подзонах размерного квантования в зависимости от толщины спейсера. В расчете учитывалось межподзонное рассеяние электронов в приближении двух заполненных подзон.

2.3. Расчет подвижности электронов в подзонах и проводимости системы

Расчет рассеяния электронов на ионизированных примесях с учетом реальных профилей зоны проводимости и волновых функций электронов показывает ожидаемый немонокотный характер зависимости подвижности от толщины d_s для структур с однородным спейсером. На рис. 3 представлены зависимости подвижности электронов в двух заполненных подзонах размерного квантования от толщины спейсера для обоих типов образцов. В образце с однородным спейсером при малых d_s высокую подвижность электронов имеет нижняя подзона, электроны которой преимущественно локализованы в КЯ. В диапазоне увеличения толщины спейсера от 2 до 9 нм подвижность увеличивается, однако уже начиная с $d_s = 6$ нм наблюдается замедление прироста подвижности. При $d_s \approx 9$ нм прирост подвижности сменяется спадом. Важно отметить, что без учета изменения концентрации электронов и формы волновой функции про-

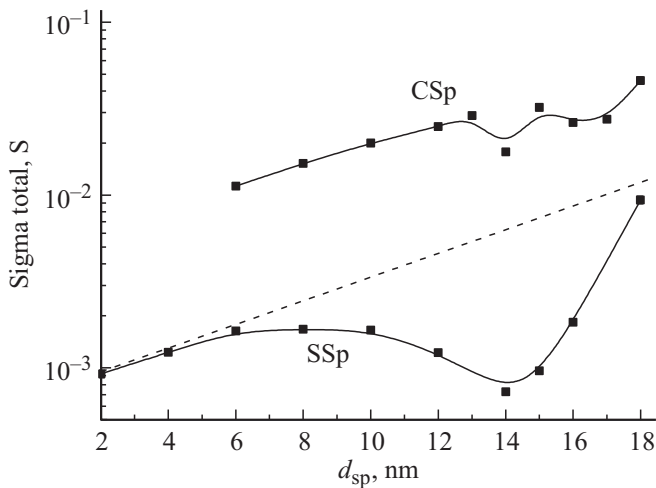


Рис. 4. Зависимость полной проводимости системы от толщины спейсерного слоя. Пунктиром показана асимптотика без учета гибридной формы ВФ и изменения концентрации электронов в подзонах.

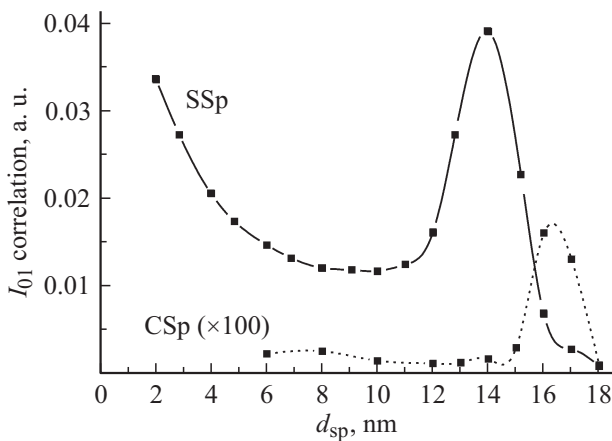


Рис. 5. Пространственно-корреляционная функция состояний двух нижних подзон размерного квантования в зависимости от толщины спейсерного слоя в структуре с однородным спейсером (SSp) и спейсером, содержащим нанобарьер AlAs (CSp).

проводимость системы должна экспоненциально возрастать с увеличением толщины d_s (пунктир на рис. 4). Отклонение от этой асимптотики в сторону снижения подвижности связано именно с самосогласованным характером системы и изменениями в зонной структуре и гибридизацией ВФ Ψ_0 . Как видно, максимум подвижности в основном состоянии проявляется задолго до точки антикроссинга состояний. Для верхней заполненной подзоны Ψ_1 подвижность электронов имеет обратную тенденцию при увеличении d_s . При подходе к точке антикроссинга уровней подвижности электронов μ_0 и μ_1 максимально сближаются, и происходит кроссинг подвижностей. При максимальной гибридизации пространственное распределение электронной плотности максимально близко для двух подзон, и сходные условия рассеяния вызывают равенство подвижностей в подзонах.

Добавление барьера AlAs в спейсер заметно изменяет поведение подвижностей μ_0 и μ_1 . В диапазоне $d_s = 6-12$ нм для основного состояния Ψ_0 расчет показывает значительный прирост подвижности (от 5 до 45 раз) в структуре с составным спейсером. При наибольшей гибридизации ВФ Ψ_0 и Ψ_1 наблюдается также наибольшее сближение подвижностей электронов. При таком спейсере введение барьера AlAs приводит к максимальному увеличению подвижности электронов.

Зависимость холловской подвижности электронов от толщины спейсера также имеет немонотонный характер. Для усреднения использовались стандартные формулы, как в работе [12]. Поскольку усреднение затрагивает проводимость по двум подзонам с различными подвижностями электронов, то с усилением гибридизации холловская подвижность μ_H уменьшается сильнее, чем подвижность электронов в нижней подзоне μ_0 . Сходную немонотонную зависимость имеет и полная проводимость, рассчитанная с учетом самосогласования. Таким образом, наблюдается парадоксальное падение подвижности электронов, а также полной проводимости системы, несмотря на увеличение толщины спейсерного слоя.

3. Экспериментальные образцы и обсуждение результатов

Для экспериментального подтверждения рассматриваемых особенностей электронного транспорта в сильно легированных гетероструктурах были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии две пары образцов с двусторонним δ -легированием кремнием через спейсер. В каждой паре образцов имелся образец с однородным составом спейсеров и образец с составным спейсером, в котором в окрестности δ -слоя доноров были выращены один или два нанобарьера AlAs. Первая пара образцов имела неглубокую квантовую яму $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ (№ 50 и 51). Вторая пара образцов с более глубокой псевдоморфной квантовой ямой $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}/\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}/\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}$ (№ 125 и 126). Образцы 50 и 125 имели однородные спейсерные и барьерные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Для роста образцов была выбрана промежуточная толщина спейсера $d_s = 8$ нм, при которой, согласно расчету, начинается гибридизация волновых функций и вторая по счету подзона заполнена электронами. В образцах 51 и 126 в окрестности δ -слоев были выращены нанобарьеры AlAs таким образом, что суммарная толщина спейсеров сохранялась. Как показало моделирование, нижний δ -слой (со стороны подложки) имеет энергию выше уровня Ферми, поэтому барьер в нижний спейсер не вводился. В образце 51 нанобарьер AlAs толщиной 2 нм был выращен только в спейсере со стороны поверхности. В образцах 125 и 126 с более сильным легированием зона проводимости в окрестности обоих δ -слоев имела достаточно низкую энергию, поэтому в образце 126

Электронные транспортные свойства образцов

№	Тип легирования	Тип образца	Мольная доля (y) InAs	μ_e , $\text{cm}^2(\text{V} \cdot \text{c})^{-1}$		n_s , 10^{12}cm^{-2}	
				300 К	77 К	300 К	77 К
50	1δ	Стандартный	0	3100	6380	1.25	1.10
51		+ 1 барьер AlAs	0	5600	22000	1.04	0.95
125	2δ	Стандартный	0.17	5320	12050	2.30	2.27
126		+ 2 барьера AlAs	0.17	5890	15200	2.40	2.36

выращены 4 нанобарьера AlAs по обе стороны каждого из δ -слоев Si.

Вклад рассеяния электронов на ионах примеси хорошо выявляется из анализа температурных зависимостей подвижности, так как в вырожденном двумерном электронном газе при таком рассеянии температурная зависимость пренебрежимо мала по сравнению с $\mu(T)$ для фононного рассеяния. Поэтому критерием вклада рассеяния на ионах примеси является не только сравнительно низкая подвижность электронов, но и ее слабая температурная зависимость. Удельное сопротивление образцов и эффект Холла измерялись в диапазоне температур 77–300 К на мезоструктурах в форме холловских мостиков. Измеренные холловские концентрации и подвижности электронов приведены в таблице.

Как видно из данных таблицы, в образце 50 подвижность электронов невысока, а прирост при низкой температуре составил $\mu_{77}/\mu_{300} \approx 2$. В образце 51 подвижность увеличилась по сравнению с образцом 50 в 1.8 раза при $T = 300$ К, а соотношение подвижностей μ_{77}/μ_{300} составило 3.9. Это указывает на возрастающую роль фононов в ограничении подвижности электронов. Таким образом, в образце с составным спейсером получено заметное снижение рассеяния электронов на ионизированных примесях. Расчет показывает, что при таком легировании энергия зоны проводимости в окрестности доноров приближается к энергии подзоны КЯ. Во второй структуре в области спейсера был выращен барьер AlAs толщиной 2 нм, при этом суммарная толщина спейсерного слоя сохранена.

В структуре с неглубокой КЯ и составным спейсером, содержащим нанобарьер AlAs, наблюдалось небольшое снижение концентрации электронов и существенное возрастание подвижности. При низких температурах подвижность увеличилась в 3.4 раза при введении одного нанобарьера в область спейсера.

В паре образцов с глубокой КЯ 125 и 126 получены высокие концентрации электронов при достаточно высокой их подвижности. Прирост подвижности при понижении температуры в образцах 125 и 126 составлял $\mu_{77}/\mu_{300} \approx 2.3$ –2.5 раза, что указывает на меньший вклад рассеяния на ионизированных примесях в ограничение подвижности электронов. Тем не менее при введении барьеров AlAs в окрестности

каждого из δ -легированных слоев наблюдается увеличение низкотемпературной подвижности электронов (в 1.27 раза). Наиболее сильно явление гибридизации, таким образом, проявляется в неглубокой квантовой яме. В структуре $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ глубина КЯ составляет $\Delta E_c = 100$ мэВ, а в структуре второго типа $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}/\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}/\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.16}\text{As}$ $\Delta E_c = 210$ мэВ. В глубокой КЯ гибридизация состояний будет наступать либо при более высокой концентрации электронов, либо при более толстом спейсерном слое. Поэтому для первой пары образцов эффект оказался сильнее. Однако в условиях заполнения электронами верхних подзон размерного квантования в сложных гетероструктурах данное явление гибридизации подзон может сильно ограничивать подвижность электронов с высокой энергией. Это может быть важно для высокополевого транспорта, когда большая часть электронов приобретает дополнительную энергию. В этом случае введение AlAs-барьера в область спейсера должно также приводить к снижению рассеяния, возникающего вследствие гибридизации состояний.

В качестве критерия пространственной гибридизации волновых функций электронных состояний была рассчитана взаимная пространственная корреляционная функция между состояниями двух нижних подзон, вычисленная как $I_{01} = \int \Psi_0^2 \Psi_1^2 dz$. Данная корреляционная функция отражает корреляцию во взаимном перекрытии состояний в области КЯ и потенциальной V -образной ямы. На рисунке приведена зависимость I_{01} от толщины спейсера d_s .

Для структур с однородным спейсером зависимость $I_{01}(d_s)$ имеет монотонно убывающий характер в области тонкого спейсера, в соответствии с понижением пространственного перекрытия данных состояний. Однако при сближении энергии состояний и усилении гибридизации волновых функций I_{01} резко возрастает. Для точки антикроссинга $d_s = 14$ достигает максимального значения $I_{01} = 0.039$. В структурах с нанобарьером AlAs в спейсере туннельная связь состояний сильно подавлена, и во всем диапазоне d_s корреляционная функция имеет значение в среднем в ~ 500 раз меньше, чем для структур с однородным спейсером. Кроме того, никаких немонотонных особенностей зависимости $I_{01}(d_s)$ не отмечается.

В транзисторной гетероструктуре с тонким спейсером понижение потенциала зоны проводимости в легированном барьере уже нельзя рассматривать вне квантовых представлений. С увеличением легирования при приближении энергии зоны проводимости в барьере к области разрешенных состояний в квантовой яме может возникать единая квантовая система с гибридными волновыми функциями, подобно наблюдавшимся в мелких квантовых ямах GaAs/InGaAs/GaAs в работе [13]. В глубокой КЯ аналогичная ситуация должна наблюдаться при более высокой концентрации легирования. При этом подвижность электронов снижается, так как доноры уже не являются удаленными, несмотря на сохранение физической толщины спейсерного слоя.

Таким образом, явление параллельной проводимости должно рассматриваться как появление многоподзонной проводимости в сложном потенциале в системе туннельно-связанных квантовых ям.

Отмеченные особенности в рассеянии электронов важны не только в случае гибридизации нижних подзон размерного квантования в мелких квантовых ямах, но и в случае глубоких КЯ с высокой энергией электронов. Действительно, в транзисторе при высокополевом электронном транспорте носители тока занимают высокоэнергетические состояния, где также может проявляться пространственная гибридизация состояний, что приведет к спаду дрейфовой скорости электронов и снижению крутизны транзистора. В этом направлении использование нанобарьеров AlAs и структур с составным спейсером также может снизить негативное влияние данных факторов и улучшить характеристики прибора.

4. Заключение

В настоящей работе явление „параллельной проводимости“ в случае относительно тонкого спейсера и сильного легирования описывается в рамках квантово-механического подхода, показано, что модель двуслойной проводимости не отражает взаимодействия электронов в КЯ и в потенциальной яме вблизи δ -слоя. В случае сильного легирования образуется единая квантовая система „квантовая яма + V -образная потенциальная яма“, с гибридной формой волновых функций электронных подзон. При гибридизации волновых функций подвижность электронов в квантовой яме резко уменьшается.

Предложен способ снижения рассеяния за счет введения тонких вставок AlAs в спейсерный слой. В такой конструкции подавляется туннельная связь области квантовой ямы и потенциальной ямы вблизи доноров, состояния разделяются и локализуются преимущественно в различных пространственных областях многослойной квантовой системы.

Экспериментально показано более чем 3-кратное увеличение низкотемпературной подвижности электронов при введении нанобарьера AlAs в структуру с гибридным основным состоянием.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства „Разработка перспективных СВЧ компонентов для высокоплотных радиоэлектронных модулей нового поколения“ шифр 2013-218-04-050; постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, с использованием оборудования ЦКП „Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников“ НИЯУ МИФИ

Список литературы

- [1] M.J. Kane, N. Apsley, D.A. Anderson, L.L. Taylor, T. Kerr. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **18**, 5629 (1985).
- [2] D.A. Syphers, K.P. Martin, R.J. Higgins. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 534 (1986).
- [3] S.B. Lisesivdin, A. Yildiz, N. Balkan, M. Kasap, S. Ozcelik, E. Ozbay. *J. Appl. Phys.*, **108**, 013 712 (2010).
- [4] M. van der Burgt, V.C. Karavolas, F.M. Peeters, J. Singleton, R.J. Nicholas, F. Herlach, J.J. Harris, M. Van Hove, G. Borghs. *Phys. Rev. B*, **52** (16), 12 218 (1995).
- [5] Y.-W. Chen, W.-C. Hsu, H.-M. Shieh, Y.-J. Chen, Y.-S. Lin, Y.-J. Li, T.-B. Wang. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **49** (2), 221 (2002).
- [6] E.F. Schubert, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **30** (12), 7021 (1984).
- [7] Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, Р.А. Лунин, В.А. Кульбачинский. *ФТП*, **45** (10), 1373 (2011).
- [8] Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, А.А. Черечукин. *ФТП*, **40** (12), 1479 (2006).
- [9] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42** (9), 1102 (2008).
- [10] T. Tsuchiya, T. Ando. *Phys. Rev. B*, **48** (7) 4599 (1993).
- [11] L.X. Yi, J. Heitmann, R. Scholz et al. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 661 (2002).
- [12] K. Inoue, T. Matsuno. *Phys. Rev. B*, **47** (7), 3771 (1993).
- [13] И.С. Васильевский, В.А. Кульбачинский, Р.А. Лунин, Г.Б. Галиев, В.Г. Мокеров. *ЖЭТФ*, **132** (1) 197 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

Electron mobility increase in composite spacer HEMT heterostructures with nanoscaled AlAs insertions

A.N. Vinichenko, V.P. Gladkov, N.I. Kargin, M.N. Strikhanov, I.S. Vasil'evskii

National Research Nuclear University „MEPhI“,
115409 Moscow, Russia

Abstract The effect of quantum state hybridization on electron transport properties is studied theoretically and experimentally in the double barrier quantum well delta-doped through the spacer at the high doping limit. The approach is proposed for electron mobility enhancement in quantum well by thin nanoscaled AlAs barrier insertion in the spacer, related to the reduction of the tunnel coupling to the dopant area. Experiment showed more than triple electron mobility increase in the shallow quantum well structures at the low temperature due to 2 nm AlAs insertion in the spacer.