



УДК 621.315.592

Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

В. Г. Литвинов, А. В. Ермачихин

Рязанский государственный радиотехнический университет

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование неоднородно-легированных арсенид-галлиевых светоизлучающих гетероструктур

Методом электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) исследованы светоизлучающие гетероструктуры с одиночными и множественными квантовыми ямами (КЯ) на базе соединений GaAs/InGaAs. Измерены вольт-фарадные характеристики, получены профили распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, определены пространственные расположения, а также уровни заполнения КЯ носителями заряда. На примере гетероструктур с одиночной КЯ рассмотрены ограничения емкостных методов профилирования нелегированных КЯ, расположенных вблизи металлургической границы p-n-перехода. В частности, подробно рассмотрены явления, связанные с дебаевским размытием, построена и проанализирована зависимость области объемного заряда от уровня легирования. Представлена эволюция вольт-фарадных характеристик в процессе ECV-профилирования неоднородно-легированных p-n-гетероструктур. Для гетероструктуры с множественными КЯ зафиксирован отклик от шести КЯ.

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, СИД, GaAs, КЯ, МКЯ, КТ, ВФХ, неоднородное легирование

Полупроводниковые гетероструктуры с одиночными и множественными квантовыми ямами (МКЯ) успешно используются в приборах нано- и оптоэлектроники: светоизлучающих диодах, лазерах, фотоприемниках и др. Несмотря на продолжительную историю развития гетероструктур, в этой области остается ряд нерешенных задач, а научный интерес к ним не угасает. Особенностью данных гетероструктур является резко неоднородное распределение концентрации легирующей примеси, применяемое в целях получения новых качеств и улучшения рабочих характеристик прибора. Во многом независимо от распределения примеси по структуре КЯ сами создают ярко выраженный профиль распределения основных носителей заряда (ОНЗ), который имеет острые пики обогащения в области провала потенциала, даже несмотря на то что сами КЯ и спейсерные слои вокруг них, как правило, не легируют для

снижения плотности дефектов и подавления вероятности безызлучательных переходов [1]. Требования по составу примеси и ее распределению в готовых приборах непрерывно возрастают, а сами структуры становятся все более сложными. Процессы, используемые для производства этих структур, зачастую носят сложный характер, а результаты сильно зависят от чистоты исходных материалов и технологического маршрута изготовления слоев. Поэтому неуклонно ужесточаются и требования к методам контроля распределения примеси и основных носителей заряда как на этапе лабораторной разработки структуры, так и на различных стадиях производства полупроводникового прибора.

Метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) позволяет получить информацию как о распределении примеси, так и о концентрации свободных носителей заряда [2].

Если измерение однородно-легированных полупроводниковых структур ECV-методом хорошо отработано и представляет собой достаточно рутинную задачу, то при измерениях современных многослойных светоизлучающих гетероструктур с неоднородным профилем легирования оказывается необходим тщательный подбор параметров травления и выбор рабочей точки измерения [3]. К тому же при измерениях вольт-фарадных характеристик (ВФХ) светоизлучающих диодов с КЯ возникают определенные трудности в интерпретации результатов профилирования, что связано с отклонением от квазистатического режима, расширением области объемного заряда (ООЗ) как в n -, так и в p -область, а также с тем, что исследуемый энергетический уровень проявляет свойства глубокого центра, что выражается в эффектах запаздывания емкостного отклика [4].

Основной целью настоящей статьи являлось изучение особенностей пространственного распределения ОНЗ в современных арсенид-галлиевых светоизлучающих (СИД) гетероструктурах и анализ разрешения метода ECV при измерении структур с неоднородным профилем легирования. Обсуждаются также особенности интерпретации результатов вольт-фарадного профилирования гетероструктур с одиночными и множественными КЯ.

1. Исследуемые образцы светоизлучающих гетероструктур. Исследовался набор из пяти GaAs-гетероструктур, предназначенных для изготовления светодиодов ближнего инфракрасного (ИК) диапазона. Послойная структура исследованных образцов представлена на рис. 1. Образцы № 1–4 (рис. 1, а) представляли собой гетероструктуры с КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, выращенные методом газовой фазной эпитаксии из паров металло-

органических соединений в институте СВЧ-электроники им. Фердинанда Брауна (Берлин, Германия). Гетероструктуры имели неоднородное легирование p - и n -слоев с понижением концентрации в сторону КЯ. Образцы отличались уровнем легирования и толщинами слоев. Уровень легирования p -областей менялся в диапазоне от $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, для n -области диапазон составлял $2 \cdot 10^{18} \dots 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщина КЯ составляла 7 нм, а состав по индию менялся от 0.27 до 0.35.

Последовательность слоев образца № 5, содержащего МКЯ и квантовые точки (КТ), изображена на рис. 1, б. Гетероструктура получена методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МЛЭ) [5]. Покровный слой p^+ -GaAs толщиной 50 нм имел неоднородное легирование с уменьшением концентрации в глубь структуры от $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Слои $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ были легированы до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Спейсерный нелегированный GaAs-слой, разделяющий слои КЯ и КТ, имел типичную для МЛЭ концентрацию 10^{14} см^{-3} . В процессе роста такой нелегированный слой приобретает p -тип проводимости. После слоев МКЯ и КТ расположен слой p -GaAs толщиной 50 нм с уровнем легирования $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Слой $n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ был легирован сурьмой до концентрации $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

2. Методика ECV-измерений. Классический метод вольт-фарадного (CV) профилирования широко используется для характеристики полупроводниковых материалов и структур. Для построения распределения концентрации свободных носителей заряда в нем необходимо измерять емкость в диапазоне напряжений смещения.

$p\text{-GaAs}$	100...300 нм
$p\text{-GaAs}$	100...300 нм
$p\text{-GaAs}$	200 нм
$p\text{-GaAs}$ н/л	100 нм
GaAs н/л	13 нм
InGaAs	7 нм
GaAs н/л	13 нм
$n\text{-GaAs}$ н/л	100 нм
$n\text{-GaAs}$	200...500 нм
$n\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	100 нм
$n\text{-Al}_{0.25}\text{Ga}_{1-0.75}\text{As}$	40 нм
$n\text{-GaAs}$	100 нм

а

$p^+\text{-GaAs}$	50 нм
$p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	150 нм
$p\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	1500 нм
$i\text{-GaAs}$	50 нм
$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	6 нм
InAs КТ	2.7 МС
$p\text{-GaAs}$	50 нм
$n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	1500 нм
$n^+\text{-GaAs}$	300 нм
$n^+\text{-GaAs}$ -подложка	

} $\times 10$

б

Рис. 1

В ECV-профиле концентрации профиль регистрируется за счет смещения границы раздела электролит–полупроводник в процессе травления, при этом напряжение смещения остается постоянным [6]. В ECV, как и в CV-методе, концентрация свободных носителей заряда рассчитывается из производной измеренной емкости по напряжению:

$$n(x_d) = -\frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 S^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1},$$

где q – элементарный заряд; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – электрическая постоянная; S – площадь контакта «электролит–образец». Геометрическое положение границы области объемного заряда, на которой измеряется концентрация, определяется как

$$x_d = \frac{\epsilon\epsilon_0 S^2}{C}.$$

В случае ECV-профилеирования dC/dV обычно измеряется модуляционным методом, в котором тестовый сигнал небольшой амплитуды накладывается на низкочастотный сигнал, задающий напряжение смещения образца (в большинстве случаев это напряжение остается фиксированным на протяжении всего измерения). В обычных CV-измерениях эта производная рассчитывается численным дифференцированием измеренной ВФХ.

Глубина травления в ECV-методе определяется по количеству удаленного вещества, полученного из электрохимического закона Фарадея:

$$x_r = \frac{M}{zF\rho S} \int_0^{t_0} i(t) dt,$$

где M – молярная масса; z – валентное число ионов вещества (число электронов, необходимое для растворения одной молекулы); F – постоянная Фарадея; ρ – удельная плотность материала.

Измерения концентрации ОНЗ по глубине структур проводились авторами при комнатной температуре с использованием установки электрохимического профилирования ECVPro (Nanometrics). В качестве электролита был выбран раствор 0.1 М Tiron [7]. Площадь электролитического выравнивающего контакта составляла 0.1 см². Ток травления поддерживался на уровне 0.5 мА/см². Шаг травления составлял 1 нм. Напряжение смещения V в ECV-измерениях выбиралось на ли-

нейном участке ВФХ в координатах Мотта–Шотки ($1/C^2$ от V) и составляло –0.6 В. Следует заметить, что смещения в данной статье указаны относительно платинового электрода и использование электролита другой концентрации приведет к изменению оптимальных параметров измерений. Частота зондирующего сигнала, используемого для измерения емкости C , составляла 138 Гц. В ряде экспериментов для измерения ВФХ использовался LCR-измеритель Agilent E4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECVPro через блок реле [8]. Для контроля глубины и качества травления использовался атомно-силовой микроскоп (ACM) Solver NEXT (NT-MDT).

3. Экспериментальные результаты и обсуждение. Исследование светопрозрачных структур с одиночной КЯ. В данной части статьи представлены результаты измерения профилей распределения основных носителей заряда по глубине арсенид-галлиевых светопрозрачных гетероструктур с одиночной КЯ. Полученные концентрационные профили образцов представлены на рис. 2–5. Белыми кружками на рисунках обозначена концентрация дырок, черными – электронов. Результаты укладываются в диапазон погрешности метода и хорошо совпадают с паспортными данными образцов.

Из рисунков видно, что на концентрационных профилях присутствует «слепая» область порядка 200 нм, соответствующая КЯ и соседним легированным слоям по обе стороны от нее. Это связано с тем, что для получения максимальной эффективности рекомбинации носителей заряда дизайн данных структур был оптимизирован под наличие одиночной КЯ, расположенной в области максимального значения напряженности электрического поля p – n -перехода. Для диагностики таких структур емкостными методами это означает принципиальную невозможность получения отклика от области, соответствующей КЯ. Несомненным преимуществом метода ECV является возможность профилирования в режиме травления (так называемая etching mode), однако и в данном случае отклик от КЯ на концентрационном профиле не наблюдается. Дело в том, что по мере травления, ввиду неоднородного характера легирования поверхностных слоев, граница раздела электролит–полупроводник сдвигается в область слоев со все более низкой концентрацией. Это сопровождается нелинейным увеличением

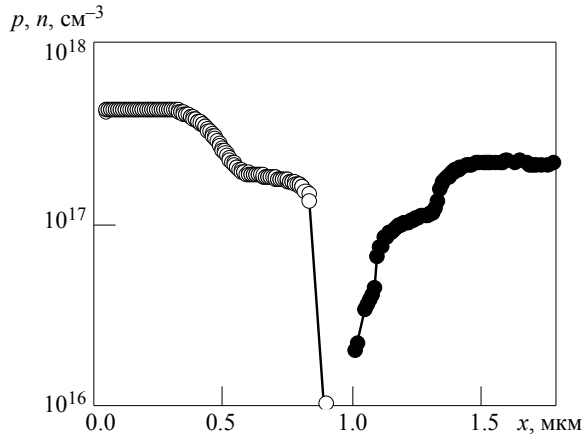


Рис. 2

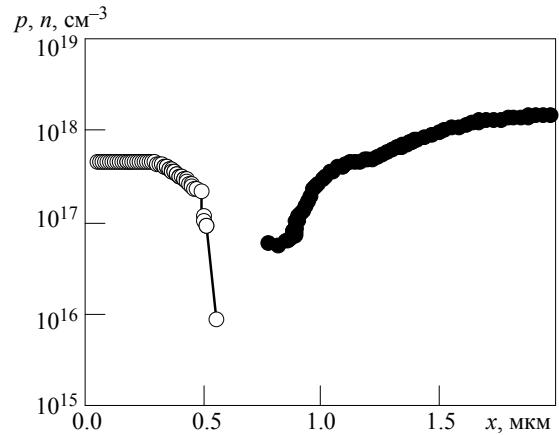


Рис. 3

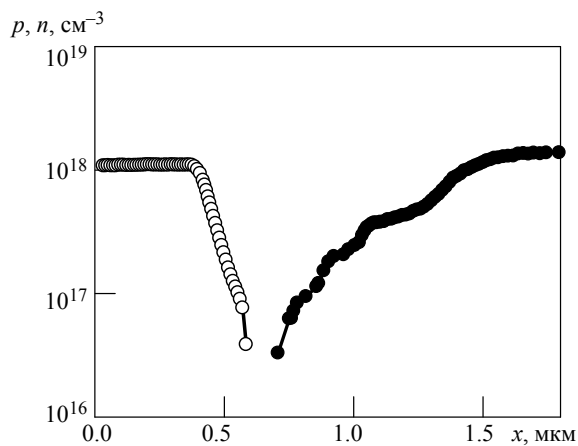


Рис. 4

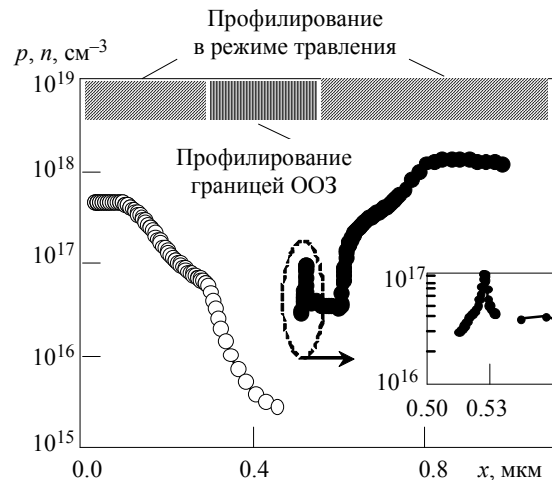


Рис. 5

исходной ширины области объемного заряда, на границе которой измеряется концентрация ОНЗ. Экспериментально полученная авторами статьи в предыдущих работах зависимость ООЗ от уровня легирования профилируемого слоя представлена на рис. 6, где символами N_D и N_A обозначены концентрации ионизованных доноров и акцепторов соответственно. Важно также учитывать собственные обедненные области КЯ, расположенные по обе стороны от нее.

Отметим принципиальную разность между распределением примеси и распределением подвижных носителей заряда; последние перераспределяются под воздействием приложенного в СВ-измерениях переменного напряжения, формируя размазанный профиль, характеризуемый дебаевской длиной экранирования. Таким образом, измерение дифференциальной емкости позволяет определить так называемый эффективный или наблюдаемый (apparent) профиль распределения концентрации свободных носителей заряда, строго говоря, не совпадающий ни с истинным

профилем распределения концентрации ОНЗ (в равновесном состоянии без приложения внешнего смещения), ни с профилем распределения примеси [9]. Путем итерационных вычислений [10] можно восстановить истинный профиль распределения концентрации ОНЗ, однако из-за математической сложности это делается редко.

Поскольку свободные носители заряда диффундируют в смежные области (включая область обеднения), они не будут отражать распределение примесей для области резкого перехода профиля легирования. В данных областях будет наблюдаться «размытие профиля» на несколько дебаевских длин, что, в конечном счете, определяет фундаментальное разрешение метода (рис. 7). Анализ показывает, что если изменение уровня легирования происходит в пределах одной дебаевской длины экранирования, наблюдаемый и истинный профили распределения концентрации ОНЗ хорошо согласуются друг с другом, но оба они заметно отличаются от примесного профиля [8].

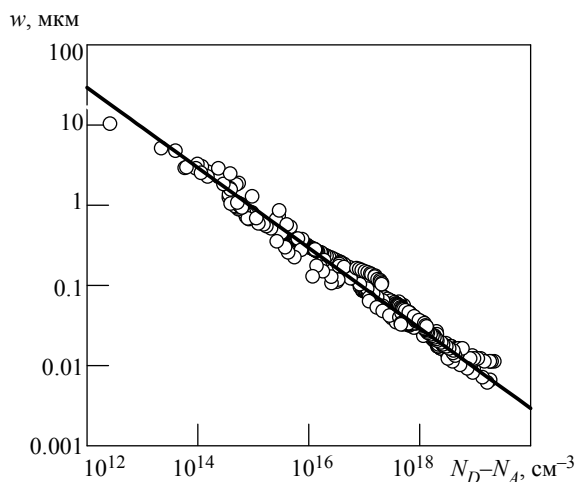


Рис. 6

Эффект наиболее выражен в структурах с резко неоднородным профилем легирования, например в НЕМТ или структурах с δ -легированными областями [11], в которых сама область легирования составляет всего несколько дебаевских длин. При этом амплитуда концентрационного пика оказывается заниженной, а сам пик – уширенным и размытым по координате. Чем более резкий профиль легирования, тем больше разница между наблюдаемым распределением концентрации ОНЗ и концентрации примеси. Эта разница характеризуется дебаевской длиной экранирования

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon\epsilon_0}{q^2(p+n)}}.$$

Следствием наличия длины Дебая является, в частности, невозможность профилирования на расстояниях ближе $2-3 L_D$ от поверхности полупроводника.

Для полупроводников, легированных до вырождения, разрешение по координате ограничивается дебаевской длиной в приближении модели Томаса–Ферми [12], которая задается выражением

$$L_{TF} = \left(\frac{\pi}{3(p+n)} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\pi\epsilon\epsilon_0\hbar^2}{q^2 m^*}}.$$

Для полупроводников с квантово-размерными областями, например с δ -слоями или с КЯ, дебаевская длина как степень размытия концентрационного профиля определяется через квадрат модуля волновой функции $|\Psi(x)|^2$ основного состояния [12]:

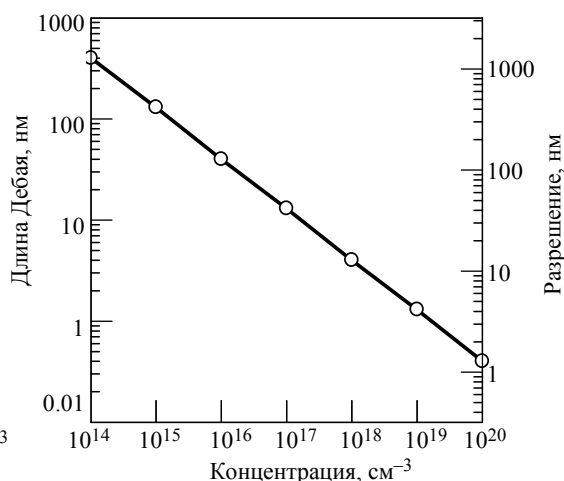


Рис. 7

$$L_\delta = 2\sqrt{\frac{7}{5}} \left(\frac{4\epsilon\epsilon_0\hbar^2}{9q^2 N_{2D} m^*} \right)^{1/3},$$

где $N_{2D} \sim |\Psi(x)|^2$ – двумерная концентрация примеси. Это уравнение показывает, что разрешение при измерении материалов с большими эффективными массами выше по сравнению с материалами, у которых она ниже. Например, разрешение при измерении p -GaAs выше, чем для n -GaAs.

Модель и, соответственно, расчетные формулы, по которым проводится пересчет измеренной ВФХ в профиль распределения концентрации, хорошо применима для асимметричных p - n -переходов, т. е. p^+n - или n^+p -переходов. Так, при уровне легирования сильнолегированной области в 100 или более раз выше, чем уровень легирования смежной области, размытием профиля в сторону сильнолегированной области можно пренебречь.

В данном случае легирование образцов № 1–4 носит неоднородный характер с перепадом по концентрации в пределах трех порядков. К ограничению, связанному с резким увеличением ширины ООЗ при подходе к КЯ, добавляются эффекты дебаевского размытия, а также смена типа проводимости, причем уровни легирования n - и p -областей по обе стороны от КЯ идентичны. Измерения в данной области сопровождаются большим уровнем шума (вследствие увеличения фактора диссипации до значения ~ 0.4); авторы оценивают их как недостаточно достоверные.

Оценки показывают, что ступенчатый профиль легирования на рис. 2–5 не может быть разрешен по координате с точностью выше $2-3 L_D$, причем дебаевская длина определяется концен-

трацией со стороны сильнолегированной области. Поэтому даже при пространственном сдвиге границы раздела (Шотки контакта) за счет травления материала создается ситуация, при которой КЯ всегда оказывается внутри ООЗ: вначале граница ООЗ, создаваемая контактом Шотки, не достает до области КЯ, а затем по мере резкого увеличения профилирующей ООЗ из-за понижения уровня легирования, происходит «схлопывание» двух областей обеднения (под барьером Шотки и собственной ООЗ от КЯ). Отметим, что ширина ООЗ p - n -перехода не может быть нулевой, однако может иметь размеры в единицы нанометров при высоком уровне легирования смежных с КЯ p - и n -областей. Тогда согласно теореме Гаусса ширина ООЗ, на которой собирается нужное для экранирования внешнего приложенного напряжения количество заряда, будет чрезвычайно малой, и при малых приращениях подаваемого к образцу напряжения ΔV удастся провести профилирование КЯ с достаточным разрешением.

Результатом измерения светоизлучающих структур с одиночной КЯ является подтверждение того, что методом ECV невозможно зафиксировать отклик от КЯ, расположенной в максимуме распределения напряженности электрического поля p - n -перехода. В других случаях, когда КЯ оказывается смещенной относительно положения максимума электрического поля в области металлургической границы, как это, по всей видимости, произошло с образцом № 4, создаются условия, при которых возможно профилирование области КЯ границей ООЗ (вставка на рис. 5).

Характерной особенностью метода ECV, в отличие от классического CV-профилирования, является перманентное изменение наклона ВФХ из-за постепенного сдвига границы раздела в процессе профилирования в глубь исследуемого образца. Иногда это позволяет наблюдать переход наклона зависимости $1/C^2$ через 90° (рис. 8, образец № 4), при этом напряжение отсечки будет меняться при переходе от слоя к слою. Полученные ВФХ можно разбить на три типа: I – травление на глубину от 0 до 104 нм, здесь на графиках не наблюдается особенностей; II – травление на глубину от 128 до 207 нм, где наблюдается максимум на ВФХ при подходе границы ООЗ к области КЯ; III – дальнейшее травление на глубину от 228 до 974 нм, где происходит переход к n -типу проводимости, сопровождаемый сначала резким увеличением емкости (при профилировании области

КЯ и металлургического контакта), а затем ее постепенной релаксацией к нормальному значению. Медленный характер уменьшения измеряемого значения емкости при профилировании n -области связан с тем, что травление еще происходит в p -области, а граница ООЗ, в свою очередь, уже располагается в n -области.

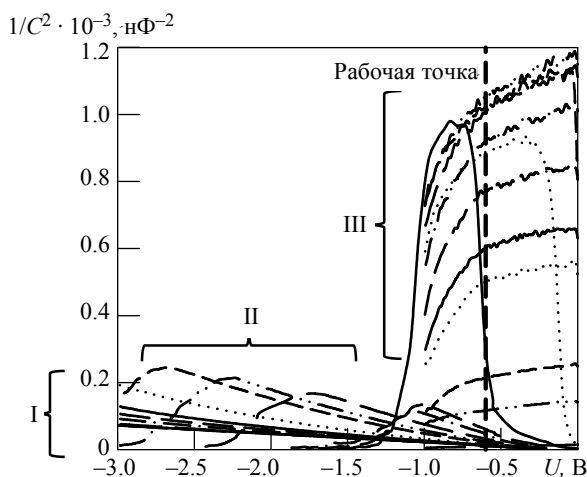


Рис. 8

Исследование светоизлучающей структуры с МКЯ. Для подтверждения того, что отсутствие отклика от одиночной КЯ при измерении структур емкостными методами связано с ее расположением в области максимума напряженности электрического поля p - n -перехода, авторами статьи была исследована структура с МКЯ. В случае справедливости авторских суждений, при профилировании МКЯ необходимо зафиксировать отклик на концентрационном профиле хотя бы от нескольких КЯ. На рис. 9 приведен измеренный профиль распределения концентрации ОНЗ образца № 5, содержащего десять слоев КЯ и КТ. Наиболее интересные области на концентрационном профиле приведены в укрупненном масштабе на вставках к рис. 9.

Как и ожидалось, в случае КЯ в «изотипных» обкладках удалось зафиксировать отклик от МКЯ. Ввиду отмеченных ранее ограничений на концентрационном профиле зафиксированы шесть КЯ с периодом ~ 50 нм, что хорошо коррелирует с паспортными данными образцов. Четыре оставшихся КЯ, по-видимому, оказались внутри ООЗ.

Методом электрохимического вольт-фарадного профилирования измерен набор светоизлучающих гетероструктур ближнего ИК-диапазона с одиночными и МКЯ на базе соединений

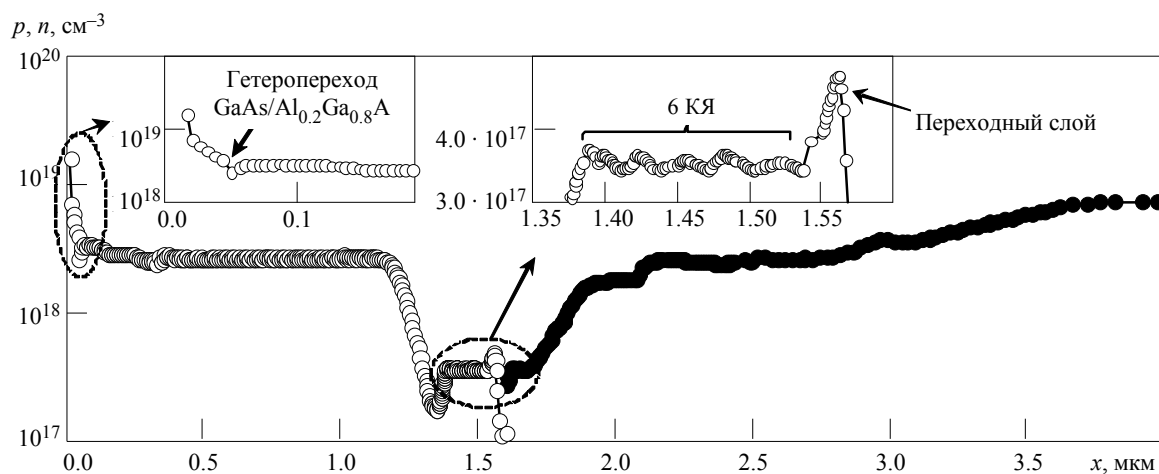


Рис. 9

GaAs/InGaAs. Измерены ВФХ, получены профили распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур, определены пространственные расположения, а также уровни заполнения КЯ носителями заряда. Рассмотрены ограничения и трудности емкостных методов профилирования нелегированных КЯ, расположенных вблизи металлургической границы p - n -перехода. К ограничению, связанному с резким увеличением ширины ООЗ при подходе к КЯ, добавляются эффекты дебаевского размытия, а также смена типа проводимости. К тому же в области металлургического контакта резко ухудшается значение фактора диссипации, возраста-

ющего до значения ~ 0.4 , что означает резкое увеличение потерь и уменьшение соотношения «сигнал/шум» в процессе измерения. Таким образом, экспериментально показано, что методом ECV невозможно зафиксировать отклик от КЯ, расположенной в максимуме распределения напряженности электрического поля p - n -перехода. В других случаях, когда КЯ оказывается смещенной относительно положения максимума электрического поля в области металлургической границы, или в случае наличия МКЯ создаются условия, при которых возможно профилирование области КЯ границей ООЗ. Так, для гетероструктуры с МКЯ зафиксирован отклик от шести КЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- MOVPE growth of highly strained InGaAs/GaAs quantum wells / F. Bugge, U. Zeimer, M. Sato, M. Weyers, G. Trankle // J. Cryst. Growth. 1998. Vol. 183, № 4. P. 511–518.
- Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования / Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, А. В. Зубкова, Е. Е. Левина, В. И. Зубков, А. В. Соломонов, О. К. Стерлядкин, С. А. Сорокин // ФТП. 2016. № 50. С 324–330.
- Electrochemical profiling of heterostructures with multiple quantum wells InGaN/GaN / V. Zubkov, O. Kucherovala, D. Frolov, A. Zubkova // Phys. Stat. Sol. C. 2013. Vol. 10, № 3. P. 342–345.
- Зубков В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: Элмор, 2007. 162 с.
- Анализ электростатического взаимодействия зарядов в множественных квантовых ямах InGaAs/GaAs методами спектроскопии адмиттанса / В. И. Зубков, И. Н. Яковлев, В. Г. Литвинов, А. В. Ермачихин, О. В. Кучерова, В. Н. Черкасова // ФТП. 2014. № 48. С. 944–950.
- Ambridge T., Faktor M. An automatic carrier concentration profile plotter using an electrochemical technique // J. Appl. Electrochem. 1975. № 5. P. 319–328.
- Гетероструктуры с квантовыми точками InGaAs/GaAs, легированными атомами переходных элементов. II: Исследование циркулярно-поляризованной люминесценции / М. В. Дорохин, С. В. Зайцев, А. В. Рыков, А. В. Здравейцев, Е. И. Малышева, Ю. А. Данилов, В. И. Зубков, Д. С. Фролов, Г. Е. Яковлев, А. В. Кудрин // ЖТФ. 2017. № 87. С. 1539–1544.
- Frolov D. S., Zubkov V. I. Frequency dispersion of capacitance-voltage characteristics in wide bandgap semiconductor-electrolyte junctions // Semicond. Sci. Technol. 2016. № 31. P. 125013–1–6.
- Johnson W. C. The Influence of Debye Length on the C-V Measurement of Doping Profiles // IEEE Trans. Electron Dev. 1971. Vol. 18, № 10. P. 965–973.
- Wilson C. L. Correction of Differential Capacitance Profiles for Debye-Length Effects // IEEE Trans. Electron Dev. 1980. Vol. 27, № 12. P. 2262–2267.
- Яковлев Г. Е., Зубков В. И. Электрохимическое вольт-фарадное профилирование арсенид- и нитридгаллиевых НЕМТ-гетероструктур // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 10. С. 5–12.

12. Schubert J. M. Theory and Experiment of Capacitance-Voltage Profiling on Semiconductors with Quantum Confinement // J. Electron. Mat. 1990. Vol. 19, № 6. P. 521–531.
-

G. E. Yakovlev, V. I. Zubkov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

V. G. Litvinov, A. V. Ermachikhin
Ryazan state University of radio engineering

ELECTROCHEMICAL CAPACITANCE-VOLTAGE PROFILING OF NONUNIFORM DOPED GALLIUM ARSENIDE LIGHT-EMITTING HETEROSTRUCTURES

The light-emitting heterostructures with single and multiple quantum wells based on GaAs/InGaAs were investigated by means of electrochemical capacitance-voltage (ECV) technique. The capacitance-voltage characteristics are measured, the free charge carrier depth distributions are obtained, the spatial arrangement and quantum wells filling degree are determined. As an example of heterostructures with a single QW, the limitations and difficulties of capacitance-based techniques while profiling undoped QWs located near the metallurgical boundary of the p-n junction are considered. In particular, the phenomena associated with the Debye spreading are discussed in detail; the dependence of the space-charge region magnitude on the doping level is given and analyzed. The capacitance-voltage characteristic evolution (transition of $1/C^2$ angle through 90°) during ECV-profiling of nonuniformly-doped p-n heterostructures is presented. In the heterostructure with MQW the concentration response from six QWs is recorded, thus the charge carrier distribution in the active area of the heterostructure was spatially resolved.

Electrochemical capacitance-voltage profiling, ECV, LED, GaAs, QW, MQW, QD, C-V, nonuniform doping
