

Определение концентрации и подвижности электронов в окрестности квантовой ямы и δ -слоя Si в гетероструктурах InGaAs/GaAs

© С.В. Тихов[†], Н.В. Байдусь*, А.А. Бирюков*, С.В. Хазанова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Научно-исследовательский физико-технический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Представлены сравнительные измерения адмиттанса в мезадиодах на подложке из n^+ -GaAs и в кольцевых планарных диодных структурах на подложке i -GaAs, содержащие δ -слой Si и квантовую яму InGaAs в эпитаксиальном слое GaAs. Показана возможность определения профиля концентрации и подвижности электронов в окрестности δ -слоя и квантовой ямы InGaAs из анализа одновременно измеренных вольт-фарадных и вольт-симменсных характеристик в мезадиодах. При подобных измерениях в кольцевых диодных структурах на i -GaAs с данной геометрией структуры достоверно можно было определить только профиль концентрации. Обнаружено влияние относительного расположения квантовой ямы и δ -слоя на профиль концентрации и значения подвижности. Также обсуждается явление максвелловской релаксации в кольцевых диодных структурах на i -GaAs.

1. Введение

Локальное или δ -легирование полупроводников используется для улучшения характеристик транзисторов и варикапов [1], понижения [2] или повышения [3] приповерхностных потенциальных барьеров, а также для доставки носителей в области локализации квантовых ям (КЯ) или квантовых точек с целью их диагностики [4]. В связи с этим как для приборного применения, так и в фундаментальных целях необходимо экспериментально определять профиль распределения носителей заряда и их подвижности вблизи δ -легированных слоев, барьеров, квантовых ям и квантовых точек. Это можно сделать с помощью измерений адмиттанса различных приборных структур: на проводящей (в нашем случае n^+ -GaAs) для диодов, изолирующей или полуизолирующей для транзисторов подложке i -GaAs. Обычно в первом случае для измерений используются мезадиоды (МД) [3], а во втором случае — кольцевые планарные диодные структуры (КДС) [5]. В данной работе приведены измерения адмиттанса как для мезадиодов, так и для кольцевых структур на основе гетероструктур с δ -легированным слоем и КЯ InGaAs. Из анализа зависимости параллельной дифференциальной емкости и проводимости от обедняющего напряжения в диодных гомо- и гетеро-наноструктурах кольцевого типа и в мезадиодах Au/GaAs(GaAs/InGaAs) получены профили концентрации и подвижности электронов вблизи δ -слоя и КЯ.

2. Образцы и методика

Гетероструктуры выращивались методом МOC-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на установке AIX 200RF. Слой δ -легированного Si, источником

которого был силан, встраивался в эпитаксиальный слой GaAs толщиной ~ 600 нм. Гетероструктуры получались с различным взаимным расположением квантовой ямы и δ -легированного слоя. В одном случае квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.3$) шириной 10 нм встраивалась сверху δ -слоя на расстоянии 10 нм, в другом снизу на том же расстоянии. И в том и в другом случае квантовая яма и δ -слой были закрыты покровным слоем GaAs толщиной $d_0 = 200$ нм.

Кольцевая диодная структура создавалась на поверхности эпитаксиального слоя на i -GaAs с помощью фотолитографии по напыленному на эту поверхность слою золота. Площадь управляющего электрода в этой структуре $S = 2.46 \cdot 10^{-3}$ см². Величина кольцевого зазора между управляющим и базовым электродом из Au составляла 80 мкм. Известны некоторые трудности интерпретации результатов измерений емкости $C(V)$ и проводимости $G(V)$ в подобных структурах, связанные с высоким сопротивлением подложки, сопротивлением эпитаксиального слоя и особенностями геометрии [5]. В связи с этим, параллельно с КДС изготавливались мезадиоды с управляющим электродом из Au с аналогичной конфигурацией слоев на n^+ -GaAs, в которых не возникает подобных проблем для получения достоверных результатов. Для гомо- и гетероструктур на i -GaAs проводились измерения эффекта Холла и эффекта поля [6]. Были определены значения поверхностной концентрации электронов n_s , холловской подвижности электронов μ_n и подвижности в эффекте поля μ_F на частоте 60 Гц. При измерении эффекта поля методом Монтгомери [7] в интервале частот 20–10⁶ Гц не наблюдалось частотной зависимости подвижности. Данные для нескольких образцов приведены в таблице. Вольт-амперные характеристики (ВАХ), зависимости емкости и проводимости от напряжения

[†] E-mail: tikhov@phys.unn.ru

Характеристики исследованных образцов

№ образца	Тип структуры	$N_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_n, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_p, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
a589-i	PC/ δ -Si/GaAs/i-GaAs	1.9	2670	1920
a590-i	PC/ δ -Si/КЯ/GaAs/i-GaAs	1.6	3660	1430
a591-i	PC/КЯ/ δ -Si/GaAs/i-GaAs	1.5	4270	2800

(CV- и GV-характеристики), последовательное сопротивление R_s и другие составляющие адмиттанса в интервале частот $f = 1 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц}$ в КДС и МД были измерены на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

Для определения профиля концентрации использовался стандартный метод, основанный на дифференцировании зависимости $1/C^2$ от напряжения [4]. Для определения профиля подвижности применялась оригинальная методика, основанная на дифференцировании зависимости $G(V)$. Известно, что поперечная дифференциальная проводимость диодной структуры может определяться разными процессами: сквозной проводимостью, перезарядкой поверхностных и объемных центров, а также канальной утечкой по поверхности. Если предположить отсутствие канальной утечки, то можно ввести некую формальную характеристику, назовем ее поперечной слоевой подвижностью, по формуле

$$\mu = \frac{SdG}{CdV}, \quad (1)$$

как это делается при введении дифференциальной подвижности в эффекте поля [7]. Многочисленные измерения на диодах Шоттки с однородно легированными слоями GaAs показали, что при отсутствии канальной утечки эта подвижность оказывается близка к измеряемой дифференциальной подвижности в эффекте поля.

Графическое дифференцирование зависимости $G(V)$, отнесенное к дифференциальной емкости слоя при напряжении дифференцирования, может дать сведения о слоевой поперечной подвижности носителей заряда в монополярном полупроводнике. Для определения текущего значения толщины d , как и в случае профилирования концентрации, применима формула для плоского конденсатора

$$d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{C}, \quad (2)$$

где ϵ_0, ϵ_s — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость эпитаксиального слоя соответственно.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны ВАХ мезодиодов и КДС с δ -слоем. Можно видеть, что обратный ток I в диапазоне напряжений до -6 В в КДС оказывается ниже, чем в мезодиоде, где он определяется объемной составляющей, что говорит о большой величине последовательного

сопротивления R_s в эквивалентной схеме кольцевой структуры. Это может приводить к частотной дисперсии в CV- и GV-характеристиках [5]. Результаты измерения последовательного сопротивления показывают, что оно зависит от частоты и меняется от 300 до 3000 Ом, в то время как в случае мезодиода R_s не зависело от частоты и не превышало 10 Ом.

На рис. 2 изображены типичные зависимости емкости C и приведенной к круговой частоте тестирующего

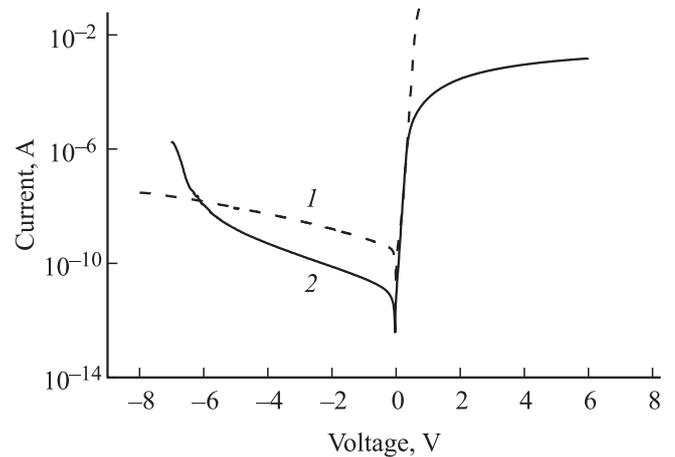


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики мезодиода (1) и кольцевой диодной структуры (2) при уровне δ -легирования $\sim 1.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

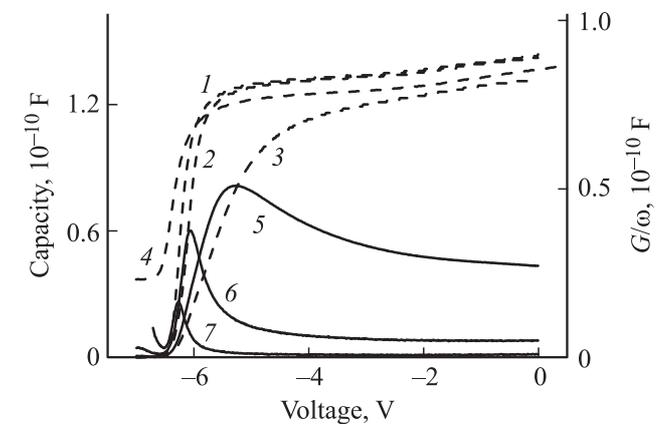


Рис. 2. Зависимости емкости C (1, 2, 3, 4) и приведенной к круговой частоте тестирующего сигнала ω проводимости G/ω (5, 6, 7) от напряжения V для разных частот. Кривые 1–3, 5–7 — КДС (a590-i). Кривая 4 — МД (a590-n⁺). $f, \text{ кГц}$: 1, 7 — 10; 2, 6 — 100; 3, 7 — 1000, 4 — 10–1000.

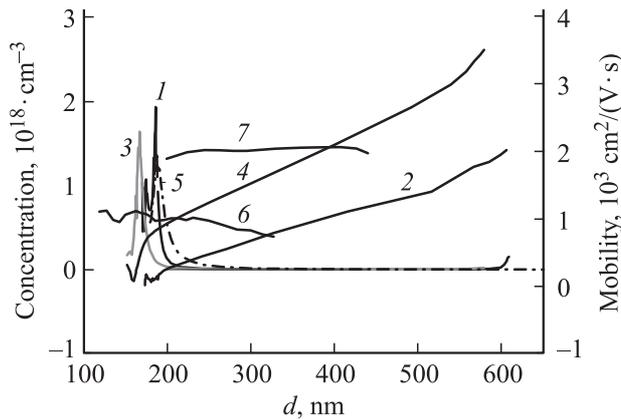


Рис. 3. Зависимости концентрации (1, 3, 5) и подвижности (2, 4, 6) от координаты d . Кривые 1–4 — МД, 5 — КДС. 1, 2 — образец а590- n^+ (КЯ под δ -слоем); 3, 4 — образец а591- n^+ (КЯ над δ -слоем); 5 — образец а589 (с δ -слоем без КЯ); 6, 7 — разные МД с равномерно легированным слоем GaAs.

сигнала ω проводимости G/ω от напряжения V для КДС (кривые 1–3) и для МД (кривая 4) на разных частотах. Видно, что приведенная активная составляющая проводимости G/ω на измеренных частотах оказывается меньше емкостной и практически не шунтирует емкость. В МД не наблюдалось частотной зависимости этих характеристик (кривая 4). Активная проводимость в них определялась объемным током через мезадиод и использовалась для определения профиля величины подвижности μ . В кольцевой структуре наблюдалась частотная дисперсия проводимости (кривые 1–3), что затрудняло использование зависимостей $G(V)$ для определения профиля величины μ . Частотная дисперсия $C(V)$ -характеристик практически исчезала на частотах меньше 100 кГц. Можно наблюдать совпадение этих кривых с зависимостями для МД в диапазоне напряжений до -6 В (кривые 1–4). При больших величинах обратного напряжения ($V < 0$) емкость КДС резко падает до нуля из-за полного обеднения электронами структуры в целом, в то время как для мезадиодов в этой области наблюдается более плавное падение до значения емкости, определяющей толщиной эпитаксиального слоя. Согласно этим результатам, можно предположить возможное совпадение профилей концентрации в δ -слое и квантовой яме в случае измерений для КДС при $f < 100$ кГц и МД, так как они располагаются относительно близко к границе раздела Au/GaAs и попадают в область практического совпадения $C(V)$ -кривых.

На рис. 3 изображены профили распределения концентрации и подвижности в разных мезадиодах и в кольцевой диодной структуре с δ -слоем. В образцах КДС с δ -слоем ($\sim 1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) наблюдается наличие одного острого пика концентрации $1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ на расстоянии 190 нм от поверхности с шириной на полувысоте 10 нм (кривая 5). Значения максимальной

концентрации, расстояние от поверхности и толщина δ -слоя не зависят от температуры и удовлетворительно согласуются с результатами измерений эффекта Холла и параметрами роста. Такой же результат был получен для аналогичного по структуре мезадиода. Для мезадиода с квантовой ямой, где δ -слой расположен над КЯ, наблюдалось раздвоение пика (кривая 1), вероятно связанное с перераспределением электронов между КЯ и δ -слоем. В структуре мезадиода, где квантовая яма расположена над δ -слоем, наблюдается только один пик концентрации (кривая 3), вероятно, из-за того, что направление электрического поля в барьере в этом случае не способствует оттоку электронов из δ -слоя в КЯ. Аналогичный эффект наблюдался в кольцевой диодной структуре с квантовой ямой при ее различном положении относительно δ -слоя. Максимуму концентрации в МД соответствует минимальная подвижность, которая увеличивается по обе его стороны (рис. 2, кривые 2, 4). Следует особо отметить, что значения подвижности оказываются выше для образцов, в которых квантовая яма расположена над δ -слоем. Это согласуется с результатами измерения подвижностей в эффекте поля в подобных структурах (см. таблицу). А усредненные по толщине значения подвижности оказывались близкими к значениям подвижности, измеренной в эффекте поля. На рис. 3 приведена типичная зависимость μ от d для мезадиода Шоттки с равномерно легированным Si слоем GaAs (кривая 6). Видно, что значения μ слабо зависят от толщины и близки к значениям подвижности в эффекте поля, которые обычно наблюдаются в таких слоях.

В кольцевых диодных структурах наблюдается зависимый профиль подвижности от частоты с максимумом, расположенным вблизи КЯ и δ -слоя (рис. 4). Подвижность падает с уменьшением частоты, что характерно для подвижности в эффекте поля при захвате на ловушки. Например, в кремниевых δ -слоях, встроенных в GaAs, наблюдалось образование ловушек при концен-

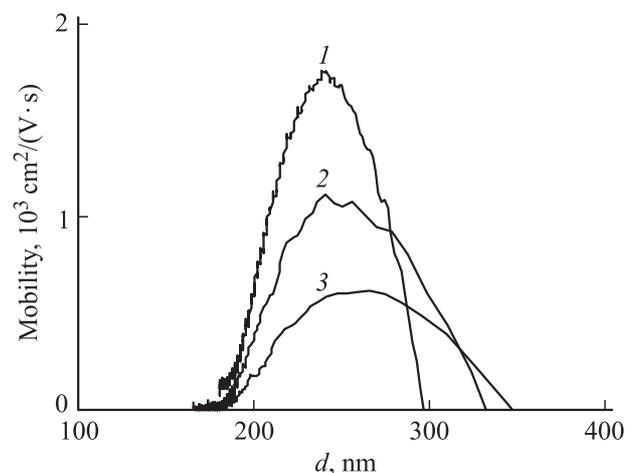


Рис. 4. Зависимости подвижности от координаты слоя d для разных частот. Образец а590- i . f , Hz: 1 — 10^6 , 2 — 10^5 , 3 — $5 \cdot 10^4$.

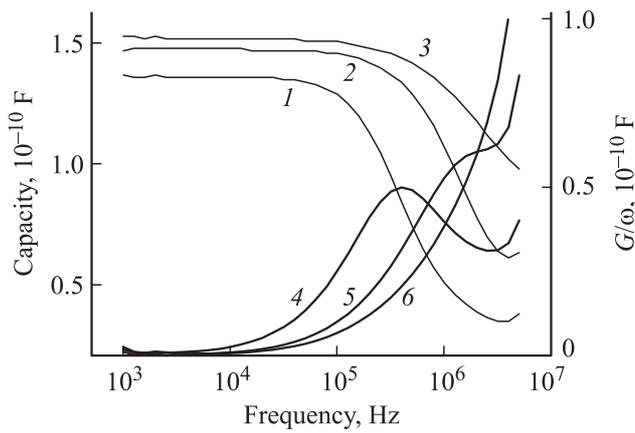


Рис. 5. Зависимости емкости C (1–3) и приведенной проводимости G/ω (4–6) от частоты f при разных обедняющих напряжениях для образца a589-i. $V < 0$, V : 1, 4 — 5; 2, 5 — 4; 3, 6 — 3.

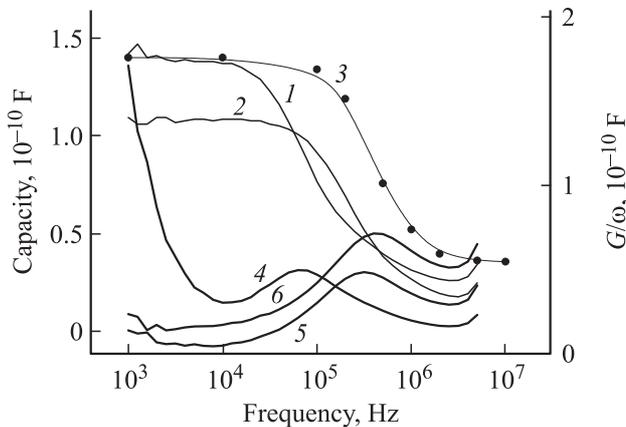


Рис. 6. Зависимости C (1–3) и G/ω (4–6) от частоты f при разных температурах в КДС с δ -слоем (a589-b) при $V = -5$ V. Точками отмечена теоретическая зависимость $C(f)$ при 300 K. T , K: 1, 4 — 77; 2, 5 — 244; 3, 6 — 300.

трациях выше $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [8]. Однако в нашем случае значения концентрации n_s были как минимум в 3 раза меньше. Кроме того, продольная подвижность в эффекте поля, измеренная методом Монгмери при фиксированном значении изгиба зон на поверхности, не проявляет частотной зависимости. Вместе с тем характер частотной зависимости не соответствует влиянию геометрии КДС. При данной геометрии проводимость структуры, а следовательно, и подвижность должны уменьшаться с ростом частоты [5]. На частотах 0.1–1 МГц значения подвижности в максимуме близки к значению μ_F (см. таблицу), а пик подвижности смещается в область локализации КЯ.

Для выяснения природы частотных зависимостей C и G/ω были проведены подробные измерения данных характеристик в кольцевых диодных структурах при различных обедняющих напряжениях и разных температурах. Результаты таких измерений представлены на

рис. 5 и 6. Кривые имеют классический вид ступенек вниз с ростом частоты для емкости и кривых с максимумом для G/ω для поляризационных кривых [9]. Эти зависимости качественно имеют такой же вид в случае захвата на поверхностные состояния [10] и объемные ловушки [11]. Наличие или отсутствие КЯ не оказывает влияния на данные характеристики.

Из рис. 5 и 6 видно, что с ростом обратного напряжения и понижением температуры ступеньки и максимумы смещаются в область более низких частот. Экспериментальные кривые $C(f)$ удовлетворительно описывались одним сортом релаксаторов во всем измеренном диапазоне температур 77–300 К. Как известно, в данном случае [9,10] можно записать выражение

$$C = C_\infty + \frac{C_0 - C_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (3)$$

где C_∞, C_0 — емкости на высокой и низкой частоте соответственно, а τ — время релаксации при установлении поляризации или захвата.

На рис. 6 представлены экспериментальные и теоретическая зависимость $C(f)$, построенная согласно выражению (3) при $T = 300$ К. При температуре 300 К наблюдается идеальное совпадение теории и эксперимента, при понижении температуры до $T = 77$ К совпадение ухудшается. Время релаксации τ для одного сорта релаксаторов (или моноуровня) может быть определено по значению частоты f_p в точке перегиба ступеньки зависимости емкости от частоты $C(f)$:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_p}. \quad (4)$$

Время релаксации может быть определено и по частоте, соответствующей максимуму в зависимости приведенной проводимости $G(f)/\omega$. Однако наличие утечки при малых напряжениях смещения приводит к заметному искажению как зависимостей приведенной проводимости $G(f)/\omega$ (рис. 5, кривая 3), так и самого значения частоты в максимуме. Таким образом, значения времени релаксации τ более точно определяются по емкостной характеристике. В интервале температур 300–460 К температурная зависимость τ не наблюдается. При понижении температуры от 300 до 77 К время релаксации увеличивается от $8 \cdot 10^{-8}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ с. Энергия активации E_τ , определяемая из зависимости $\ln \tau$ от обратной температуры ($1/T$), зависит от напряжения и увеличивается при его увеличении ($V = 3-5$ В) от 0.01 до 0.02 эВ соответственно. Столь малые значения E_τ , а также резкое увеличение времени релаксации с ростом напряжения свидетельствуют об отсутствии захвата на ловушки и, вероятно, о преобладании в этих условиях явления максвелловской релаксации [11], связанной с перемещением электронов из δ -слоя в полуизолятор. Данное явление не наблюдалось в мезадиодах с проводящей подложкой.

4. Заключение

Проведены сравнительные измерения адмиттанса в мезадиодах на n^+ -GaAs и в кольцевых планарных диодных структурах на i -GaAs с δ -слоем Si и квантовой ямой InGaAs/GaAs. Показана возможность определения профиля концентрации и подвижности электронов вблизи δ -слоя Si и квантовой ямы InGaAs из анализа совместных измерений вольт-фарадных и вольт-симменсных характеристик в мезадиодах. В аналогичных по конфигурации слоях в кольцевых диодных структурах на i -GaAs при использованной геометрии возможно было только надежное определение профиля концентрации. Обнаружено влияние относительного взаимного расположения КЯ и δ -слоя на профиль концентрации электронов и значения подвижности. Переходные процессы в кольцевых диодных структурах на i -GaAs при подаче обратного напряжения на управляющий электрод объяснены явлением максвелловской релаксации.

Работа выполнена при поддержке грантов CRDF BR4MO1, Министерства образования 2.2.2.4297 и РФФИ (проекты № 02-00501-а, 12-02-01040-а и 11-02-90454-Укр_ф_а).

Список литературы

- [1] Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский и др. ФТП, **46** (4), 500 (2012).
- [2] В.И. Шашкин, Ф.В. Мурель. ФТП, **42** (4), 500 (2008).
- [3] С.В. Тихов, И.А. Карпович и др. Тез. докл. XV Междунар. симп. „Нанозфизика и нанозфотоника“ (Н. Новгород, 2011) с. 365.
- [4] В.И. Зубков. Приложение к журналу „Вестник РГРТУ“, № 4, ISSN 1995 (Рязань, 2009).
- [5] В.В. Русаков, Г.Н. Травлесев. Микроэлектроника, **8** (2), 177 (1979).
- [6] С.В. Тихов, Н.В. Байдусь и др. Тез. докл. XV Междунар. симп. „Нанозфизика и нанозфотоника“ (Н. Новгород, 2011) с. 399.
- [7] Г.И. Пека. Физика поверхности полупроводников (Киев, Изд-во Киев. ун-та, 1967) с. 192.
- [8] В.А. Алешкин, В.М. Данильцев и др. ФТП, **32** (6), 733 (1998).
- [9] П.Т. Орешкин. Физика полупроводников и диэлектриков. Учебное пособие для вузов (М., Высш. шк., 1977) с. 448.
- [10] В.Н. Овсяк. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда (Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1984) с. 252.
- [11] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках (Л., Наука, 1981) с. 281.

Редактор Т.А. Полянская

Electron concentration and mobility in area of Si- δ -doping layer and quantum well in InGaAs/GaAs heterostructure

S.V. Tikhov, N.V. Baidus*, A.A. Biryukov*, S.V. Khazanova

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603050 Nizhni Novgorod, Russia

* Physico-Technical Research Institute of Lobachevsky State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Admittans measurements for a mezadiodes on n^+ -GaAs and for a ring planar diode structures on i -GaAs, contained of a Si δ -layer and a InGaAs/GaAs quantum well are presented. Determination of the electron concentration profile and electron mobility in area of the Si- δ -layer and the quantum well from analysis of simultaneously measured capacitance-voltage and conductivity-voltage characteristics in mezadiodes is shown. For ring diode structures on i -GaAs of the same configuration and the same geometry we can determinate only a concentration profile. Effect of relative position of the quantum well and δ -layer on the concentration profile and on the mobility is studied. Also Maxwell relaxation phenomenon for the ring diode structures on i -GaAs are discussed.