

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА общей физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

«ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЛОТНОСТИ
ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ,
ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ»

Выполнил студент

405 группы

Деев Петр Михайлович

научный руководитель:

доцент Боков Павел Юрьевич

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____

Москва

2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	2
Глава 1. АРСЕНИД ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО- СПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ.	3
1.1 Арсенид галлия, выращенный при низких температурах.....	3
1.2 Эффект Франца-Келдыша	8
1.3 Виды электромодуляционных спектров	9
1.4 Спектроскопия фотоотражения полупроводников	12
1.5 Цели и задачи работы.....	14
Глава 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ.	15
2.1 Методика эксперимента.....	15
2.2 Модернизация установки.....	16
2.3 Исследуемые образцы	18
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.	21
3.1. Результаты и обсуждение.....	21
3.2 Деформационно-индуцированные изменения в спектрах ФО.....	22
3.3 Плотность поверхностных состояний на гетероинтерфейсе GaAs/Si ...	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
Список литературы	29

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы интеграции кремниевой электроники с арсенид-галлиевой оптоэлектроникой остаются так и не разрешенными даже на уровне создания прототипов интегрированных приборов. Не последнюю роль в этом играют недостатки имеющихся технологий выращивания, например, арсенида галлия на кремнии, и постростовой обработки образцов.

В данной работе приведены результаты исследования методом спектроскопии фотоотражения деформаций и плотности зарядовых состояний слоев GaAs, выращенных при низких температурах методом молекулярно-лучевой эпитаксии на арсенид галлиевых и кремниевых подложках с ориентацией поверхности (100). Образцы в серии отличались технологиями подготовки подложек к росту и режимами отжига.

Глава 1. АРСЕНИД ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ.

1.1 Арсенид галлия, выращенный при низких температурах.

Арсенид галлия, выращенный при низких температурах LTGaAs (LT - low temperature), является одним из перспективных элементов современной электроники. Низкими температурами в этом случае считаются температуры меньшие 500 °С, в то время как классический рост происходит при температурах 800 – 1100 °С. Рост при низких температурах позволяет уменьшить плотность дислокаций несоответствия, как правило, возникающих при охлаждении полупроводниковой структуры от температур роста до комнатной температуры. Это означает, что слои арсенида галлия можно выращивать, например, на более дешевых, в сравнении с арсенид галлиевыми подложками, подложках из кремния.

Предсказывается развитие технологий, в которых кремниевая электроника интегрирована с арсенид-галлиевой оптоэлектроникой. Технологически это обозначает создание монолитно-интегрированных элементов оптической связи в кремниевых интегральных схемах и терагерцовой техники [1].

Современные технологии позволяют выращивать GaAs при $t < 300$ °С, тем самым минимизируя механическое напряжение в слоях GaAs, вызванное охлаждением до комнатной температуры. Для повышения кристаллического совершенства слои GaAs, выращенные при низких температурах, подвергают отжигу.

Ключевую роль [2] в формировании многих уникальных свойств LT-GaAs, играет избыток мышьяка, захватываемый в процессе низкотемпературной молекулярно лучевой эпитаксии. Показано [3], что

LT-GaAs обладает рекордно малыми временами жизни носителей и может быть использован для целей терагерцовой электроники. Причиной ультрамалого времени жизни неравновесных носителей заряда [3] является наличие большой концентрации избыточного мышьяка в LT-GaAs. Сразу после низкотемпературной эпитаксии избыток мышьяка находится в решетке GaAs в виде точечных антиструктурных дефектов. Анализ возможных механизмов релаксации и рекомбинации показал, что время жизни носителей заряда в неотожженном LT-GaAs определяется их захватом на заряженные точечные дефекты, связанные с избытком мышьяка.

В работе [4] показано, что путем дельта-легирования индием двумерные слои кластеров мышьяка могут быть сформированы в матрицах GaAs, равномерно легированных как мелкими донорами Si, так и мелкими акцепторами Be. Замечено, что двумерные слои кластеров мышьяка, по своему пространственному положению в точности соответствуют положению дельта-слоев индия, причем качественно сходная картина наблюдается и в GaAs, легированном донорами Si и акцепторами Be. Из полученных данных делается вывод о том, что в LT-GaAs возможно формирование проводящих каналов, разделенных тонкими слоями кластеров As.

Слои арсенида галлия, выращенные на кремнии, подвержены деформациям сжатия ($a_{GaAs} = 0,5653$ нм; $a_{Si} = 0,5431$ нм). Кроме того низкотемпературный рост сопровождается повышенной плотностью точечных дефектов. Совершенствование структур, выращенных при низких температурах, связано с минимизацией как плотности точечных дефектов, так и механических напряжений.

Локальная неоднородность современных полупроводниковых приборов в первую очередь обусловлена малостью размеров отдельных их

частей. Это означает, что исследование свойств отдельных частей полупроводниковых приборов возможно проводить лишь с использованием методик, обладающих высокими локальностью и чувствительностью. Например, методами оптической спектроскопии.

Современные методики исследования спектральных свойств полупроводниковых материалов позволяют получить практически важную информацию как об их оптических, так и об их структурных свойствах. К числу наиболее интенсивно используемых методов исследования относят спектроскопию люминесценции и спектроскопию комбинационного рассеяния света.

В статье [5] методом рекомбинационного рассеяния изучались слои арсенида галлия, выращенные методом МЛЭ в низкотемпературном режиме. Концентрация избытков мышьяка в образцах составила $0,04 \cdot 10^{20} - 1,175 \cdot 10^{20}$ частиц/см⁻³. Было замечено, что интенсивность запрещенного комбинационного рассеяния возрастает как функция концентрации избытка мышьяка, для всех нестехиометрических образцов. Для образцов, обладающих стехиометрическим равновесием, большое запрещенное рекомбинационное рассеяние связано с дислокациями и дефектами упаковки, тогда как высокое структурное совершенство образцов с мышьяком сохраняется даже при его максимальных концентрациях.

Анализ сдвигов частоты оптических фононов [6] в слоях LT-GaAs показал, что необходимо учитывать два основных эффекта: деформацию, обусловленную избытком As, и возникающую в результате несоответствия с подложкой, и электронное экранирование частоты за счет плазменных эффектов. Была продемонстрирована возможность использования метода комбинационного рассеяния при использовании

соответствующих экспериментальных условий для получения информации о деформации и избытке As в слоях LT-GaAs.

В работе [1] приведены результаты исследования методом фотолюминесценции образцов LT-GaAs/GaAs(100), отожженных при температурах 520°C и 580°C и образцов LT-GaAs/GaAs(100) с δ -легированными слоями Si, отожженных при тех же температурах. Измерения спектров фотолюминесценции проводилось при температуре 77 К. Показано, что в спектрах фотолюминесценции наблюдаются пики вблизи энергии фотонов 1,48 эВ, что свидетельствует об оптическом переходе между донорными и акцепторными состояниями атомов кремния (комплексами) $Si_{Ga} - Si_{As}$, возникающими в LT-GaAs. При этом для образцов, отожженных при более высокой температуре, амплитуда пиков больше, чем для образцов, отожженных при меньшей температуре. При энергии фотонов 1,28 эВ, обнаружен пик, связанный с рекомбинацией носителей между заряженными центрами $Si_{Ga} - V_{Ga}$. Введение слоев кремния привело к уменьшению времени жизни неравновесных носителей, что может быть связано с образованием дополнительных точечных дефектов Si_{Ga} , Si_{As} , а также комплексов на основе атомов кремния.

Авторами статьи [7] было выращено 2 серии LT-GaAs: легированная Si и нелегированная. LT-GaAs был подвергнут трем исследованиям: фотоотражению, фотолюминесценции и рентгеновскому излучению. Вид спектров фотолюминесценции вблизи энергии запрещенной зоны для обоих типов образцов LT-GaAs зависит от температуры подложки. С уменьшением температуры подложки от 550°C до 350°C интенсивность линий резко уменьшается. В спектрах фотоотражения при приближении к температуре 350°C сверху также заметно усиливающееся влияние дефектов. Поэтому был сделан вывод о том, что комбинация этих исследований дает информацию о механических напряжениях в решетке GaAs и о плотности структурных дефектов.

Методом фотолюминесценции и фотоотражения в [8] исследовалась серия четырехслойных образцов, состоящих из буферного слоя LT-GaAs, слоя AlGaAs толщиной 150 Å, слоя AlGaAs толщиной 350 Å, легированного Si и слоя LT-GaAs толщиной 50 Å, легированного Si. Образцы в серии отличались друг от друга температурой роста: 350 °C, 300 °C, 250 °C соответственно. В спектре фотолюминесценции образца, изготовленного при 350 °C, было замечено наличие нескольких пиков вблизи края поглощения LT-GaAs. В образцах, выращенных при более низких температурах, таких особенностей замечено не было, что говорит о том, что в них наблюдается большая плотность дефектов, приводящих к росту скорости безызлучательной рекомбинации. В спектрах фотолюминесценции наблюдается изменение, произошедшее после стравливания двух верхних слоев структуры. Форма и количество пиков вблизи края поглощения увеличилось. Это может свидетельствовать о том, что излучение формируется в структуре, в том числе на границах слоев.

Трудности исследования оптических свойств слоев LT-GaAs на Si методами спектроскопии поглощения или отражения сопряжены с невысоким кристаллическим совершенством, связанным с дислокациями несоответствия, преципитатами As и термическими напряжениями [9-10], приводящими к уширению спектральных линий. Для исследования полупроводниковых структур со слабовыраженными особенностями в спектрах поглощения или отражения используют методы модуляционной спектроскопии, в числе которых метод спектроскопии фотоотражения [11]. Модуляция электрического поля приводит вследствие эффекта Франца-Келдыша, к изменению отражательной способности полупроводника и, тем самым, к образованию электромодуляционных компонент спектров фотоотражения.

1.2 Эффект Франца-Келдыша

Теория поглощения света полупроводниками вблизи фундаментального перехода была разработана Францем [12] и Келдышем [13]. Они теоретически предсказали смещение края поглощения света в сторону меньших энергий. Кратко этот эффект может быть описан следующим образом: в присутствии электрического поля энергетические зоны полупроводника приобретают наклон, вследствие чего электрон из валентной зоны может туннелировать в зону проводимости. С увеличением напряженности электрического поля уменьшается эффективная толщина потенциального барьера, поэтому увеличивается вероятность туннелирования электрона, поэтому уменьшение толщины барьера, обусловленное наличием внешнего электрического поля, равносильно уменьшению ширины запрещенной зоны полупроводника (рис. 1).

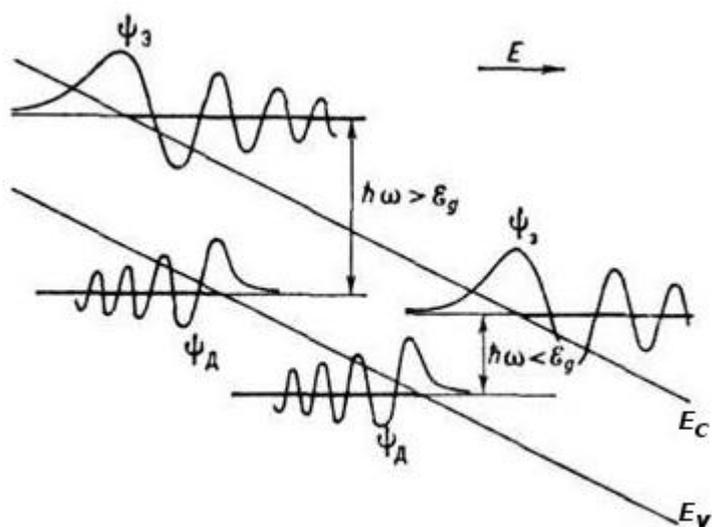


Рис. 1. Зонная диаграмма полупроводника в электрическом поле, волновые функции электронов и дырок, поясняющие эффект Франца-Келдыша ($\hbar\omega < E_g$) и наличие осцилляций при $\hbar\omega > E_g$

Тармалингэм развил теорию Франца-Келдыша для всего диапазона энергий, предсказав осцилляции при энергии, большей энергии

запрещенной зоны, так как эти осцилляции связаны с особенностями движения электронов вблизи дна зоны проводимости и дырок вблизи потолка спин-орбитально отщепленной подзоны валентной зоны. В отсутствие электрического поля край поглощения совпадает с шириной запрещенной зоны. В случае приложения к полупроводнику электрического поля, форма спектра меняется (рис. 2а). Дифференциальный спектр $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(E) = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\alpha_{cp}}$ имеет резкий пик при энергии запрещенной зоны E_g , быстро затухает ниже E_g и осциллирует выше E_g (рис. 2б)

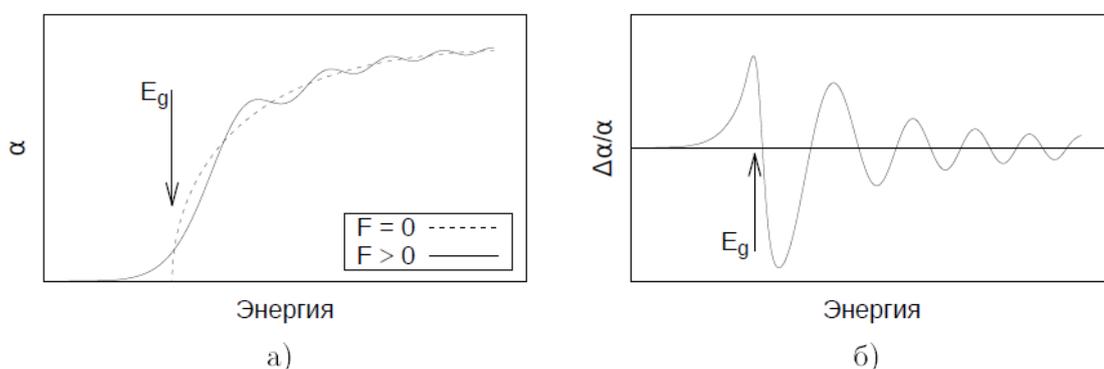


Рис. 2. а) Спектры поглощения образца при отсутствии электрического поля (штриховая линия) и в присутствии электрического поля (сплошная линия). б) Дифференциальный спектр поглощения полупроводника

1.3 Виды электромодуляционных спектров

В работах Аспнеса по электроотражению [14] было замечено, что вид спектров сильно зависит от напряженности встроенного в полупроводник электрического поля. Напряженность встроенного электрического поля зависит в том числе от концентрации примеси. Было экспериментально доказано [14] что модуляционный спектр слаболегированных образцов ($n, p < 10^{16} \text{см}^{-3}$) представляет собой линию с двумя экстремумами разных знаков (рис. 3). Эта линия соответствует так называемому низкополевому случаю электроотражения.

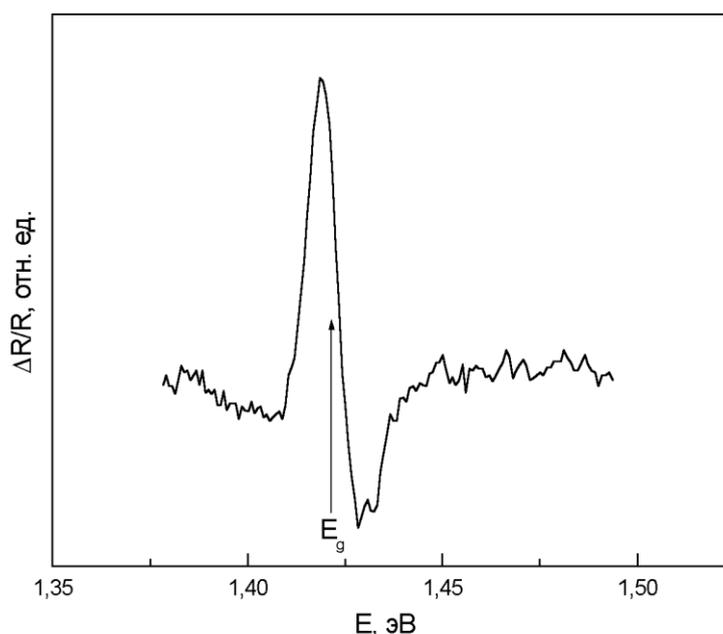


Рис. 3. Спектр фотоотражения полуизолирующей подложки GaAs в области фундаментального перехода. Спектр получен в лаборатории д.ф.-м. н., профессора Л. П. Авакянца

Низкополевой спектр описывают формулой Аспнеса[14]:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \text{Re} \left[A e^{i\varphi} (E - E_g + i\Gamma)^{-m} \right], \quad (1)$$

где A , φ - амплитудный и фазовый параметры, E – энергия зондирующего излучения, E_g – ширина запрещенной зоны, Γ – феноменологический параметр уширения, m – параметр, зависящий от типа критической точки, в окрестности которой совершается электронно-дырочный переход, и порядка производной диэлектрической функции $\varepsilon(E)$ по энергии. Экспериментально установлено [15], что для трехмерной критической точки $m = 2.5$ и соответствует первой производной диэлектрической функции $\varepsilon(E)$. Значение $m = 1$ соответствует первой производной для двумерной критической точки; $m = 2$ – первой производной экситонной $\varepsilon(E)$ с лоренцовым профилем поглощения, $m = 3$ – третьей производной для двумерной критической точки, что эквивалентно первой производной экситонной линии с гауссовым профилем поглощения.

Электромодуляционный спектр образцов, концентрация примесей в которых $n, p > 10^{16} \text{ см}^{-3}$, представляет собой множество осцилляций разных знаков. Эти осцилляции носят название осцилляций Франца-Келдыша. В этом случае форму спектральных линий называют среднеполевой (рис. 4).

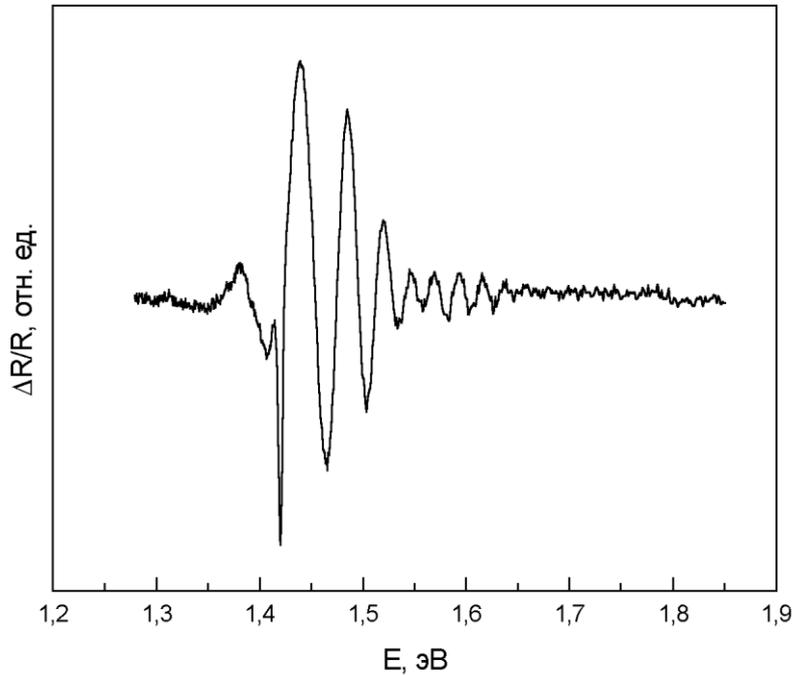


Рис. 4. Спектр фотоотражения легированной пленки $n\text{-GaAs}$ в области фундаментального перехода - осцилляции Франца-Келдыша. Спектр получен в лаборатории д.ф.-м. н., профессора Л. П. Авакянца

Форма спектральных особенностей $\Delta R/R$ в среднеполевом случае описывают в терминах электрооптических функций Эйри:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \alpha_{lh} \cdot G \left[\frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega_{lh}} \right] + \alpha_{hh} \cdot G \left[\frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega_{hh}} \right], \quad (2)$$

где α_{lh}, α_{hh} - коэффициенты, определяющие вклад в модуляционный спектр межзонных переходов с участием подзон легких (lh) и тяжелых дырок (hh), $G(x)$ - определяется через функции Эйри Ai, Bi и их производные:

$$G(x) = \pi \cdot [Ai'(x) \cdot Bi'(x) - x \cdot Ai(x) \cdot Bi(x)] + \sqrt{x} \cdot H(x) + i\{\pi[Ai'^2(x) - x \cdot Ai^2(x)] - \sqrt{-x} \cdot H(-x)\}, \quad (3)$$

где $H(x)$ – функция Хевисайда, $\hbar\Omega$ – электрооптическая энергия:

$$\hbar\Omega = \left(\frac{e^2 \cdot E_s^2 \cdot \hbar^2}{8 \cdot \mu^3} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

здесь μ – приведенная межзонная эффективная масса:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}, \quad (5)$$

m_e^*, m_h^* – эффективные массы электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне, E_s – модуль вектора напряженности встроенного поля.

Анализ среднеполевых спектров с помощью представлений (2-3) сложен, поэтому Аспнес и Штудна предложили следующее приближение [11]:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) \propto \cos \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi(d-1)}{4} \right], \quad (6)$$

где $\hbar\omega$ – энергия зондирующего излучения, $\hbar\Omega$ – электрооптическая энергия, d – размерность критической точки. В случае GaAs для прямых межзонных переходов в центре зоны Бриллюэна $d = 3$.

При регистрации спектров электроотражения электрическое поле в полупроводнике модулируется приложением к разным частям полупроводника разности потенциалов. Возможна и иная модуляция встроенного электрического поля, например изменением концентрации носителей. Она реализована в методе фотоотражения.

1.4 Спектроскопия фотоотражения полупроводников

Метод спектроскопии фотоотражения является бесконтактным, неразрушающим, не требует специальной подготовки образца, но при этом отличается разнообразием трудно интерпретируемой информации, содержащейся в спектре. Модуляция встроенного электрического поля осуществляется периодической подсветкой образца излучением с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны. В качестве модулирующего устройства обычно используют лазерное излучение

необходимой длины волны и механический прерыватель. Из-за характерной для полупроводников АЗВ5 стабилизации уровня Ферми на поверхности образца, вблизи неё формируется слой, обедненный носителями. Приповерхностные состояния заполняются электронами из объёма полупроводника, формируя изгиб зон. В этой приповерхностной области формируется встроенное электрическое поле [16, с. 403–405]. Создаваемые лазером электронно-дырочные пары разводятся этим полем: дырки движутся в направлении поверхности, где частично нейтрализуют имеющийся там заряд, а электроны уходят вглубь образца. В результате напряженность встроенного электрического поля в полупроводнике уменьшается и становится равной $F - \Delta F$, где F — модуль вектора напряженности встроенного электрического поля полупроводника, а ΔF — его изменение, вызванное воздействием лазерного излучения [11].

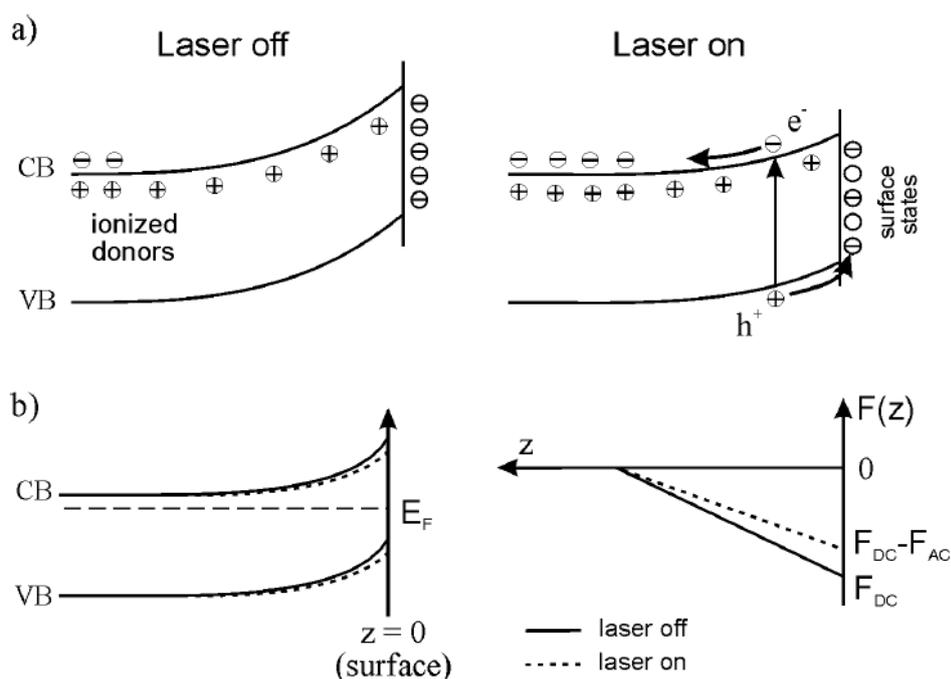


Рис. 5. Схема модуляции электрического поля в полупроводнике при наличии лазерного возбуждения [16]

1.5 Цели и задачи работы

Целью данной работы было исследование зарядовых состояний и механических напряжений LT-GaAs, выращенных на Si и GaAs по результатам анализа спектров фотоотражения.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Модернизация экспериментальной установки с целью улучшения соотношения «сигнал/шум».
2. Измерение спектров фотоотражения серии образцов LT-GaAs на Si и GaAs, с использованием модуляции на разных длинах волн.
3. Оценка механических деформаций слоев LT-GaAs по сдвигам линий в спектре фотоотражения.
4. Заключение об основном источнике встроенных электрических полей в структурах LT-GaAs/Si.

Глава 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ.

2.1 Методика эксперимента

Спектры фотоотражения регистрировались на автоматизированной установке с использованием двойного монохроматора [17], представленной на рис. 6. В качестве источника зондирующего излучения использовалось излучение лампы накаливания (мощность 50 Вт). В качестве модулирующего – линия 532 нм DPSS лазера (мощность 7 мВт) или 633 нм He-Ne лазера (мощность 7 мВт). Излучение с разными длинами волн применялось для зондирования по толщине структуры. Частота модуляции составляла 500 Гц. Ширина аппаратной функции спектрометра не превышала 1 мЭВ. Регистрация спектров фотоотражения осуществлялась при комнатной температуре.

Излучение лампы накаливания 1 (мощность 50 Вт), фокусировалось оптической системой 2 на входной щели монохроматора 3(I). Пройдя через монохроматор, излучение фокусировалось оптической системой 4 на образце 5, отражалось от него и через оптическую систему 6 попадало во входную щель второго монохроматора 3(II). Излучение регистрировалось фотодиодом 7, подключенным к усилителю сигнала фотодиода. Сигнал с усилителя сигнала фотодиода через предварительный усилитель поступал на синхронный детектор 8.

Луч лазера 10, прошедший через механический прерыватель 11, отражался от зеркала 12 и поступал на образец 5, в ту же область, в которую поступало излучение из выходной щели монохроматора 3(I). Отраженный от образца 5 луч лазера направлялся на фотодиод 13 для формирования опорного напряжения в синхронном детекторе 8. Измеренный синхронным детектором сигнал через микропроцессорный блок сопряжения поступал на персональный компьютер 9.

В измерениях использовался синхронный детектор UNIPAN 232В с предусилителем UNIPAN 233В. Измерения проводились при

чувствительностях синхронного детектора 30 мкВ и 100 мкВ. Одновременно с разностным сигналом ΔR , выделяемым синхронным детектором, измерялся сигнал, соответствующий спектру отражения R .

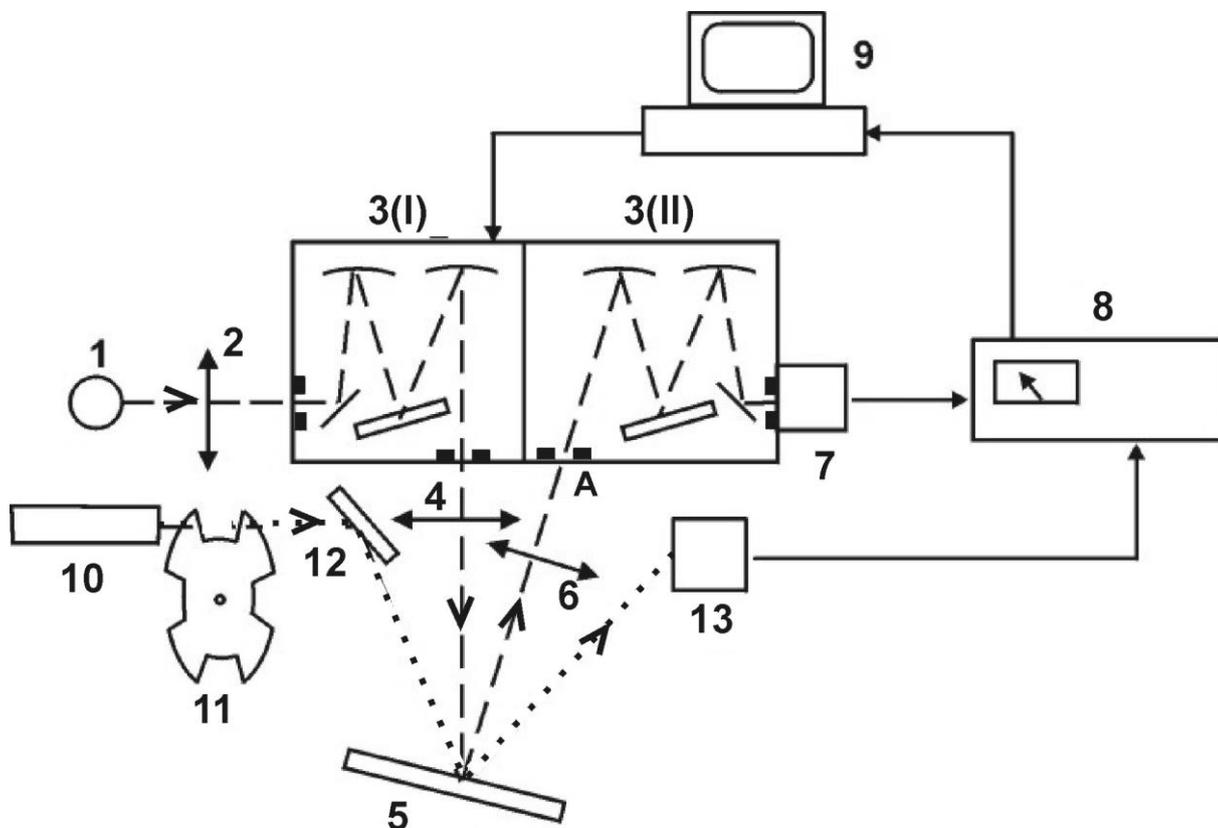


Рис. 6: Схема экспериментальной установки. 1 – лампа накаливания, 2, 4, 6 – фокусирующие оптические системы, 3(I), 3(II) – монохроматоры, 5 – образец, 7 – фотодиод с усилителем, 8 – синхронный детектор, 9 – персональный компьютер, 10 – лазер, 11 – прерыватель, 12 – зеркало, 13 – фотодиод опорного сигнала

2.2 Модернизация установки

По оценкам сигнал фотоотражения от слоев LT-GaAs на Si ожидается слабым, в сравнении с сигналом от полуизолирующей подложки GaAs АГП. Для уверенного измерения сигнала фотоотражения от слоев LT-GaAs/Si(100) необходимо улучшить соотношение сигнал/шум измерительной части экспериментальной установки. Одним из источников шума при измерении спектров фотоотражения является шум усилителя

сигнала фотодиода, источник питания которого – сетевой выпрямитель со стабилизатором. Для питания этого усилителя необходимо напряжение $\pm 12 В$. Сигнал на выходе фотодиода составляет единицы микровольт, поэтому усилитель сигнала фотодиода необходимо запитывать от высокостабильного источника питания.

Для проверки необходимости смены источника питания усилителя сигнала фотодиода были проведены серии измерений: моделировался процесс измерения сигнала фотоотражения на одной из длин волн, находящейся вдали от источника сигнала (чтобы измеряемое напряжение максимально соответствовало нулевому уровню). Сигнал с выхода синхронного детектора многократно измерялся и усреднялся по числу проведенных измерений. Проведенные измерения с питанием от сетевого выпрямителя со стабилизатором и от кислотных аккумуляторов показали (рис. 8), что дисперсия выборочного среднего в случае питания от аккумуляторов меньше в 2-2,5 раза аналогичного значения, полученного при питании от сети. Кроме того дисперсии выборочных средних оказались совпадающими при усреднении по 10 значениям в случае питания от аккумулятора и 40 – при питании от сети. Таким образом, питание усилителя сигналов фотодиодов от аккумулятора, оказывается более предпочтительным.

В дальнейшем все измерения проводились при питании усилителя сигнала фотодиода от пары кислотных аккумуляторов, обеспечивающих напряжения питания $\pm 12В$.

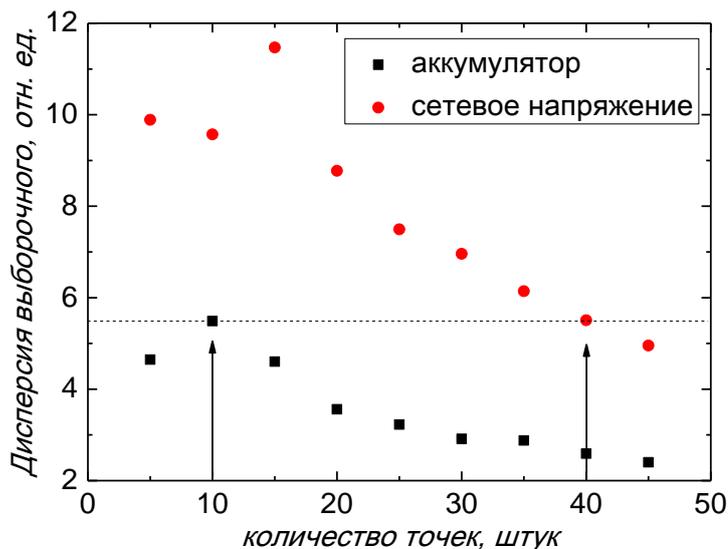


Рис. 8. Зависимость дисперсии выборочного среднего от количества точек в выборке при измерении с питанием усилителя от сети (круги) и с питанием от аккумуляторов (квадраты)

2.3 Исследуемые образцы

Для исследования была выбрана серия образцов LT-GaAs, выращенных на подложках кремния (№481 и №505) и арсенида галлия (№480 и №544). Слои LT-GaAs выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке ЦНА-25 в научной группе ведущего научного сотрудника доктора физико-математических наук И.П. Казакова (ФИРАН). Структура образцов LT-GaAs/GaAs и LT-GaAs/Si представлена на рис.7.

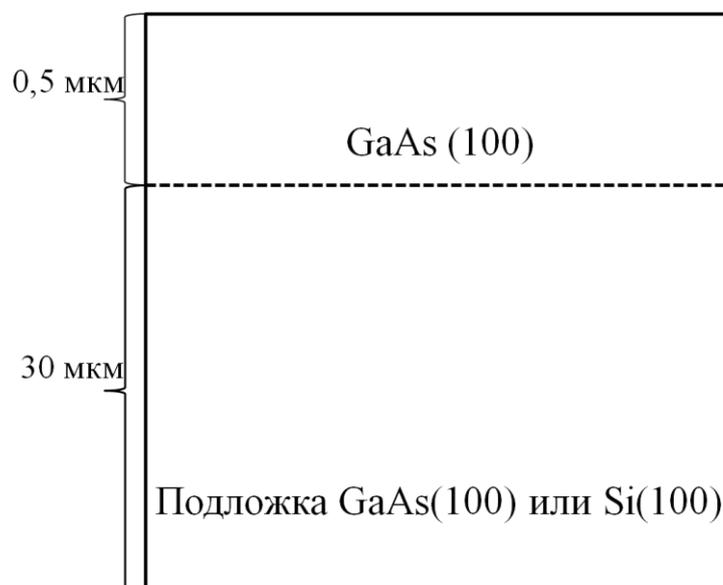


Рис. 7. Структура образцов *LT-GaAs/Si(100)* и *LT-GaAs/GaAs(100)*

При изготовлении образца № 481 перед загрузкой в установку молекулярно-лучевой эпитаксии поверхность подложки Si (100) (разориентированная на 4° в направлении (011)) травилась химически в смеси $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1), а затем пассивировалась в смеси $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:6) [11]. В ростовой камере проводился отжиг подложки Si в парах As_4 при температуре $t_s = 700^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. Затем температура t_s опускалась до 270°C , и выращивался слой LT-GaAs толщиной 0.5 мкм со скоростью 0.18 нм/с при эквивалентных давлениях паров $p(\text{Ga}) = 3 \cdot 10^{-7}$ торр и $p(\text{As}) = 5 \cdot 10^{-6}$ торр. После окончания роста температура t_s повышалась со скоростью $0.2^\circ\text{C}/\text{с}$, и производился отжиг структуры при температуре $t = 600^\circ\text{C}$ в течение 6 мин.

При изготовлении образца № 505 использовалась подложка Si(100), разориентированная на 4° в направлении (011), которая не подвергалась химической очистке. В установке «Катунь» производилась десорбция естественного окисла в парах Si при $t_s = 850^\circ\text{C}$, а затем наращивался буферный слой Si толщиной 200 нм. После остывания наносился слой Sb, который предохранял поверхность Si от окисления при переносе образца в установку ЦНА-25. Затравливание слоя LT-GaAs производилось при

$t_s = 270$ °C импульсным осаждением по 1–2 монослоя до толщины ~ 3 нм. Далее, при той же t_s , выращивался слой LT-GaAs толщиной 0.5 мкм и производился отжиг структуры при температуре $t_s = 600$ °C в течение 10 мин.

Контрольные образцы LT-GaAs № 480 и LT-GaAs №544 выращивались на подложке GaAs (100). После обычной процедуры десорбции окисла, в образце № 481 выращивался буферный слой GaAs при $t_s = 580$ °C толщиной 200 нм, а затем – слой LT-GaAs при $t_s = 270$ °C толщиной 0,5 мкм. Отжиг образца при повышенной температуре не проводился. Образец №544 выращивался аналогично, но толщина слоя LT-GaAs составляла 1 мкм, а после роста проводился отжиг при $t_s = 600$ °C в течение 10 мин.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

3.1. Результаты и обсуждение.

Спектры фотоотражения исследуемых образцов приведены на рис. 9. Видно, что амплитуда сигнала фотоотражения образцов № 480 и № 544 (выращены на GaAs) больше, а ширина линий фотоотражения меньше, в сравнении со спектрами образцов № 481 и № 505 (выращены на Si). Меньшая амплитуда и большая ширина линии фотоотражения свидетельствует о меньшем структурном совершенстве слоев Si/LT-GaAs по сравнению со слоями LT-GaAs/GaAs. Во всех спектрах присутствуют линии в области энергий 1.37-1.43 эВ (E_g), связанные с фундаментальным переходом GaAs, и линии в области энергий 1.7 – 1.8 эВ ($E_g + \Delta_{so}$), связанные с переходом между дном зоны проводимости и спин-орбитально отщепленной подзоной валентной зоны. При этом для образцов №481 и №505, выращенных на кремнии, амплитуда линий $E_g + \Delta_{so}$ сопоставима с амплитудой линий E_g .

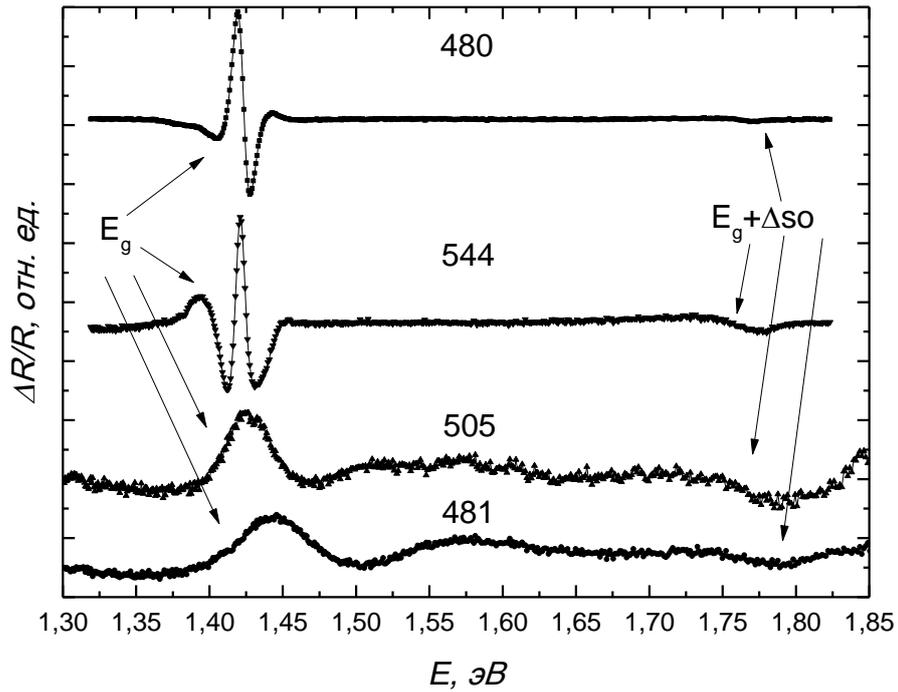


Рис. 9. Спектры фотоотражения образцов №480(LT-GaAs/GaAs), №544, №505(LT-GaAs/Si), №481, зарегистрированные при модуляции излучением на длине волны 532 нм

3.2 Деформационно-индуцированные изменения в спектрах ФО

Положения экстремумов осцилляций Франца-Келдыша $(\hbar\omega)_j$ даются выражением:

$$(\hbar\omega)_j = \hbar\Omega(F_j) + E_g, \quad (7)$$

$j=1, 2, 3$, где

$$F_j = \left[3 \cdot \pi \frac{j-1}{2} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (8)$$

Как видно из (7-8), зависимость $(\hbar\omega)_j$ от F_j представляет собой прямую с наклоном $\hbar\Omega$ и точкой пересечения оси ординат, равной E_g . Для образцов №481 и №505 было сделано построение зависимости $(\hbar\omega)_j$ от F_j .

В пределах погрешности определения точек можно считать, что они лежат на одной прямой. Результат построения приведен на рис. 10.

МНК-анализ графика показывает, что линия E_g сдвинута в область меньших энергий, до 1.36 эВ.

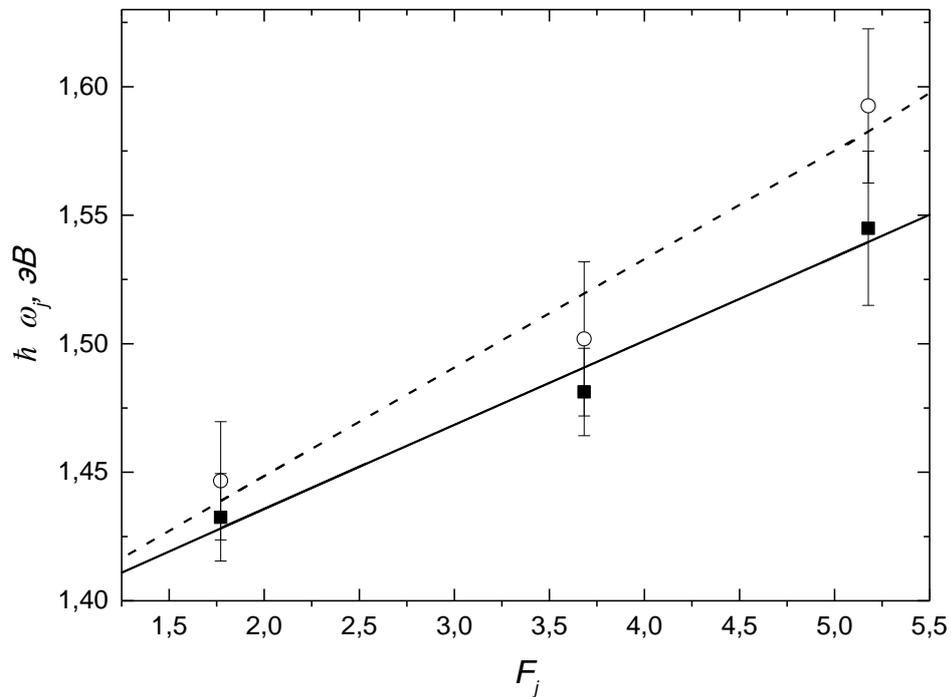


Рис. 10. Зависимость $\hbar\omega_j(F_j)$, круги – образец №481, квадраты – образец №505, прямые – результат МНК-аппроксимации

Линия в области 1,76 эВ представляет собой структуру с двумя экстремумами разных знаков (1). Из МНК-аппроксимации в рамках модели Аспнеса обнаружено, что линия $E_g + \Delta s_0$ сдвинута в область больших энергий, до 1.81 эВ.

Указанные сдвиги линий характерны для слоев GaAs, подверженных деформациям сжатия [12-13]. Деформационно-индуцированные сдвиги зоны проводимости ΔE_c и подзон тяжелых ΔE_{hh} и легких ΔE_{lh} дырок валентной зоны в центре зоны Бриллюэна определяются из соотношений [18-19]:

$$\epsilon = \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad (9)$$

$$\Delta(E_g) = A_1 \epsilon, \quad (10)$$

$$\Delta(E_g + \Delta so) = A_3 \epsilon, \quad (11)$$

$$A_1 = -2a \frac{c_{11} - c_{12}}{c_{11}} + b \frac{c_{11} + 2c_{12}}{c_{11}}, \quad (12)$$

$$A_3 = -2a \frac{c_{11} - c_{12}}{c_{11}}. \quad (13)$$

здесь ϵ — относительная деформация слоя, a_1 , a_2 — постоянные кристаллической решетки слоев GaAs и Si, a — гидростатический деформационный потенциал для зоны проводимости, b — потенциал одноосных деформаций, C_{11} , C_{12} — упругие постоянные. Используемые в моделировании параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры, используемые в моделировании, взяты из работы [20].

$a_1 \text{ \AA} (\text{GaAs})$	$a_2, \text{ \AA} (\text{Si})$	$a_v, \text{ эВ}$	$b, \text{ эВ}$	$C_{11}, \text{ Па}$	$C_{12}, \text{ Па}$
5.6533	5.4311	-8.3	-1.7	$11.9 \cdot 10^{11}$	$5.38 \cdot 10^{11}$

В рамках модели (9-13) с учетом наблюдаемых сдвигов спектральных линий оценены относительные деформации слоев LT-GaAs. Они составили $\epsilon(E_g + \Delta so) = 0.0085 \pm 0.0017$, $\epsilon(E_g) = 0.0066 \pm 0.0011$ для образца №481 и $\epsilon(E_g + \Delta so) = 0.0086 \pm 0.0017$, $\epsilon(E_g) = 0.0065 \pm 0.0011$ для образца №505, что коррелирует с литературными данными для такого вида структур [19].

3.3 Плотность поверхностных состояний на гетероинтерфейсе GaAs/Si

Наклон зависимостей $(\hbar\omega)_j$ от F_j (рис. 11) позволил оценить значения электрооптической энергии и напряженности встроенных электрических полей в образцах. Последние составили (0.21 ± 0.07) МВ/см для образца №481 и (0.14 ± 0.03) МВ/см для образца №505.

Использование в качестве модулирующего излучения двух лазеров с разными длинами волн приведет к тому, что отражаться от образца

излучение будет на разных глубинах, из-за разной проникающей способности лазеров (рис. 11).

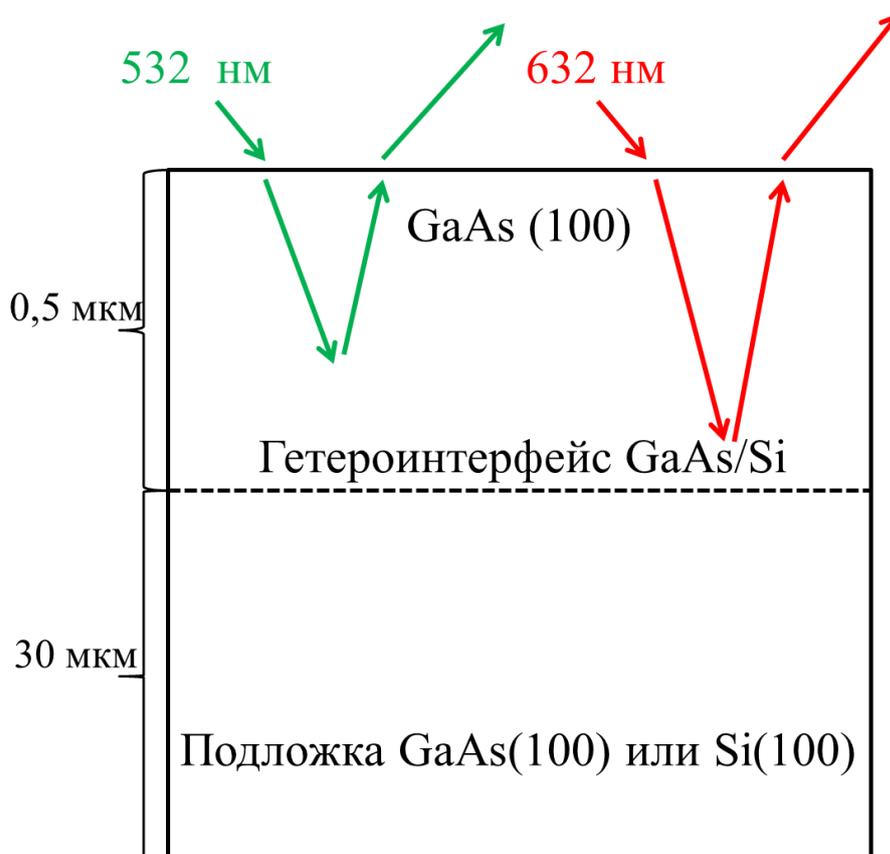


Рис. 11. Различие в характерных глубинах поглощения излучения с длинами волн 532 нм и 633 нм в образцах LT- GaAs.

Для установления источника сигнала фотоотражения с осцилляциями была проведена регистрация спектров при модуляции излучением DPSS и He-Ne лазеров на длинах волн 532 нм и 633 нм соответственно. В качестве примера на рис. 12 приведены спектры фотоотражения образца №505. Видно, что модуляции на большей длине волны (т.е. с большей глубиной проникновения в образец) соответствуют спектры с большей амплитудой сигнала фотоотражения в области фундаментального перехода. Различие амплитуд сигналов фотоотражения указывает на то, что его источником является область гетероперехода GaAs-Si – область, в которой возникают механические напряжения, обусловленные различием постоянных решетки [21].

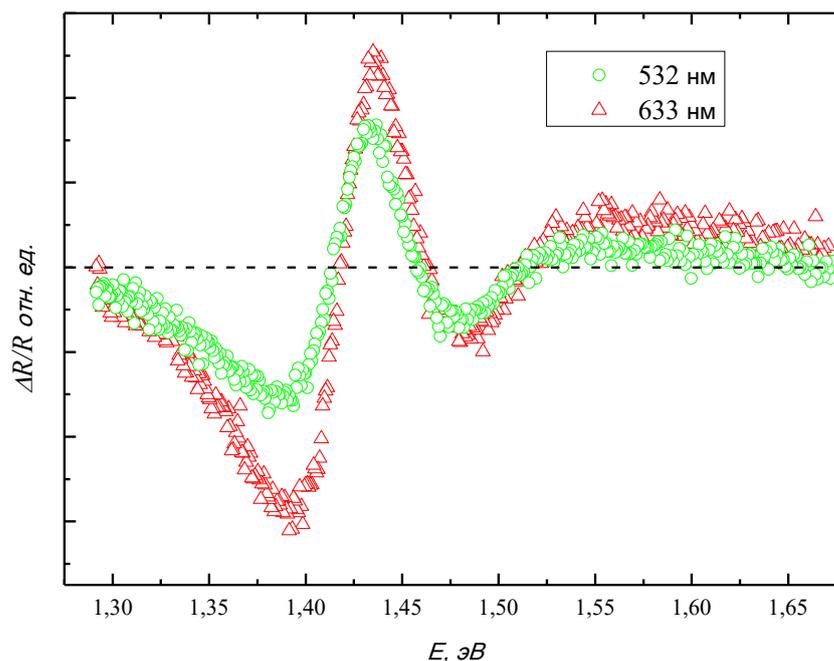


Рис. 12. Спектры фотоотражения образца №505, полученные при модуляции излучением с длинами волн 532 нм (круги) и 633 нм (треугольники)

Источником электрического поля в структурах №481 и №505 являются, по-видимому, заряды, сформированные в результате взаимного легирования гетероперехода Si-GaAs при отжиге. О таком взаимном легировании упоминается, например, в работе по вольтфарадному профилированию структур типа GaAs/Ge [22] и GaAs/InGaAs [23]. Как и в [22-23], можно предположить, что взаимное легирование происходит на толщинах в несколько постоянных решетки, т.е. оно аналогично дельта-легированию. Согласно электростатической теореме Гаусса по напряженности электростатического поля можно оценить поверхностную плотность зарядов σ на гетеропереходе:

$$\sigma = 2\varepsilon\varepsilon_0 E_s, \quad (14)$$

где $\varepsilon=12.6$ – статическая диэлектрическая постоянная GaAs, ε_0 электрическая постоянная. Для образцов №481 и №505 поверхностная

плотность зарядов на гетероинтерфейсе составила $(2.9 \pm 0.9) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, соответственно.

Таким образом, в случае образца №505, для которого применялась технология импульсного роста на начальном этапе, и механические напряжения и поверхностная плотность зарядов на гетероинтерфейсе GaAs-Si оказываются меньшими в сравнении с образцом №481. Метод спектроскопии фотоотражения оказывается чувствительным к различию процессов роста и последующего отжига образцов LT-GaAs, выращенных на кремнии и на арсениде галлия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате замены источника питания усилителя сигнала фотодиода с сетевого стабилизатора с выпрямителем на аккумуляторные батареи в 2-2,5 раза увеличилось соотношение сигнал/шум измерительной части экспериментальной установки.

Методом спектроскопии фотоотражения исследованы структуры LT-GaAs, выращенные при низких температурах на подложках кремния и арсенида галлия. В спектрах фотоотражения слоев LT-GaAs/Si обнаружены осцилляции Франца-Келдыша в области фундаментального перехода E_g и в области $E_g + \Delta s_0$. Показано, что источником сигнала фотоотражения является область гетероинтерфейса LT-GaAs/Si.

По периоду осцилляций Франца-Келдыша определены напряженности электрических полей в образцах №481 и №505. Они составили соответственно (0.14 ± 0.03) МВ/см и (0.21 ± 0.07) МВ/см. С использованием электростатической теоремы Гаусса оценены поверхностные плотности зарядов, они составили $(2.9 \pm 0.9) \cdot 10^{12}$ см⁻² и $(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{12}$ см⁻².

Деформационно-индуцированные сдвиги линий E_g и $E_g + \Delta s_0$ в спектрах фотоотражения соответствуют деформациям сжатия GaAs. Оцененные значения относительных деформаций, они составили $\epsilon(E_g + \Delta s_0) = 0.0085 \pm 0.0017$, $\epsilon(E_g) = 0.0066 \pm 0.0011$ для образца №481 и $\epsilon(E_g + \Delta s_0) = 0.0086 \pm 0.0017$, $\epsilon(E_g) = 0.0065 \pm 0.0011$ для образца №505.

Таким образом, в случае образца №505, для которого применялась технология импульсного роста на начальном этапе, механические напряжения и поверхностная плотность зарядов на гетеропереходе оказываются меньшими. Это свидетельствует о большем структурном совершенстве образца №505 в сравнении с образцом №481.

Список использованных источников

[1] – Исследование оптических свойств GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах роста с δ – легированными слоями Si, Д.В. Лаврухин, А.Э. Ячменев, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, П.П. Мальцев, Физика и техника полупроводников 49, с. 932, 2015.

[2] – Экспериментальное определение времени жизни носителей заряда в GaAs, выращенном при низкой температуре, А.А. Пастор, П.Ю. Сердобинцев, В.В. Чалдышев, Физика и техника полупроводников 46, с. 637, 2012.

[3] – Влияние отжига на время жизни неравновесных носителей заряда в GaAs, выращенном при низкой температуре, А.А. Пастор, У.В. Прохорова, П.Ю. Сердобинцев, В.В. Чалдышев, М.А. Яговкина, Физика и техника полупроводников 47, с. 1144, 2013.

[4] – Пространственное упорядочение кластеров мышьяка в слоях арсенида галлия, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низкой температуре, Н.А. Берт, В.В. Чалдышев, Д.И. Лубышев, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, Физика и техника полупроводников 29, с. 2232, 1995.

[5] – Raman scattering study of GaAs crystalline layers grown by molecular beam epitaxy at low temperature, H. Sano, A. Suda, T. Hatanaka, G. Mizutani, N. Otsuka, J. Appl. Physics 88, p. 3948, 2000.

[6] – Non-stoichiometry in (001) low temperature GaAs by Raman spectroscopy, P. Puech, M. Toufella, R. Carles, R. Sirvin, E. Bedel, C. Fontaine, M. Stellmacher, R. Bisaro, J. Nagle, A. Claverie, G. Benassayag, J. Phys. Condens. Matter 12, p. 2895, 2000.

[7] – Optical and structural properties of low temperature GaAs layers grown by molecular beam epitaxy, A.A. Bernussi, C.F. Souza, W. Carvalho, D.I. Lubyshev, J.C. Rossi, P. Basmaji, Brazilian journal of physics, p. 460, 1994.

[8] – Photoreflectance and photoluminescence spectroscopy of low-temperature GaAs grown by molecular beam epitaxy, S. Sinha, B.M. Arora, S. Subramanian, J. Appl. Phys. 79, p. 427, 1996.

[9] – Свойства и особенности кристаллизации эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных на подложках Si(100) методом двухстадийного осаждения в МОС гидридном процессе, Д.А. Винокуров, В.М. Лантратов, М.А. Сеницын, В.П. Улин, Н.Н. Фалеев, О.М. Федорова, Я.Л. Шайович, Б.С. Явич, Физика и техника полупроводников 25, с. 1022 1991.

[10] – Molecular beam epitaxy of gallium arsenide on 0.3°-misoriented epitaxial Si substrates, Wu-Yih Uen, T. Ohori, T. Nishinaga, Journal of crystal growth 156, p. 133, 1995.

[11] – Semiconductor heterostructures and device structures investigated by photoreflectance spectroscopy, J. Misiewicz, P. Sitarek, G. Sek, R. Kudrawiec. Materials science 21, p. 263, 2003.

[12] – Einfluß eines elektrischen Feldes auf eine optische Absorptionskante, W. Franz, Z. Naturforschung 13a, p. 484, 1958.

[13] – О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов, Л.В. Келдыш, Журнал экспериментальной и теоретической физики 34, с. 1138, 1958.

[14] – Band nonparabolicities, broadening, and field distributions: The spectroscopy of Franz-Keldysh oscillations, D.E. Aspnes, Phys Rev B. 10, p. 4228, 1974.

[15] Модуляционные спектры структур легированных квантовых ям GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As, Ю. Кавалюскас, Г. Кривайте, Л. В. Шаронова [и др.], Физика и техника полупроводников 27, с. 1086, 1993.

[16] Основы физики полупроводников, Ю. Питер, М. Кардона, 3-е изд. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002.

[17] – Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения с использованием двойного монохроматора, Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков, Журнал технической физики 75, с. 66, 2005.

[18] – Dependence of band offsets on elastic strain in GaAs/GaAs_{1-x}P_x strained-layer single quantum wells, X. Zhang, K. Onabe, Y. Nitta, B. Zhang, S. Fukatsu, Y. Shiraki, R. Ito, Jap. J. Appl. Phys. 30, p. 1631, 1991.

[19] – Исследование разрыва зон на гетеропереходе напряженных короткопериодных сверхрешеток GaAs/GaAsP методом спектроскопии фотоотражения, Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, Т.П. Колмакова, А.В. Червяков, Физика и техника полупроводников 38, с. 1429, 2004.

[20] – Stresses and strains in epilayers, stripes and quantum structures of III-V compound semiconductors, S. C. Jain, M. Willander, H. Maes, Semicond. Sci. Technol. 11, p. 641, 1996.

[21] – Температурная зависимость остаточных механических напряжений в эпитаксиальных пленках GaAs/Si(100) по данным спектроскопии фотоотражения, Р.В. Кузьменко, А.В. Ганжа, О.В. Бочурова, Э.П. Домашевская, Й. Шрайбер, С. Хильдебрандт, Ш. Мо, Э. Пайнер, А. Шлахетцкий, Физика и техника полупроводников 34, с. 73, 2000.

[22] – Growth, optical, and electron transport studies across isotype n-GaAs/n-Ge heterojunctions, M.K. Hudait, S.B. Krupanidhi. J. Vac. sci. technol. B 17, p. 1003, 1999.

[23] – Вольт-фарадные измерения гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs в диапазоне температур от 10 до 320 К, А.Н. Петровская, В.И. Зубков, Физика и техника полупроводников 43, с. 1368, 2009.