

Технология и электронные свойства РНЕМТ-квантовых ям $\text{AlGaAs}/\text{In}_y(\text{z})\text{Ga}_{1-y}(\text{z})\text{As}/\text{GaAs}$ с переменным профилем состава

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

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

(Получена 9 января 2014 г. Принята к печати 24 января 2014 г.)

Для управления потенциальным профилем квантовой ямы реализована технология варизонных слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ с неоднородным профилем состава вдоль направления роста. Структурные свойства образцов аттестованы методом рентгеновской дифрактометрии. В выращенных РНЕМТ-гетероструктурах с односторонним и двусторонним δ -легированием $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$ исследовано влияние неоднородного состава квантовой ямы на структурные и электронные транспортные свойства образцов (градиент содержания InAs до 1.2%/нм при среднем $y = 0.2$). Оптимизация профиля состава приводит к увеличению подвижности и концентрации электронов. Эффект связан как с изменением профиля дна квантовой ямы и ее эффективной глубины, так и с уменьшением рассеяния электронов за счет более симметричной формы электронной волновой функции в квантовой яме.

1. Введение

Квантово-размерные гетероструктуры на основе $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на подложках GaAs являются доминирующим базовым материалом для изготовления современных приборов сверхвысокочастотной электроники. Несмотря на то что гетеросистема AlGaInAs используется уже более 30 лет, развитие подходов к инженерии гетероструктур и технологии их создания актуально и сегодня. Важнейшие тенденции в эволюции СВЧ транзисторов — повышение граничной частоты усиления, снижение шумов, увеличение КПД, наноминиатюризация длины затвора — остро ставят необходимость дальнейшей оптимизации гетероструктур, используемых в СВЧ электронике. На этом пути не только выбор состава и толщин слоев, но и применение неоднородных слоев, вариации состава по толщине или использование нановставок и сверхрешеток создают дополнительные степени свободы для инженерии гетероструктур.

Объектом нашего исследования была выбрана псевдоморфная гетероструктура $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/(\text{Al})\text{GaAs}$ на подложке GaAs , одна из широко используемых в промышленном производстве приборов СВЧ электроники для создания транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) диапазонов от 10 и вплоть до 60 ГГц. Исследованиям таких структур посвящено большое количество зарубежных и отечественных работ, и наиболее типичные конструкции РНЕМТ-структур уже достаточно хорошо отработаны. Из актуальных проблем, ограничивающих применение РНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor), можно отметить невысокое пробивное напряжение и ограниченную концентрацию электронов в квантовой яме (КЯ). Заметную роль в ухудшении параметров при росте концентрации электронов играют эффекты, вызывающие падение подвижности электронов, в том числе за счет неглубокой квантовой ямы.

В качестве одного из дальнейших подходов по совершенствованию РНЕМТ-гетероструктур в данной работе предлагается использование варизонного состава слоя квантовой ямы InGaAs . Известно, что легирование и заполнение квантовой ямы электронами приводит к появлению изгиба дна зоны проводимости в структуре. Сложный профиль потенциала является неотъемлемым свойством легированных гетероструктур, изгиб и наклон дна в квантовой яме являются причиной изменений расположения уровней энергии и формы волновых функций электронов и дырок. Этот фактор влияет на рассеяние электронов в квантовой яме и их подвижность. Используя варизонный профиль состава, можно скомпенсировать изгиб дна квантовой ямы, возникающий в легированной структуре.

Первые работы по получению сложного профиля квантовой ямы начинались с использования „дифрового“ сплава, т.е. сверхрешетки с вариацией толщин слоев [1]. За счет эффективного усреднения потенциала короткопериодной сверхрешетки на длине волновой функции электрона последний движется, как в однородном полупроводнике, имеющем усредненный состав. Такой способ позволил впервые наблюдать туннельный спектр состояний в КЯ оптическими методами [2].

Однако уже в работе [3] описана получение ступенчатого варизонного профиля КЯ треугольной и параболической формы за счет компьютерного управления температурой источников, а также низкой скорости роста. В работе [4] варизонная технология была применена для роста толстых слоев. В результате была уточнена важная для инженерии квантовых ям константа — отношение разрыва дна зоны проводимости к полному разрыву запрещенной зоны на границе КЯ.

Несмотря на то что варизонные слои исследовались уже очень давно, применение их в транзисторных гетероструктурах с высокой электронной плотностью отражено в единичных работах и недостаточно раскрыты механизмы влияния на электронные транспортные

[†] E-mail: vanaxel@gmail.com

свойства [5–7]. Обычно не приводятся электрофизические данные и анализ механизмов рассеяния, не ясно, является ли слоевая структура оптимальной с точки зрения электронных транспортных свойств, а также не учитывается влияние зонного профиля на электрофизические и оптические свойства PHEMT-гетероструктур. Недостаточно раскрыта также взаимосвязь между транзисторными характеристиками и электрофизическими свойствами наногетероструктуры. В работе [8] проведено моделирование зонного профиля для структур типа D-MODFET (depletion mode metal–oxide–semiconductor field effect transistor) и исследовано их влияние на электрофизические параметры. Лучшие параметры удалось получить при содержании InAs в начале, середине и конце КЯ соответственно 15%–22%–15%, однако не указано, насколько точно удалось воспроизвести данный состав.

В данной работе исследуются особенности использования варизонного слоя In_yGa_{1-y}As с неоднородным профилем распределения In по толщине, $y(z)$, в PHEMT-гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с односторонним и двусторонним δ -легированием для формирования требуемого профиля дна квантовой ямы. Для определения влияния варизонного слоя проведен расчет зонной структуры. Разработана технология создания варизонных КЯ. Методом рентгеновской дифракции определены составы и толщины варизонных КЯ. В изготовленных образцах исследованы электронные транспортные свойства.

2. Зонная структура PHEMT с односторонним и двусторонним легированием и различным профилем состава квантовой ямы

С помощью самосогласованного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона были рассчитаны и проанализированы пространственный профиль потенциала зоны проводимости $U_c(z)$, уровни размерного квантования электронов E_i , огибающие волновых функций электронов $\psi_i(z)$, концентрации электронов в подзонах n_i и распределение электронной плотности $n(z)$ при различном профиле содержания InAs $y(z)$ в слое In_{y(z)}Ga_{1-y(z)}As и различных способах легирования (одностороннее или двустороннее), аналогично работе [9]. Все расчеты были проведены для температуры $T = 300$ К.

Рассмотрим сначала основные особенности типичной PHEMT-гетероструктуры с односторонним легированием и однородным составом In_yGa_{1-y}As ($y = 0.2$, ширина 11 нм) при концентрации электронов $\sim 1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Расчеты показывают, что в такой гетероструктуре возникает асимметрия зонного профиля и кривизна дна КЯ. Это ожидаемо, так как структура является исходно несимметричной по расположению ионизованных доноров относительно КЯ. Получающийся

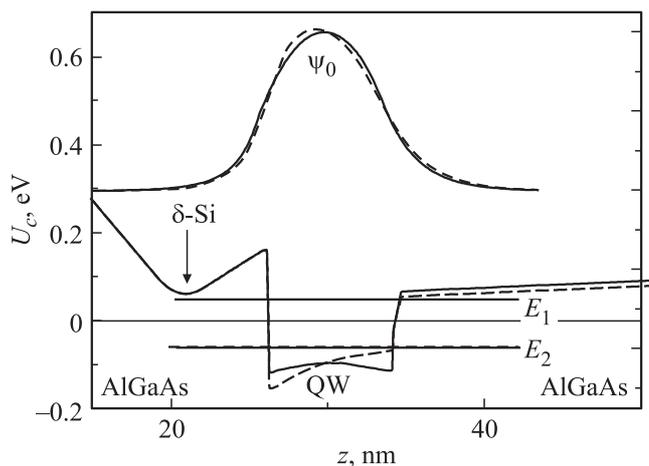


Рис. 1. Зонный профиль и волновая функция основного состояния для однородной КЯ с одним слоем δ -Si (штриховая линия) и варизонной КЯ с компенсацией линейного наклона КЯ (сплошная линия). Концентрация электронов $n_s = 1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻².

ся профиль КЯ можно описать как суперпозицию линейной (с изменением энергии 0.06 эВ на 10 нм) и параболической компонент. Скомпенсировать данную асимметрию в первом приближении можно, добавляя индий в точке высокого потенциала и снижая его содержание в точке с низким потенциалом, используя взаимосвязь с составом разрыва зоны проводимости: $\Delta E_c = (0.2668 + 0.4119y + 0.309y^2)$ эВ. При этом для корректного сравнения со свойствами однородной КЯ необходимо сохранить среднее содержание In в КЯ. Таким образом, использование варизонного профиля состава КЯ, $y(z)$, позволяет устранить в первом приближении наклон, а во втором также и кривизну дна. Конкретное решение зависит в том числе и от технологических особенностей роста.

Далее рассмотрим влияние варизонного профиля КЯ на зонную структуру. На рис. 1 приведен пример расчета профилей потенциала зоны проводимости U_c и волновых функций ψ_0 основного состояния в однородной и варизонной КЯ (QW) с односторонним δ -легированием, в которой для компенсации выбран линейный профиль состава, $y(z) = 0.15 - 0.25$. Варьирование таких параметров, как легирование и ширина КЯ, показало, что в тех случаях, когда нижний уровень размерного квантования E_0 не пересекает дно КЯ, взаимное расположение уровней подзон практически не изменяется при линейной компенсации наклона дна и при сохранении среднего состава слоя КЯ. Это означает, что эффективная ширина КЯ остается неизменной.

Однако в такой ситуации происходит смещение максимума волновой функции электронов в центр КЯ. В широкой КЯ или при сильном легировании изменяются уровни энергии подзон и их взаимное расположение; таким образом, изменение профиля состава ведет к изменению эффективной ширины КЯ, а также к более сильному смещению волновых функций электронов.

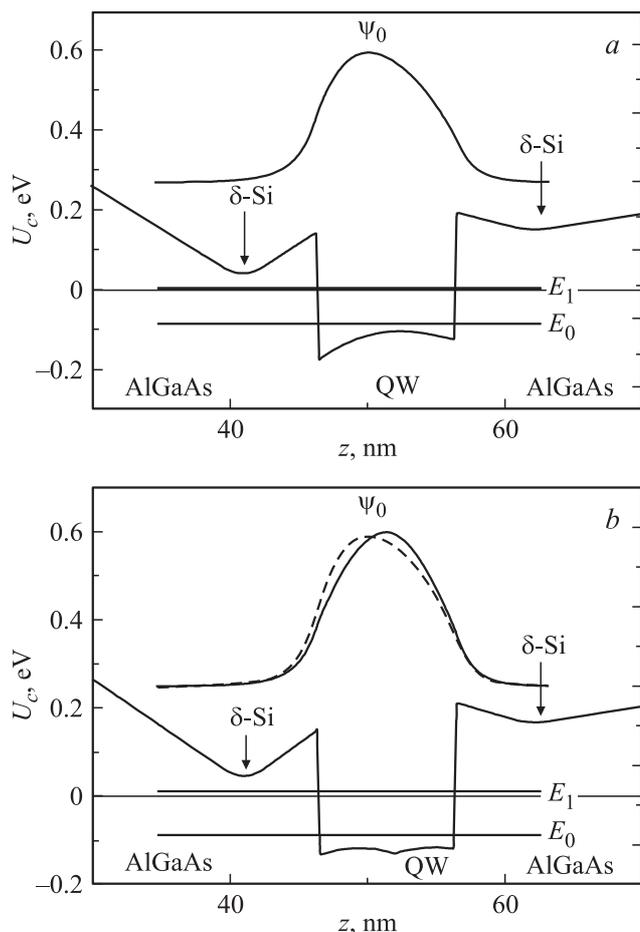


Рис. 2. Зонный профиль и волновая функция основного состояния (сплошная линия) для РНЕМТ-структуры с двусторонним δ -легированием: *a* — однородная КЯ, *b* — варизонная КЯ с компенсацией изгиба дна КЯ. *b*: штриховой линией для сравнения показана волновая функция основного состояния ψ_0 в однородной КЯ. Концентрация электронов в КЯ $n_s = 2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для КЯ с высокой концентрацией электронов принято использовать конструкцию гетероструктуры с двусторонним δ -легированием [10]. Зонный профиль КЯ в этом случае также более симметричен. Однако в подобных структурах вследствие возросшей концентрации электронов в КЯ (n_s) сильно увеличивается кривизна дна КЯ. При $n_s \approx (2-3.5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ параболический барьер в центре КЯ достигает 20–30 мэВ относительно гетерограниц.

На рис. 2, *a* показан профиль двусторонне легированной РНЕМТ-гетероструктуры с однородной КЯ. Как видно, в такой структуре существует как асимметрия профиля на границах КЯ, так и параболический барьер. Поднятие дна КЯ в центре вызывает снижение эффективной глубины КЯ и уширение электронной волновой функции. Скомпенсировать это явление можно, увеличив содержание InAs в центре КЯ и уменьшив его вблизи гетерограниц. В качестве практически реализуемого приближения была применена кусочно-линейная

аппроксимация из двух участков (шириной по 5.5 нм каждый).

Исходя из того, что вариация ширины запрещенной зоны (E_g) при увеличении содержания InAs у составляет $dE_g/du \approx -6 \text{ мэВ/\%}$, оптимальным для компенсации изгиба и барьера оказывался профиль с $y = 0.20$ в начале КЯ, $y = 0.25$ в центре и $y = 0.15$ в конце, при сохранении среднего значения в КЯ $y = 0.2$. На рис. 2, *b* приведен зонный профиль варизонной КЯ с компенсацией изгиба КЯ. Как видно, достигается более прямоугольный профиль КЯ, а волновая функция ψ_0 смещается к центру КЯ. Также снижается энергия основного состояния E_0 относительно нижней точки КЯ. Это означает увеличение эффективной глубины КЯ. При этом влияние компенсации на первое возбужденное состояние E_1 меньше, так как его волновая функция ψ_1 имеет узел в окрестности центра КЯ. Таким образом, возрастает межподзонный энергетический зазор (на $\sim 7 \text{ мэВ}$ в данном примере), что должно снизить межподзонное рассеяние электронов в варизонной КЯ.

При обеднении рассматриваемой варизонной КЯ (подаче отрицательного напряжения на затвор транзистора) наличие варизонного слоя создаст пониженное значение потенциала в центре КЯ, тем самым усиливая конфайнмент электронов, что означает более высокие значения крутизны транзистора, чем в случае классической РНЕМТ-гетероструктуры.

Таким образом, расчетное моделирование позволило определить оптимальный профиль состава для выбранной концентрации электронов: $y = 0.25$ в центре КЯ, $y = 0.20$ в начале и $y = 0.15$ в конце КЯ.

3. Изготовление образцов и методики их исследования

Исследуемые образцы РНЕМТ-гетероструктур двух типов были изготовлены в НИЯУ МИФИ на установке Riber Compact 21-T методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках нелегированного GaAs диаметром 2 дюйма с ориентацией (100). Образцы первого типа имели одностороннее δ -легирование кремнием, второго типа — двустороннее; структурные схемы слоев представлены на рис. 3, *a* и *b* соответственно.

Толщина КЯ InGaAs во всех образцах РНЕМТ первого и второго типов составляла 11 нм, отличие образцов друг от друга заключается лишь в профиле состава КЯ, $y(z)$. Образцы первого типа имели концентрацию донорной примеси кремния $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а при двустороннем легировании соотношение кремния в верхнем и нижнем δ -слоях равнялось 4. Температура роста слоев AlGaAs была 590°C , слоев GaAs — 600°C , а слоев InGaAs — 470°C ; содержание Al в барьерах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ равнялось $x = 0.24$ для всех выращенных образцов. Сверхрешетки (SL1, SL2) AlGaAs/GaAs введены с целью подавления возможной сегрегации примесей из подложки в буферный слой GaAs, а также для уменьшения концентрации дефектов.

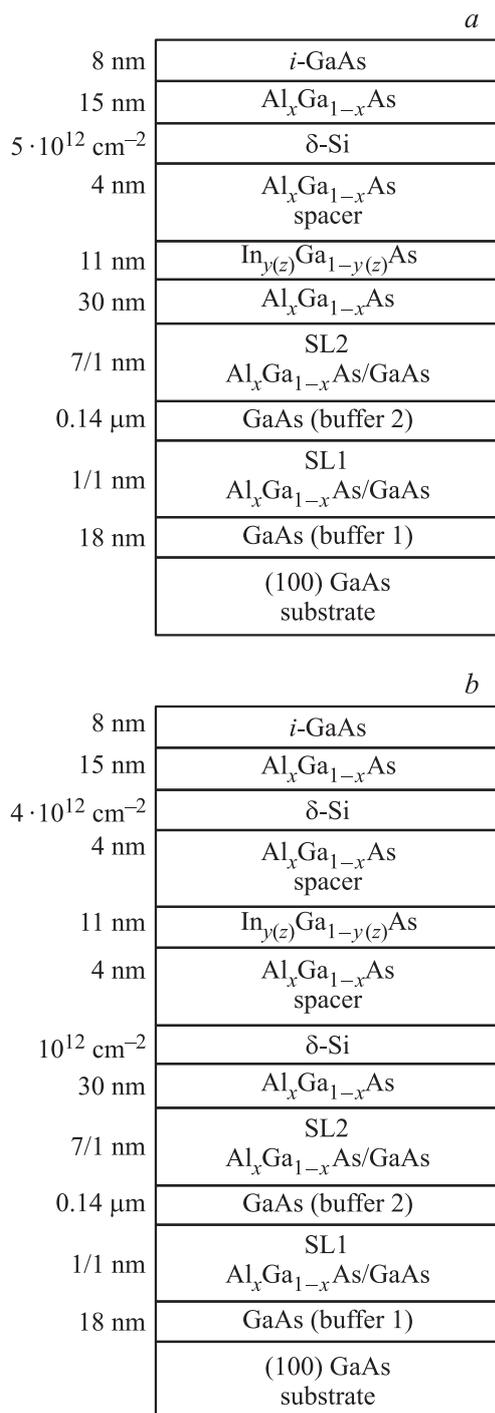


Рис. 3. Схема PHEMT-гетероструктуры с односторонним (*a*) и двусторонним (*b*) δ -легированием.

При конструировании варизонной структуры изменение состава слоев достигается изменением соотношения парциальных давлений потоков компонент, для переменного состава КЯ выбрано изменение потока In. Сложнее обеспечить точность при одновременном изменении температур сразу двух ячеек, однако такой прием бывает необходим при достаточно резких изменениях состава. Для структур с переменным составом легко оперировать

таким параметром, как градиент состава, который в зависимости от скорости роста определяет темп изменения потоков и скорость нагрева или охлаждения соответствующей эффузионной ячейки, в данном случае источника индия. Известные из литературы градиенты распределения In были на уровне 0.6%/нм [8]. В данной работе перепад состава, требуемый для компенсации изгиба зон, составлял в слое InGaAs до 13%, что эквивалентно $\sim 1.2\%$ In/нм.

Столь высокий градиент состава невозможно надежно реализовать по стандартной схеме МЛЭ, поскольку для характерной скорости роста GaAs $\sim (130-140)$ Å/мин скорость изменения температуры источника In оказывалась слишком большой ($\sim 60^\circ\text{C}/\text{мин}$). Поэтому для более плавного регулирования температуры источника было проведено масштабирование скорости роста и времени роста при условии сохранения состава и толщины слоев структуры. Образцы были выращены при скорости роста 60 Å/мин (по GaAs). Поскольку время роста КЯ толщиной 11 нм со скоростью роста 92 Å/мин (по GaAs) составила всего 72 с, потоки In и Ga изменялись параллельно по линейному закону. Для этого были проведены тщательные градуировки зависимости давления потока от температуры источников Ga и In, была написана программа регулирования температуры каждого источника во времени. Для роста слоев с требуемым составом были проведены калибровки парциальных давлений потоков, изменяющихся по заданному закону во времени, с имитацией реального ростового процесса. Был скорректирован эффект запаздывания молекулярных потоков по времени, вызванный инерцией источников, путем симуляции ростового процесса и наблюдения за изменением потока по ионизационному датчику Альперта–Байярда.

Для каждого типа образцов была изготовлена PHEMT-структура для сравнения, имеющая однородный состав КЯ. Подробные параметры выращенных структур представлены в табл. 1. При этом для всех образцов неизменной оставалась геометрия слоев, их толщины и состав. Толщина барьера AlGaAs между δ -Si и поверхностью для структур составила 15 нм, толщина

Таблица 1. Состав варизонного слоя КЯ In_yGa_{1-y}As в выращенных гетероструктурах

Номер образца	y, %		
	в начале слоя	в середине слоя	в конце слоя
PHEMT-гетероструктуры с 1 δ -слоем			
#183	20	20	20
#184	15	20	25
PHEMT-гетероструктуры с 2 δ -слоями			
#74	20	20	20
#75	20	25	15
#89	20	22	15
#90	20	28	15

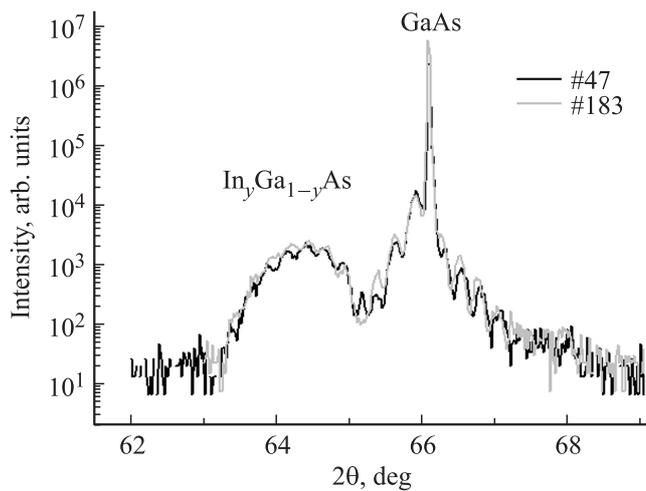


Рис. 4. Кривые дифракционного отражения (004) от образцов с обычной (#47) и пониженной (#183) скоростью роста.

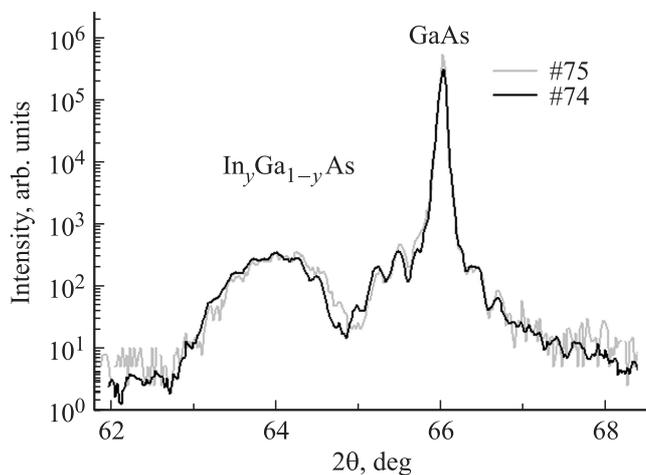


Рис. 5. Кривые дифракционного отражения (004) от образцов с однородным составом квантовой ямы (#74) и варизонной квантовой ямой (#75).

канала 11 нм, толщины спейсеров 5 нм и общая концентрация легирования каждой структуры $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Состав квантовой ямы $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$ в исследуемых образцах представлен в табл. 1.

Далее были выращены структуры с варизонным слоем $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$. Для двусторонне-легированной гетероструктуры исходя из расчетов зонного профиля было выбрано три градиента состава, позволяющие скомпенсировать наклон дна КЯ частично, полностью и с избытком при сохранении среднего содержания InAs в КЯ.

Для проверки точности воспроизведения слоев гетероструктуры при масштабировании скорости роста были выращены 2 образца с однородной КЯ при нормальной (140 Å/мин, образец #47) и пониженной (60 Å/мин, образец #183) скорости. Структура образцов сравнивалась методом двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии с высоким угловым разрешением. Были измерены

кривые дифракционного отражения (КДО) вблизи рефлекса (004) от образцов (Rigaku Ultima IV). Сравнение данных КДО образцов #183 и 47, приведенных на рис. 4, показало хорошее соответствие толщины и состава слоев структуры при снижении скорости роста.

Тонкая структура дифракционной кривой вблизи угла $2\theta \approx 64.4^\circ$ отвечает отражению от слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Хорошее соответствие кривых, а именно совпадение угла дифракции в максимуме рассматриваемого пика и узлов слева и справа от пика, означает совпадение состава слоя и его толщины в двух измеренных образцах. Кроме того, наличие большого числа периодов толщинных осцилляций, отвечающих слою AlGaAs, показывает высокое структурное совершенство и малое размытие гетерограниц в обоих образцах.

Данные КДО от варизонного образца #75 и сравнение с опорным образцом #74 с однородным составом $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ приведены на рис. 5. Видно, что структура дифракционных максимумов в области углов $2\theta = 62.7\text{--}65.0^\circ$, соответствующая отражению от слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, для данных образцов имеет небольшое различие, однако средний состав для обоих образцов совпадает.

В структурах с неоднородным составом $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ изменение поперечного параметра решетки вдоль слоя псевдоморфно деформированного InGaAs не проявляется в качестве отдельной особенности на дифрактограмме, а возникает пик, соответствующий усредненному составу слоя так, как это наблюдается и для КДО образцов с короткопериодными сверхрешетками. Можно отметить, что в КДО образца с варизонной квантовой ямой сохраняются толщинные осцилляции, свидетельствующие о гладкости слоя и границ раздела.

Образцы с двусторонним легированием различались градиентом варизонного состава. В образце #75, согласно расчетам, должен был скомпенсироваться параболический изгиб в центре КЯ, образец #89 имел варизонный профиль с меньшим градиентом, недостаточным для полной компенсации, а образец #90 — градиент больше оптимального.

Подвижность и концентрация электронов определялись из измерений в интервале температур 77–300 К эффекта Холла на мезаструктурах (установка Escoria HMS 5000).

4. Результаты измерений и их обсуждение

Измерение параметров электронного транспорта в образцах показало, что все варизонные образцы имеют достаточно высокие значения подвижности электронов, сравнимые с данными для опорных структур с однородной КЯ. Результаты измерений для двух температур приведены в табл. 2. В образцах с односторонним легированием подвижность электронов в варизонной КЯ оказалась несколько выше, чем в образце с однородной КЯ, причем это увеличение более заметно при

Таблица 2. Электрофизические параметры гетероструктур с односторонним и двусторонним легированием

Образец	y, %		T = 300 К		T = 77 К	
	в пике	средняя по КЯ	n _s , 10 ¹² см ⁻²	μ, см ² /В · с	n _s , 10 ¹² см ⁻²	μ, см ² /В · с
# 183 1δ, опорный	25	20	1.53	6840	1.57	22890
#184 1δ, варизонная КЯ	25	20	1.48 (-3%)	7060 (+3%)	1.54 (-2%)	26160 (+14%)
#74 2δ, опорный	20	20	1.76	5360	1.80	11600
#75 2δ, варизонная КЯ	25	20	1.91 (+9%)	5940 (+11%)	2.00 (+11%)	14510 (+25%)
#89 2δ, варизонная КЯ	22	19	1.95 (+11%)	5540 (+3%)	2.00 (+11%)	11900 (+3%)
#90 2δ, варизонная КЯ	28	21	1.70 (-3%)	4920 (-8%)	1.77 (-2%)	9930 (-14%)

низкой температуре, 77 К. Согласно моделированию зонного профиля для односторонне-легированных структур, это может быть обусловлено как удалением волновой функции электронов от области ионизованной примеси и, как следствие, уменьшением рассеяния на ионах Si, так и уменьшением рассеяния носителей на гетерограницах КЯ.

Данные измерений двумерной концентрации электронов для двух температур приведены в табл. 2. Для структур с односторонним δ-легированием концентрация электронов практически не изменилась в варизонной КЯ (#184) по сравнению с однородной КЯ (#183), что находится в хорошем соответствии с расчетными данными. Действительно, так как эффективная ширина КЯ не изменилась и существенного сдвига энергии подзон при данных условиях не ожидается, концентрация электронов должна сохраниться.

Для структур с двусторонним δ-легированием варизонный профиль КЯ приводит к неоднозначному изменению концентрации электронов и их подвижности в зависимости от градиента состава. В образце #75 с точной компенсацией достигается увеличение как концентрации, так и подвижности электронов. Это можно связать с тем, что при оптимальной компенсации кривизны дна КЯ возникает смещение максимума распределения двумерного электронного газа к центру КЯ, что эквивалентно небольшому увеличению толщины спейсерных слоев AlGaAs и приводит к снижению рассеяния электронов на ионизованных донорах кремния в δ-слоях. На это указывает большое увеличение подвижности электронов при низкой температуре в этом образце, поскольку при азотной температуре электрон-фононное рассеяние значительно снижено и подвижность электронов ограничена именно рассеянием на удаленных донорах.

В образце #89 с промежуточной амплитудой варизонности увеличение подвижности менее заметно. Однако в

образце #90 с избыточной варизонностью наблюдался обратный эффект — заметное снижение подвижности электронов и некоторое снижение концентрации. К тому же снижается отношение подвижностей электронов, измеренных при низкой и высокой температурах. Объяснение данного негативного эффекта выходит за рамки зонной трактовки и может быть связано с тем, что при столь резком перепаде состава в псевдоморфно напряженной КЯ (до 28% InAs в центре) возникают избыточная деформация и частичная неупругая релаксация в центральной области слоя InGaAs с образованием дислокаций. Этот дополнительный механизм рассеяния электронов со слабой температурной зависимостью влечет за собой резкое уменьшение подвижности электронов.

Таким образом, в структуре с оптимальным варизонным профилем удалось получить увеличение как подвижности, так и концентрации электронов по сравнению с базовой гетероструктурой, имеющей однородный состав InGaAs в квантовой яме. При выборе градиента состава в псевдоморфном слое In_{y(z)}Ga_{1-y(z)}As необходимо учитывать ограничения, накладываемые критической упругой деформацией, чтобы избежать ухудшения кристаллического качества слоя.

5. Заключение

В работе реализована технология создания варизонных квантовых ям в PHEMT-структурах AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с односторонним и двусторонним легированием методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Подход основан на создании больших градиентов состава (до 1.2%/нм) при пониженной скорости роста активных слоев. По данным расчетного моделирования определен профиль состава In_{y(z)}Ga_{1-y(z)}As, обеспечивающий

компенсацию изгиба дна квантовой ямы. На выращенных образцах исследованы структурные свойства методом рентгеновской дифракции и электрофизические параметры при помощи эффекта Холла. В образцах с оптимальным профилем варизонной КЯ в односторонне-легированных структурах удалось добиться увеличения подвижности электронов при сохранении их концентрации. Неоднородный состав квантовой ямы в двусторонне-легированных структурах приводит к увеличению как подвижности, так и концентрации электронов в образце с оптимальным профилем состава. Эффект связан как с изменением зонного профиля дна квантовой ямы и ее эффективной глубины, так и с уменьшением рассеяния электронов за счет более симметричной формы электронной волновой функции в квантовой яме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием оборудования ЦКП „Гетероструктурная СВЧ электроника и физика широкозонных полупроводников“ НИЯУ МИФИ.

Список литературы

- [1] S. Sen, F. Capasso, A.C. Gossard, R.A. Spah, A.L. Hutchinson, S.N.G. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **51** (18), 1428 (1987).
- [2] Y.R. Lee, A.K. Ramdas, A.L. Moretti, F.A. Chambers, G.P. Devane, L.R. Ram-Mohan. *Phys. Rev. B*, **41** (12), 8380 (1990).
- [3] R.F. Kopf, M.H. Herman, M. Lamont Schnoes, A.P. Perley, G. Livescu, M. Ohring. *J. Appl. Phys.*, **71** (10), 5004 (1992).
- [4] S.M. Wang, G. Treideris, W.Q. Chen, T.G. Andersson. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1), 61 (1993).
- [5] J.-C. Huang, W.-C. Hsu, C.-S. Lee, D.-H. Huang, M.-F. Huang. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 619 (2006).
- [6] C.-S. Lee, W.-T. Chien. *J. Electrochem. Soc.*, **158** (4), H452 (2011).
- [7] Y.-J. Li, W.-C. Hsu, I.-L. Chen, C.-S. Lee, Y.-J. Chen, I. Lo. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22** (5), 2429 (2004).
- [8] T.-K. Yoo, P. Mandeville, H. Park, W.J. Schaff, L.F. Eastman. *Appl. Phys. Lett.*, **61** (16), 1942 (1992).
- [9] Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, В.Г. Мокевов, А.А. Черечукин. *ФТП*, **40** (12), 1479 (2006).
- [10] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокевов, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42** (9), 1102 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Technology and electron properties of PHEMT AlGaAs/In_yGa_{1-y}As/GaAs compositionally graded quantum well

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

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

Abstract Graded In_yGa_{1-y}As quantum well epitaxial technology is developed for the engineering of potential band profile. Crystal structure of the samples is approved by high resolution X-ray diffraction. The influence of quantum well bending on crystal and electron transport properties is studied on one- and two-side δ -doped Al_{0.23}Ga_{0.77}As/In_yGa_{1-y}As/Al_{0.23}Ga_{0.77}As PHEMT heterostructures. The highest InAs content gradient reached 1.2%/nm for the mean InAs content $y = 0.2$. InAs content grading lead to electron mobility and concentration enhancement. Effect is attributed to quantum well potential profile straightening and deepening. Electron wavefunction shifts towards the quantum well center and this causes the decrease of electron scattering.