

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 538.9; 535-14; 53.082.534; 53.096
№ госрегистрации 114120240018

УТВЕРЖДАЮ
директор ИФМ РАН
д-р физ.-мат.наук, профессор
_____ З.Ф. Красильник
«28» июня 2016 г.

ОТЧЕТ
О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Инфракрасная и терагерцовая спектроскопия с временным разрешением неравновесной динамики носителей заряда в полупроводниках с использованием излучения лазеров на свободных электронах

по теме:

ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СИЛЬНОГО ПОЛЯ И РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ. НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ.

(промежуточный)

Этап 4

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 17.09.2014 г. № 14.616.21.0008

Руководитель проекта,
зав. лаб, д.ф.-м.н.

подпись, дата

В.Н. Шастин

Нижний Новгород 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта:

Зав. лаб. 113 отд. 110 ИФМ
РАН, доктор физико-
математических наук

Шастин В. Н. (введение, разделы
1,2,3,4,5,6,7 заключение)

подпись, дата

Исполнители:

Научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук,
без ученого звания

Юрасов Д. В. (раздел 3)

подпись, дата

Научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук,
без ученого звания

Цыпленков В. В. (раздел 4, 6)

подпись, дата

Электроник, без ученой
степени, без ученого звания

Сергеев С. М. (раздел 1)

подпись, дата

Научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук,
без ученого звания

Орлов М. Л. (раздел 3)

подпись, дата

Научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук,
без ученого звания

Орлова Е. Е. (раздел 6)

подпись, дата

Младший научный сотрудник,
аспирант

Дербенева Н.В. (раздел 5)

подпись, дата

Младший научный сотрудник,
кандидат физико-
математических наук, без
ученого звания

Ковалевский К. А. (раздел 5)

подпись, дата

Старший научный сотрудник,
кандидат физико-
математических наук, без
ученого звания

Жукавин Р. Х. (раздел 1, 4, 7)

подпись, дата

Научный сотрудник, кандидат
физико-математических наук,
без ученого звания

Бекин Н. А. (раздел 2)

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 41 с., 30 рис., 8 источников

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, СИСТЕМА НАКАЧКА-ЗОДИРОВАНИЕ, СПЕКТРОСКОПИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ, ЭФФЕКТ СИЛЬНОГО ПОЛЯ

Проект направлен на создание станции по измерению методом пробного импульса времен быстропротекающих процессов на базе ЛСЭ в Новосибирске, а так же изучение физики неравновесных состояний в кристаллах кремния и германия, направленное на развитие источников ТГц излучения на базе кремния и детекторов электромагнитного излучения на базе германия.

Целями работ четвертого этапа являются:

- измерение вольт-амперных характеристик и спектра поглощения на внутризонных переходах в выращенных гетероструктурах в условиях криогенных температур;
- создание прототипа установки по измерению быстропротекающих релаксационных процессов методом пробного импульса и проведение низкотемпературных (5 К) пробных измерений темпа рекомбинации и релаксации доноров сурьмы в кристаллическом германии на базе лазера на свободных электронах в Новосибирском центре коллективного пользования.
- проведение нейтронного легирования с требуемыми на данном этапе концентрациями примеси образцов объемного германия галлием и кремния фосфором методом ядерной трансмутации на источнике тепловых нейтронов в научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова (филиал в г. Обнинск).
- проведение измерений временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров фосфора в одноосно деформированном кремнии. Измерения планируется провести на ЛСЭ методом пробного импульса.

Работы проведены с использованием современных апробированных методов. Российской стороной совместного проекта работы выполнены с использованием 3 уникальных научных установок, оборудования 1 центра коллективного пользования и 1 объекта зарубежной инфраструктуры. Задачи четвертого этапа были выполнены полностью. Проведенные работы полностью соответствуют план-графику и требованиям технического задания.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ НА ВНУТРИЗОННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ВЫРАЩЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР.....	8
2. СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА УСТАНОВКИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ БЫСТРОТЕКУЩИХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА И ПРОВЕДЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ (5 К) ПРОБНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПА РЕКОМБИНАЦИИ И РЕЛАКСАЦИИ ДОНОРОВ СУРЬМЫ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ГЕРМАНИИ НА БАЗЕ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В НОВОСИБИРСКОМ ЦЕНТРЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.....	19
2.1 Используемое оборудование.....	19
2.2 Результаты измерения динамики релаксации в Ge:Sb.....	21
3. ПРОВЕДЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ТРЕБУЕМЫМИ НА ДАННОМ ЭТАПЕ КОНЦЕНТРАЦИЯМИ ПРИМЕСИ ОБРАЗЦОВ ОБЪЕМНОГО ГЕРМАНИЯ ГАЛЛИЕМ И КРЕМНИЯ ФОСФОРом МЕТОДОМ ЯДЕРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ НА ИСТОЧНИКЕ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. Л.Я. КАРПОВА.....	28
4. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ ФОСФОРА В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ.....	30
5. АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ ИНОСТРАННОГО ПАРТНЕРА.....	38
5.1 Обнаружение и исследование эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров и (или) акцепторов в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в Г. Дрезден: исследование донора сурьмы. С помощью Фурье спектрометра будет измерен спектр поглощения на внутрицентровых переходах с основного состояния центра (серия Лаймана) в зависимости от интенсивности излучения ЛСЭ	38
5.2 Исследование эффектов комбинационного рассеяния света на состояниях примесных центров (Рамановская спектроскопия): исследование сурьмы в кремнии.....	39
5.3 Нелинейная терагерцовая спектроскопия экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп: применение монохроматического пробного излучения.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	42
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	43

ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, СИСТЕМА НАКАЧКА-ЗОДИРОВАНИЕ, НЕЙТРОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ, СПЕКТРОСКОПИЯ

Работы четвертого этапа являются очередным необходимым шагом к достижению общих целей проекта. Главная цель Российской составляющей настоящего проекта – построение станции для измерения времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ). На данном этапе построен работающий прототип станции и успешно произведены пробные измерения. В качестве исследуемого объекта использовался кристаллический германий, легированный мелкими донорами сурьмы. Параллельно в соответствии с планом были проведены работы по исследованию физики неравновесных состояний мелких примесных центров в полупроводниках и структурах на основе их. Так в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорф проведены исследования динамики релаксации возбужденных донорных центров фосфора в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса с использованием излучения ЛСЭ FELBE. Подобного рода измерения начаты на предыдущем этапе и проводятся в ходе настоящего проекта впервые в мире.

Были продолжены исследования физики неравновесных состояний мелких примесей в наноструктурах. Полупроводниковые структуры имеют большой потенциал для самых различных практических приложений, в том числе для создания источников света, детекторов электромагнитного излучения и других оптоэлектронных приборов, поэтому теоретические и экспериментальные исследования физики неравновесных процессов в них в настоящее время очень актуальны. Одним из перспективных направлений в этой области является использование нанокристаллического кремния, где за счет эффекта размерного квантования снимается принципиальный запрет на межзонный излучательный переход [2]. В начале 90-х годов прошлого столетия было открыто излучение нанокристаллического [3] и пористого [4-6] кремния в видимом диапазоне, причем оказалось возможным даже получить оптическое усиление на кремниевых нанокристаллах [7]. За прошедшие с тех пор годы большие усилия как теоретиков, так и экспериментаторов были направлены на исследования электронной структуры и оптических свойств нанокристаллов кремния. Эта тематика вызывает живой интерес и сейчас, и связано это в первую очередь с желанием увеличить эффективность фотонной генерации в нанокристаллах кремния, поскольку интенсивность световой эмиссии в них пока еще остается достаточно низкой по сравнению с типичными прямозонными полупроводниками и структурами на их основе. Преодоление этого

препятствия видится на пути модификации электронной структуры кремниевых нанокристаллов. Среди основных способов воздействия на квантовые состояния в нанокристаллах отметим следующие: введение в них мелких примесей, формирование нанокристаллов в различных диэлектрических матрицах, пассивация поверхности нанокристаллов различными химическими элементами, в частности, кислородом, углеродом или алкильными группами и галогенами.

В рамках исследования физики неравновесных состояний в наноструктурах, проводящихся в ходе работ настоящего проекта, ведется теоретическое изучение, используя первопринципные методы (*ab initio*), физики мелких примесей, помещенных внутрь кремниевого нанокристалла. Такого вида исследования имеют прикладное значение, связанное с использованием как самих нанокристаллов, так дают большую пользу в исследовании физики мелких примесных центров в объемных материалах, т.к. на сегодняшний день даже спектры некоторых примесей в кремнии остается до конца не известными (например, спектр нейтрального донора магния). И использование расчетов из первых принципов является очень перспективным методом исследования.

В экспериментальной части таких исследований было произведено измерение вольт-амперных характеристик и спектров поглощения в ТГц диапазоне частот выращенных наноструктур на основе кремния и германия с легированными мелкими примесями слоями. Данные работы проведены в рамках отработанных общепринятых методик и являются необходимым шагом в исследовании оптических и транспортных свойств гетероструктур.

Иностраным партнером проведены работы по обнаружению и исследованию эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров сурьмы в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в Исследовательском Центре Дрезден-Россендорф (FELBE). Измерение спектра с помощью Фурье спектрометра показало, что в донорах сурьмы в кремнии сдвиг линий поглощения под влиянием когерентного резонансного излучения ЛСЭ не значителен. Были так же проведено исследование эффектов комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия) на донорах сурьмы. Наблюдается сдвиг линии стимулированного излучения на внутрицентровых переходах мелких доноров при изменении частоты накачки лазером на свободных электронах. В рамках работ по нелинейная терагерцовой спектроскопии экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп с использованием монохроматического пробного излучения была проведена ТГц спектроскопия с измерением ультрабыстрая динамика трехуровневой системы в одиночной широкой квантовой яме. Это сложная работа, т.к. поглощение в

одиночной квантовой яме мало, что требует применения и особых измерительных техник.

Проведенные в первой половине 2016 г. работы достигают целей настоящего этапа и соответствуют план-графику совместных работ.

1. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ НА ВНУТРИЗОННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ВЫРАЩЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Исследование физики неравновесных процессов в наноструктурах имеет огромное значение для множества различных приложений в электронике. На данном этапе работ в экспериментальной части работ по данной тематике проведено измерение вольт-амперных характеристик выращенных германий-кремниевых наноструктур, а так же спектра поглощения структур в ТГц диапазоне частотного спектра.

Для проведения измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) на исследуемые структуры было произведено напыление и отжиг контактов алюминия. При измерении ВАХ ток пропусклся в плоскости квантовой ямы гетероструктуры (латеральный транспорт). Ввиду малой энергии ионизации примесных центров в германии и гетероструктурах на его основе, измеряемые образцы обладают довольно относительно малым сопротивлением даже при криогенных температурах уже при полях порядка 1 вольт/см. Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) таких структур необходимо использование импульсной методики, т.к. в случае непрерывной методики из-за малого сопротивления постоянное приложенное напряжение приведет к возникновению перегрева образцов ввиду большого тока. Рисунок 1 иллюстрирует измерительную схему.

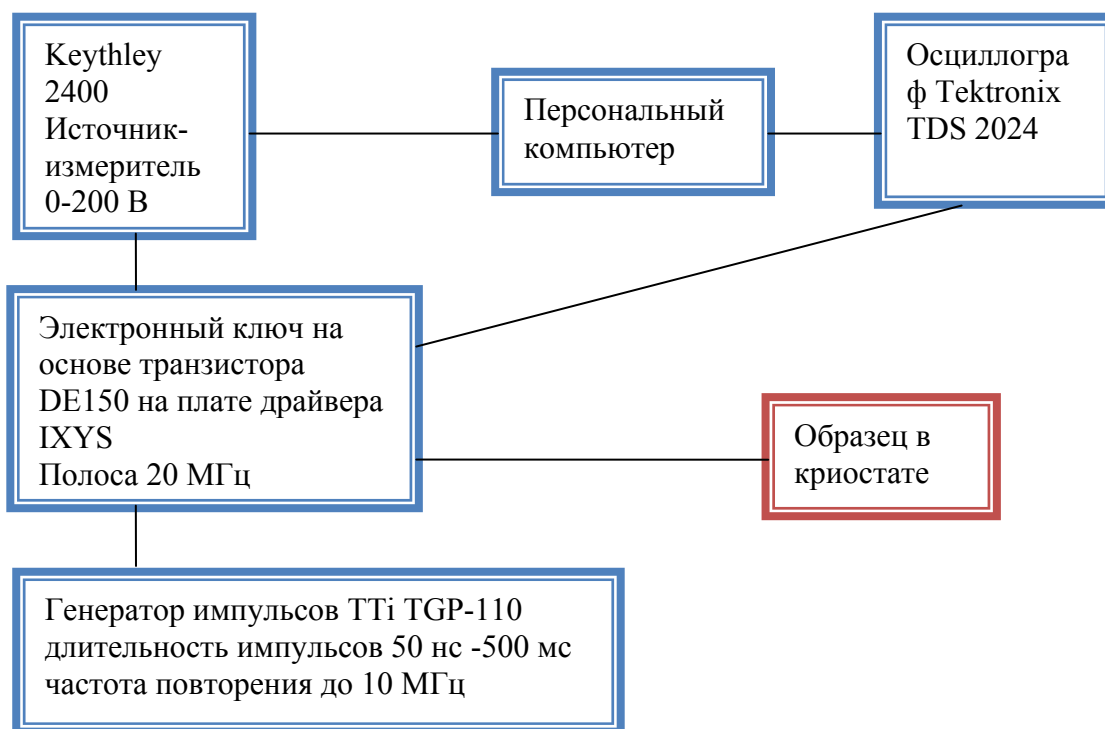


Рисунок 1 – Состав экспериментальной установки по измерению ВАХ в импульсном режиме.

На рисунке 2 показана осциллограмма характерного вида импульса тока, проходящего через исследуемую структуру. Нижний короткий пик в нулевой момент времени вызван несогласованностью цепи.

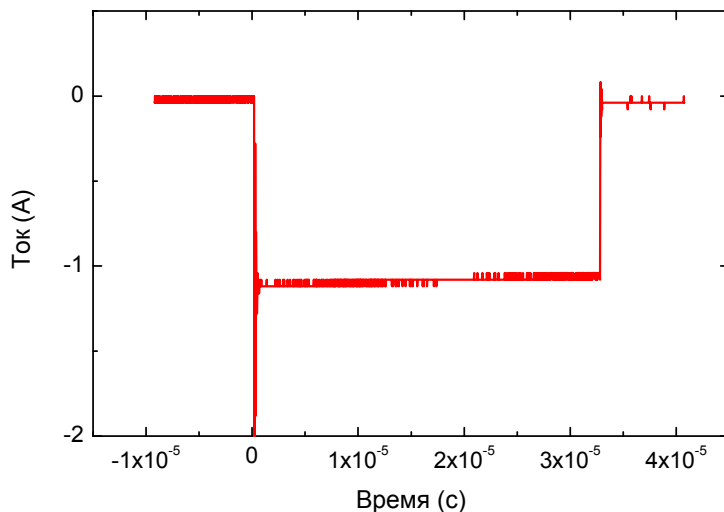


Рисунок 2 – Характерный вид импульса тока через образец.

Вследствие ограниченной мощности источника тока при увеличении частоты повторения импульсов сила тока, выдаваемая источником, уменьшается. Рисунок 3 иллюстрирует зависимость амплитуды тока импульсов от частоты их повторения при различных прикладываемых напряжениях к исследуемой структуре.

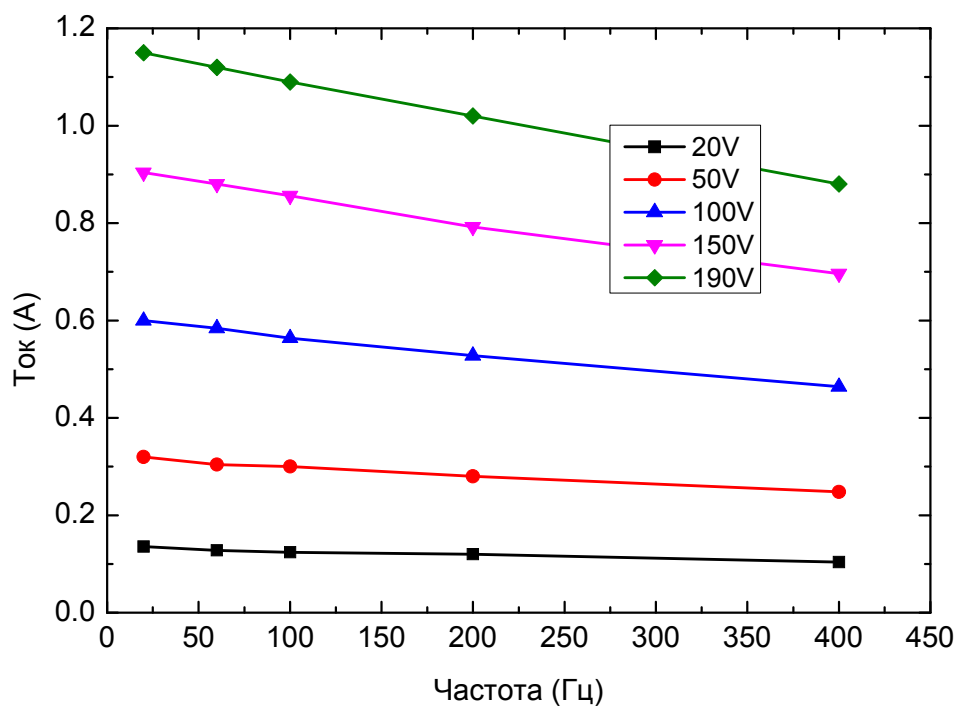


Рисунок 3 – Зависимость величины тока от частоты повторения импульсов.

Для тестирования измерительной схемы была проведена серия экспериментов с различной величиной частоты повторения импульсов. Как показала проверка, для данной схемы необходимо использование малых величин повторения (большая величина скважности).

На Рисунках 4 – 6 представлен дизайн структур, используемых для измерений.

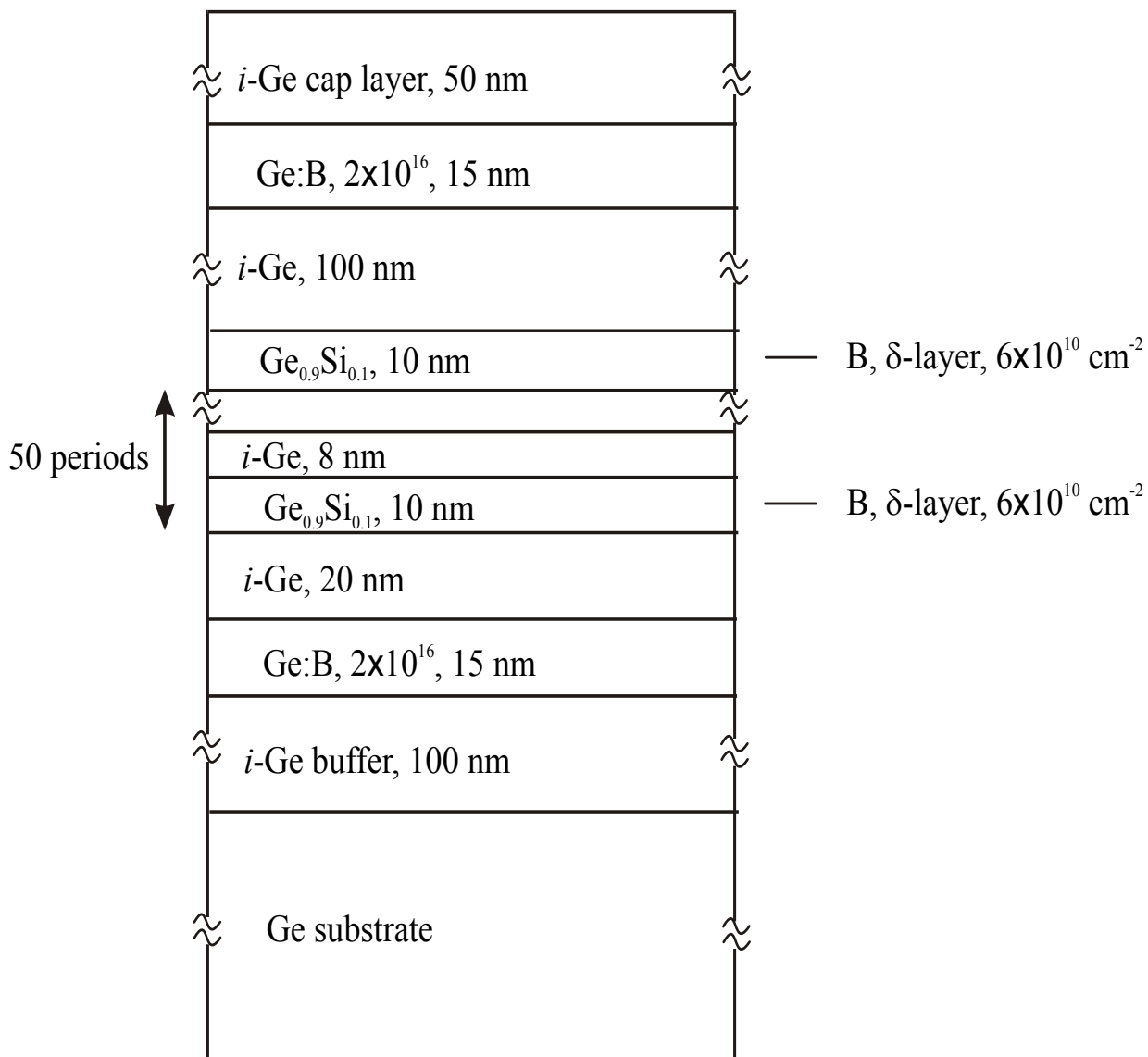


Рисунок 4 – дизайн германий-кремниевой структуры, выращенной на германиевой подложке с барьерами, легированными бором
 $\{\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5 \text{ nm}$ / δ -слой B $N_B \sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5 \text{ nm}$ / Ge $d=8 \text{ nm}\} \times 50$

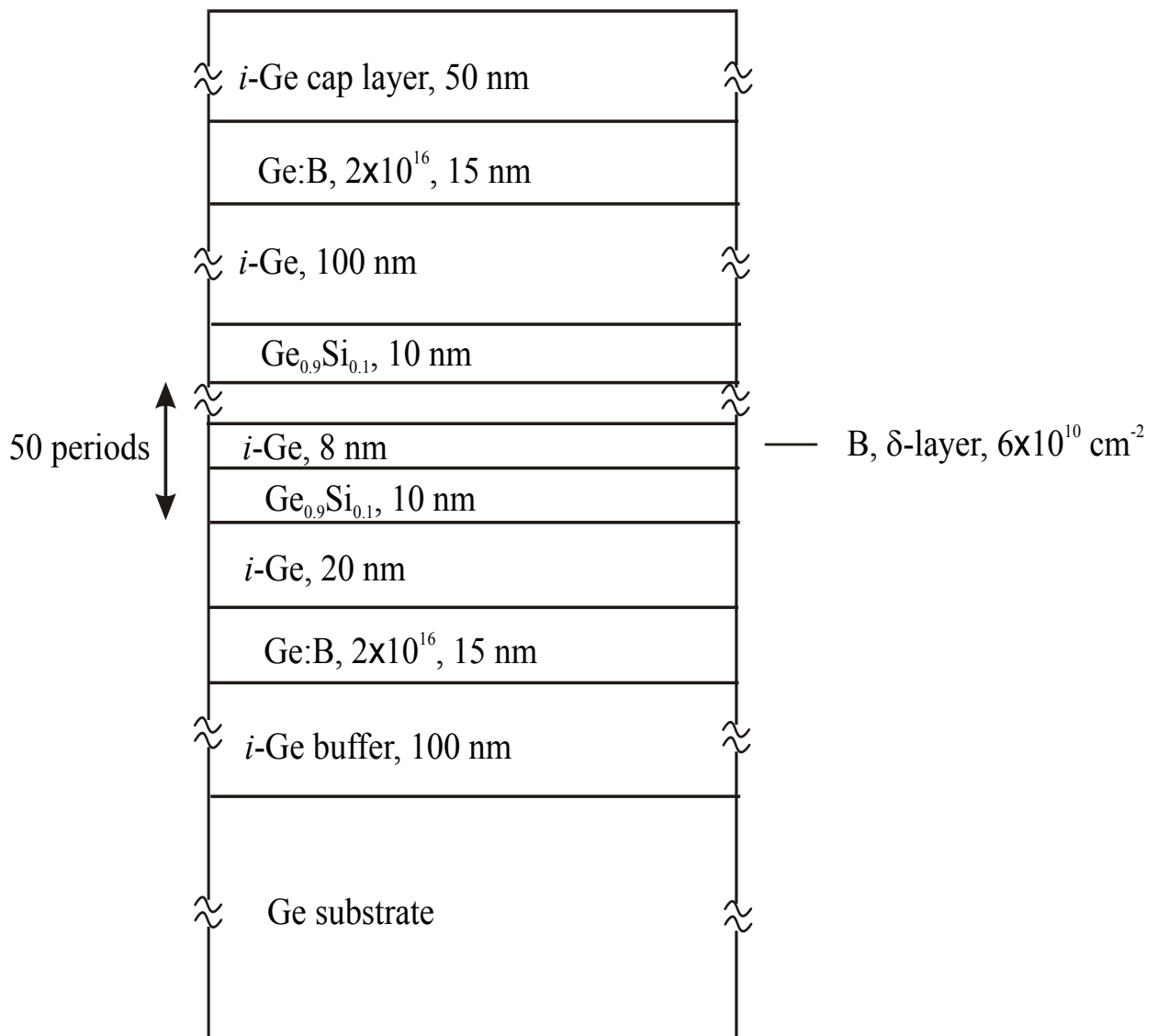


Рисунок 5 – дизайн германий-кремниевой структуры, выращенной на германиевой подложке с блегированными бором квантовыми ямами

{Ge слой $d=4$ нм/ δ -слой B $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / Ge слой $d=4$ нм / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=10$ нм} $\times 50$

Гетероструктуры GeSi/Ge, выращенные на подложке Ge, отличались расположением областей селективного легирования бором (р-тип) в активном периоде. Всего было выращено 50 периодов в гетероструктурах каждого типа. Каждый период содержал квантовую яму Ge толщиной 8 нм и барьер $\text{Ge}_{0.9}\text{Si}_{0.1}$ толщиной 10 нм. Небольшая разница композиций между квантовой ямой и барьером – 10% - диктовалась необходимостью бездислокационного роста многопериодных гетероструктур без использования виртуальных подложек (релаксированных буферов). В то же время указанная разность композиций и толщины слоёв являются достаточными для обеспечения квантово-размерных эффектов, в том числе для акцепторных состояний.

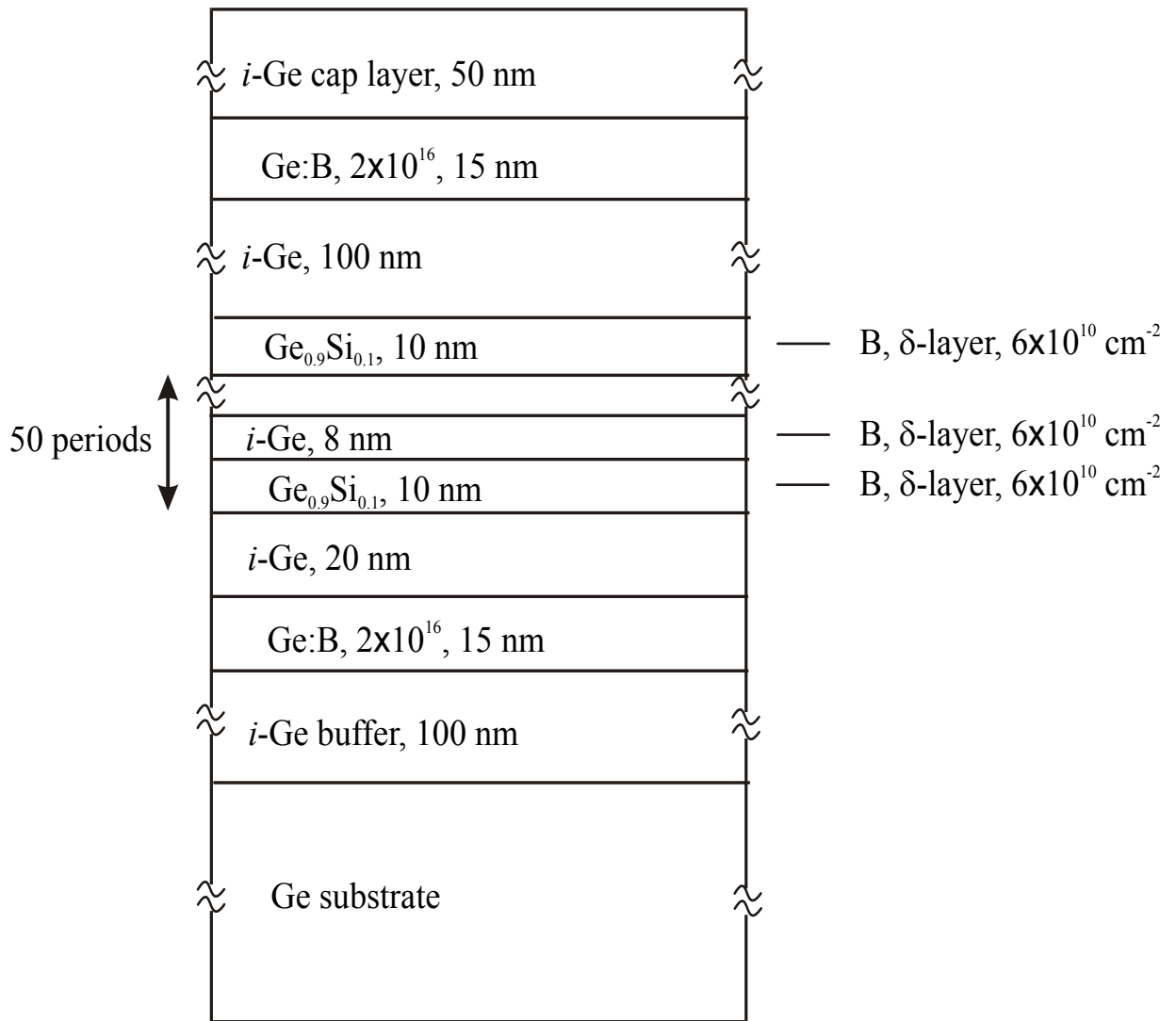


Рисунок 6 – дизайн германий-кремниевой структуры, выращенной на германиевой подложке с блегированными бором квантовыми ямами и барьерами.

{ $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / Ge слой $d=4$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / Ge слой $d=4$ нм } $\times 50$

В частности, согласно расчётам, при легировании бором в центре германиевой ямы, энергия связи акцептора составляет ~ 16 мэВ, что больше, чем в объёмном полупроводнике. Разрешённый в дипольном приближении оптический переход с минимальной энергией составляет ~ 11 мэВ. С учётом эффектов неоднородного уширения поглощение в соответствующей линии (области) лежит, как ожидается, в диапазоне от ~ 1 до 4 ТГц. Примесное поглощение в гетероструктурах с легированными барьерами целиком лежит в диапазоне частот менее 2 ТГц. Селективное (δ -образное, $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) легирование периода гетероструктуры производилось: 1) в квантовой яме, 2) в барьере, 3) в квантовой яме и барьере. Все прочие слои гетероструктур, кроме периода, были выращены идентичным образом. В частности, активный период расположен между двумя областями эпитаксиального германия толщиной 15 нм, который был легирован бором с концентрацией

$2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это было сделано с целью минимизации влияния изгиба зон (из-за влияния подложки или покрывающего слоя) на зонную структуру активной сверхрешётки.

На рисунке 7 показаны типичные ВАХ для двух наноструктур.

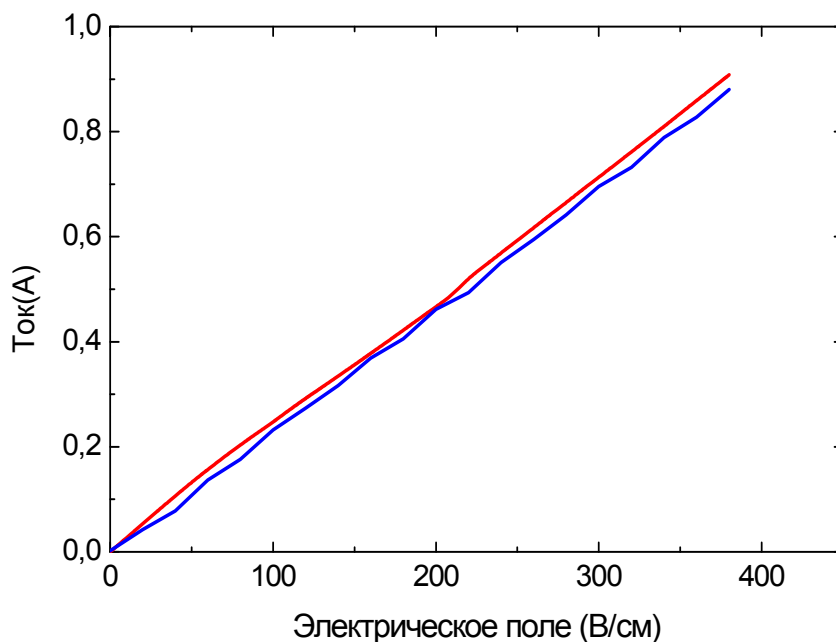


Рисунок 7– Результат измерения – ВАХ гетероструктур на основе GeSi\Ge.

Синим – $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}/\text{Si}(001)$ { $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$, 12.9 нм, Ge, 7.2 нм, $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$, 1.3 нм, Ge, δ -легированный акцепторами, 4.5 нм: $6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ } $\times 40$

Красным – Ge/SiGe сверхрешеткой, выращенной на буфере Ge(001) { $\text{Si}_{0.16}\text{Ge}_{0.84}$, 5нм, Ge, 8 нм, $\text{Si}_{0.16}\text{Ge}_{0.84}$, 1.5 нм, δ -слой Ge:B, 5нм: $6.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ } $\times 40$

Как видно из рисунков вольт-амперные характеристики имеют линейные зависимости. Отсутствие загиба вниз при увеличении прикладываемого напряжения связано, по-видимому, с малой подвижностью носителей внутри слоя квантовой ямы, что не позволяет носителям набрать энергию близкую к энергии оптического фонона.

Ниже, на рисунке 8 продемонстрированы ВАХ для других кремний-германиевых структур при низких прикладываемых напряжениях. Они так же линейны, что говорит об отсутствии эффекта вымораживания примеси. Это значит, что даже при криогенных температурах в квантовых ямах структур имеются свободные носители, обеспечивающие электрический ток при низких напряжениях. Причиной этого является высокая степень легирования барьеров наноструктур, что приводит к тому, что носители заряда «стекают» при низких температурах в квантовые ямы, обеспечивая проводимость последних. С этим же фактором связано и слабое проявление примесных линий в спектре поглощения структур, выращенных на германиевых подложках. Особенности видны вблизи 7-9 мэВ, что соответствует самым сильным линиям поглощения акцептора.

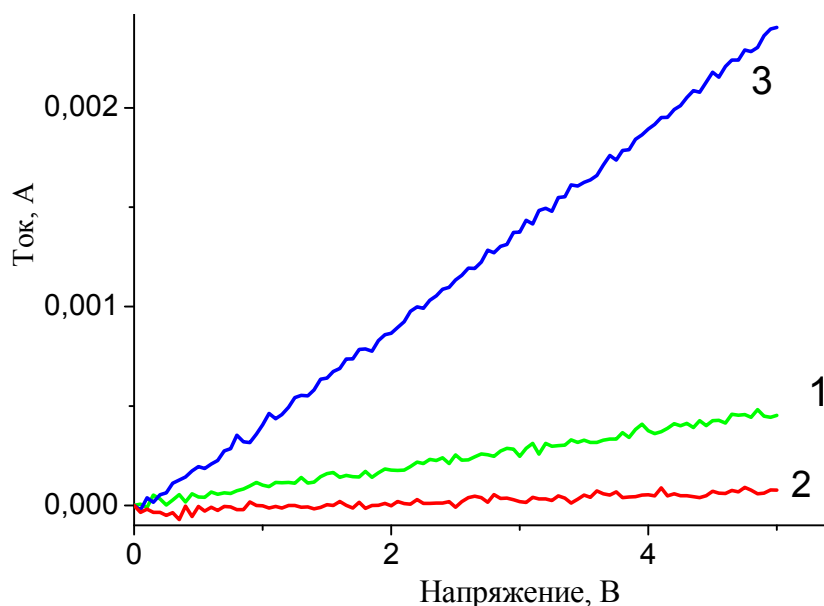


Рисунок 8 – Вольт-амперные характеристики для структур

- 1 – ($\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / Ge $d=8$ нм) $\times 50$
- 2 – (Ge слой $d=4$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / Ge слой $d=4$ нм / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=10$ нм) $\times 50$
- 3 – { $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / Ge слой $d=4$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / Ge слой $d=4$ нм } $\times 50$

Работы по спектроскопии включали в себя измерения спектров поглощения гетероструктур на основе кремния и германия с легированными мелкими примесями слоями.

Дизайн этих структур приведен на рисунках 4–6. Типичный спектр рентгеновской дифрактометрии для этих структур показан на рисунке 9.

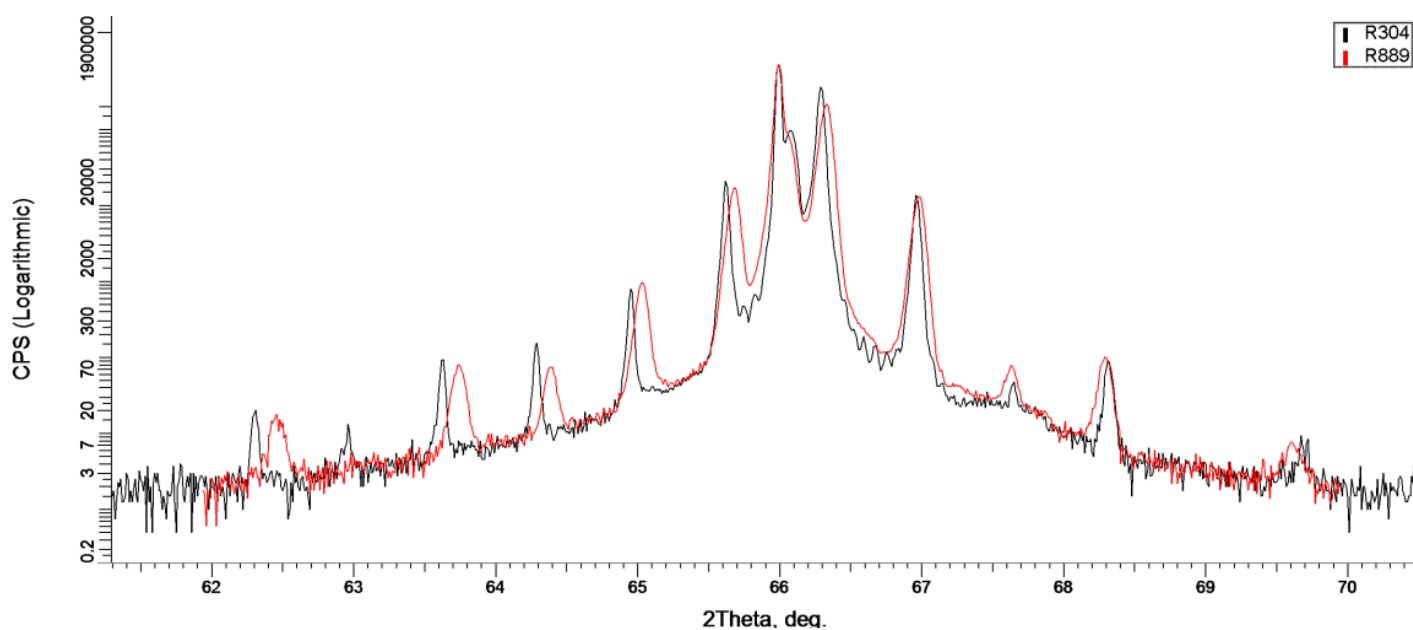


Рисунок 9 – спектр рентгеновской дифрактометрии для структуры

- { $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой В $N_B \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0.1}\text{Ge}_{0.9}$ слой $d=5$ нм / Ge $d=8$ нм } $\times 50$

Ниже на рисунке 10 показаны спектры поглощения для германий-кремниевых наноструктур с легированными акцепторами бора слоями. Из рисунка видно, что в диапазоне 7-10 мэВ наблюдаются пики в спектре поглощения, что может быть связано с примесями в германиевых слоях.

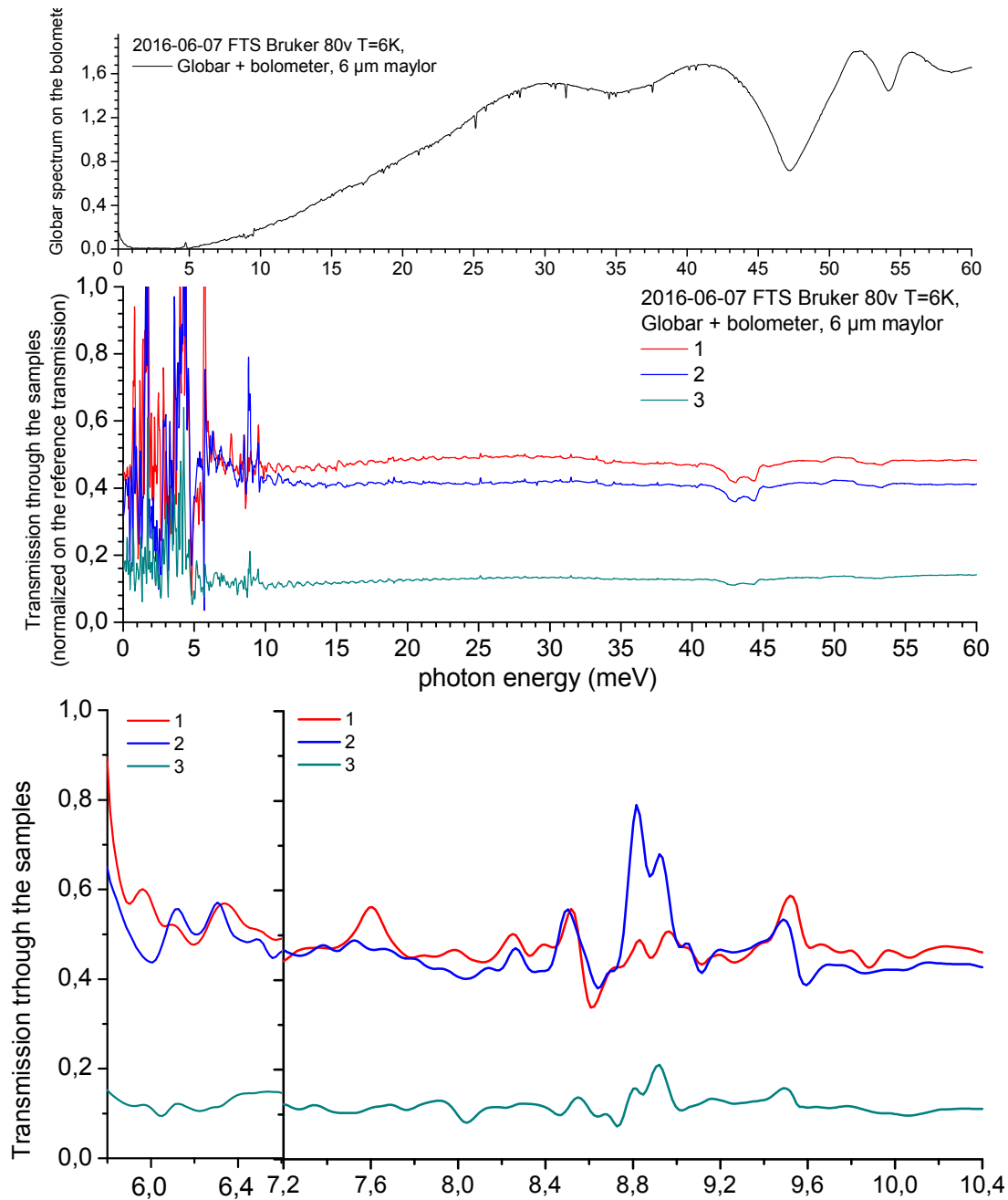


Рисунок 10 – Спектры поглощения для гетероструктур:

- 1 – ($\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой B $N_{\text{B}} \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}$ слой $d=5$ нм / Ge $d=8$ нм) $\times 50$
- 2 – (Ge слой $d=4$ нм / δ -слой B $N_{\text{B}} \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / Ge слой $d=4$ нм / $\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}$ слой $d=10$ нм) $\times 50$
- 3 – ($\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}$ слой $d=5$ нм / δ -слой B $N_{\text{B}} \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ / $\text{Si}_{0,1}\text{Ge}_{0,9}$ слой $d=5$ нм) $\times 58$

Были так же произведены измерения спектров поглощения кремний-германиевой структуры. Дизайн этой структуры показан на рисунке 11.

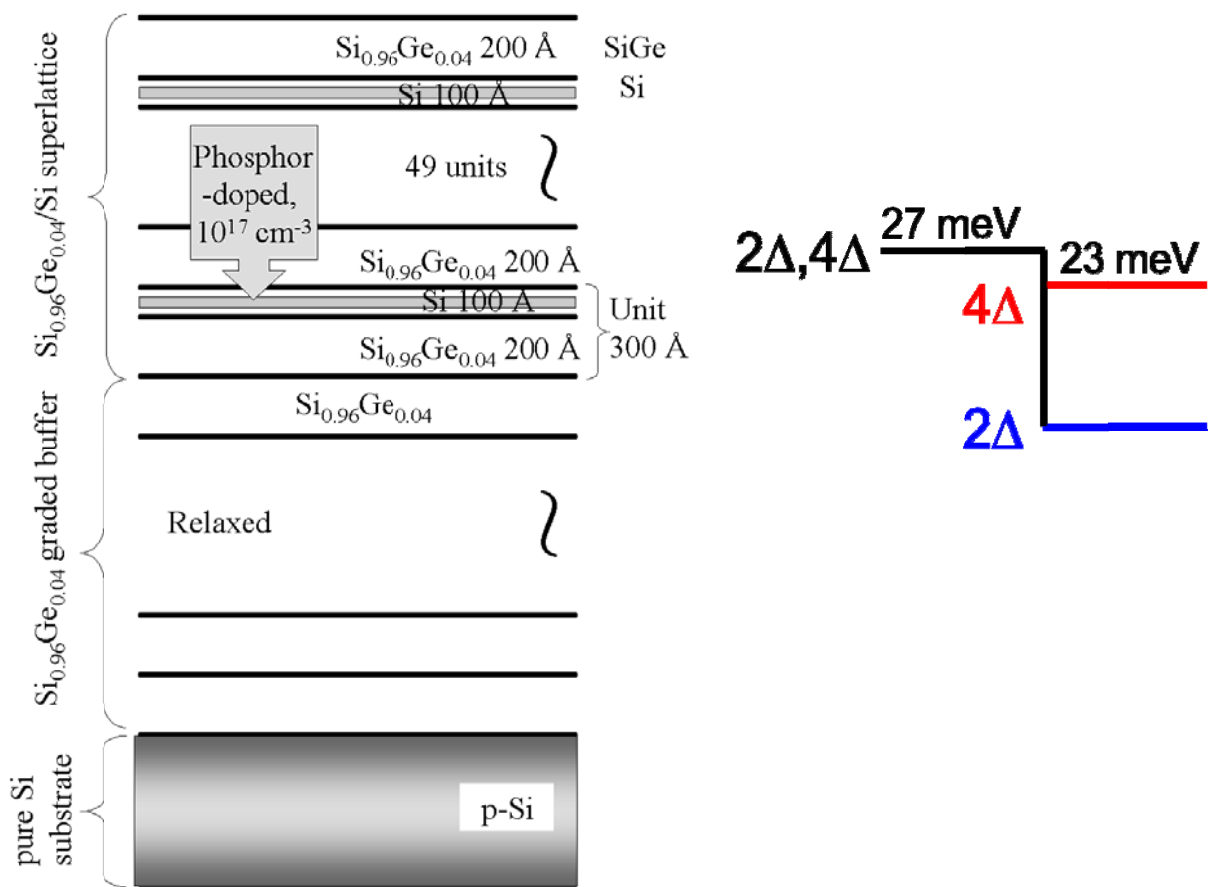


Рисунок 11 – Дизайн кремний германиевой структуры {Si_{0.96}Ge_{0.04} слой d=20 нм/ Si:P N_p=10¹⁷ см⁻³ d=10 нм/ Si_{0.96}Ge_{0.04} слой d=20 нм}×49 (слева); справа показано расщепление долин зоны проводимости в кремниевых слоях гетероструктуры.

Структура была выращена на (100) 500 мкм - подложке нелегированного кремния (удельное сопротивление 200 Омсм) с остаточной примесью дырочного типа. Сверхрешетки содержали 49 периодов, состоящих из «квантовых» ям Si (10 нм), и барьеров Ge_{1-x}Si_x (20 нм), выращенных на релаксированном (недеформированном) буфере Ge_{x-y}Si_y.

Поскольку постоянные решетки кремния и германия различны, то в гетероструктурах Si/GeSi по меньшей мере один из слоев должен быть напряженным. Встроенная деформация приводит к расщеплению шестикратно вырожденных Δ-минимумов зоны проводимости на двукратно вырожденные минимумы (2Δ), квазиимпульсы которых ориентированы вдоль направлений [001] и [00-1], и на четырехкратно вырожденные минимумы (4Δ), с квазиимпульсами в плоскости (001) (см. рисунок 11 слева).

На рисунке 12 представлен измеренный спектр поглощения кремний-германиевой структуры с легированными донорами фосфора кремниевыми слоями. Синим цветом показан спектр поглощения донора фосфора в объемном кремнии, красным – спектр поглощения в структуре. Это спектр имеет вид модулированной периодической (с малым периодом) функции. Это связано с многократными переотражениями света в спектрометре из-за плоскопараллельности граней структуры, т.к. для этой структуры не была проведена обработка поверхности для устранения плоскопараллельности, чтобы не испортить двумерные слои. Тем не менее, данные позволяют сделать вывод о частичной релаксации буфера гетероструктуры по сдвигу линии поглощения фосфора. Это же позволяет оценить упругие напряжения в кремниевых слоях гетероструктуры на уровне порядка 500 бар.

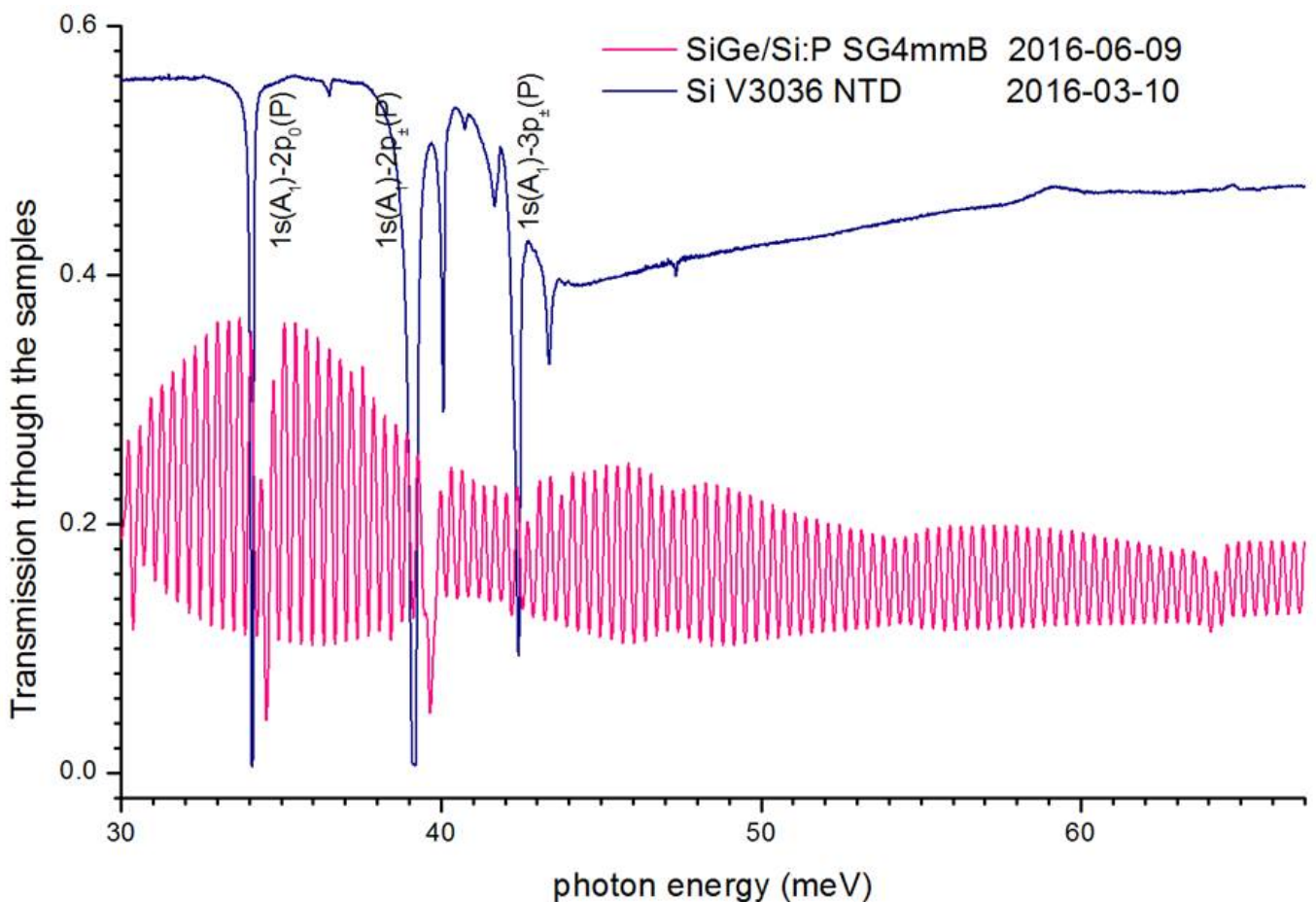


Рисунок 12 – спектр поглощения для кремний-германиевой структуры ($\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ слой $d=20$ нм/ $\text{Si:P } N_p=10^{17} \text{ см}^{-3}$ $d=10$ нм/ $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}$ слой $d=20$ нм) $\times 49$

Теоретическое описание физических свойств полупроводниковых структур очень сложно. Описание структуры примесного центра в рамках различных моделей весьма

приближенно даже в объемных материалах, в структурах эта задача еще усложняется. В рамках данного проекта производится попытка применения первопринципных (*ab initio*) методов для расчета структуры примесных центров, а так же релаксационных процессов в кремнии и кремниевых структурах. Метод основан на том, что из первых принципов рассчитывается структура примесного атома, окруженного конечным числом атомов кремния. Если число атомов кремния слишком высока (более 300), сложность расчета начинает превосходить возможности вычислительной техники. Для ограничения числа окружающих атомов кремния легче сначала производить вычисление спектра примеси в кремниевом нанокристалле. Впоследствии возможно развить этот метод для расчета спектра и в объемных материалах. Такая задача очень актуальна, т.к. энергетический спектр примесных состояний в полупроводниках зачастую полностью не известен, что делает очень затрудненным анализ релаксационных процессов, а значит и интерпретацию измерений методом пробного импульса, которые проводятся в рамках настоящего проекта. К настоящему моменту отработана процедура расчета спектра некоторых доноров в нанокристалле кремния. Проводится анализ возможности применения данного подхода для расчета спектра доноров в объемном кремнии, в частности спектра нейтрального донора магния. Напрямую данный метод применить не удастся, т.к. волновая функция донора имеет большой радиус локализации в пространстве, что требует учета большого числа атомов кремния, окружающего примесь. Возможно, учет некоторых симметричных особенностей приведет к возможности эффективного сокращения числа таких атомов.

2. СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА УСТАНОВКИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ БЫСТРОТЕКУЩИХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА И ПРОВЕДЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ (5 К) ПРОБНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПА РЕКОМБИНАЦИИ И РЕЛАКСАЦИИ ДОНОРОВ СУРЬМЫ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ГЕРМАНИИ НА БАЗЕ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В НОВОСИБИРСКОМ ЦЕНТРЕ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ.

2.1 Используемое оборудование.

Работы настоящего раздела проведены на собранной установке по измерению времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса (pump-probe) на базе лазера на свободных электронах в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Этот лазер на свободных электронах является единственным в России и входит в перечень уникальных научных установок, поддерживаемых Минобрнауки РФ. Работы проводились с использованием оборудования ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения. Запланированные на данном этапе тестовые измерения на собранной в рамках настоящего проекта установке согласно план-графику работ проведены на кристаллическом германии, легированном донорами сурьмы до концентрации порядка 10^{15} см⁻³. Длина волны возбуждения 105 микрон соответствует фотоионизации донора. В качестве источника использовался ЛСЭ ИЯФ им. Г.И. Будкера, излучающий для первой очереди в диапазоне 100-200 микрон с возможностью перестройки, длительностью импульса порядка 100 пс, следующих с частотой 6 МГц, средней мощностью до 100 Вт. Эксперименты проводились в оптическом криостате Janis ST-100 с охлаждением потоком жидкого гелия. Образец находился в вакууме, теплоотвод осуществлялся через контакт с держателем образца, выполненном из меди. Температурный контроллер Lakeshore 335 позволял производить измерение и установку температуры на холодном пальце криостата от 5К и выше.

На рисунке 13 изображены фрагменты установки, на которых схематично отражен ход лучей накачивающего (pump) и зондирующего (probe) импульсов излучения лазера на свободных электронах. В качестве образца был выбран Ge:Sb с уровнем легирования порядка 10^{15} см⁻³. Тестирование установки проходило при параметрах, отвечающих опубликованным данным [Phys. Rev. B], где так же производилось измерение релаксационной динамики германия, легированного сурьмой методом пробного импульса на установке, использующей излучение ЛСЭ, в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорфе (HZDR, FELBE).

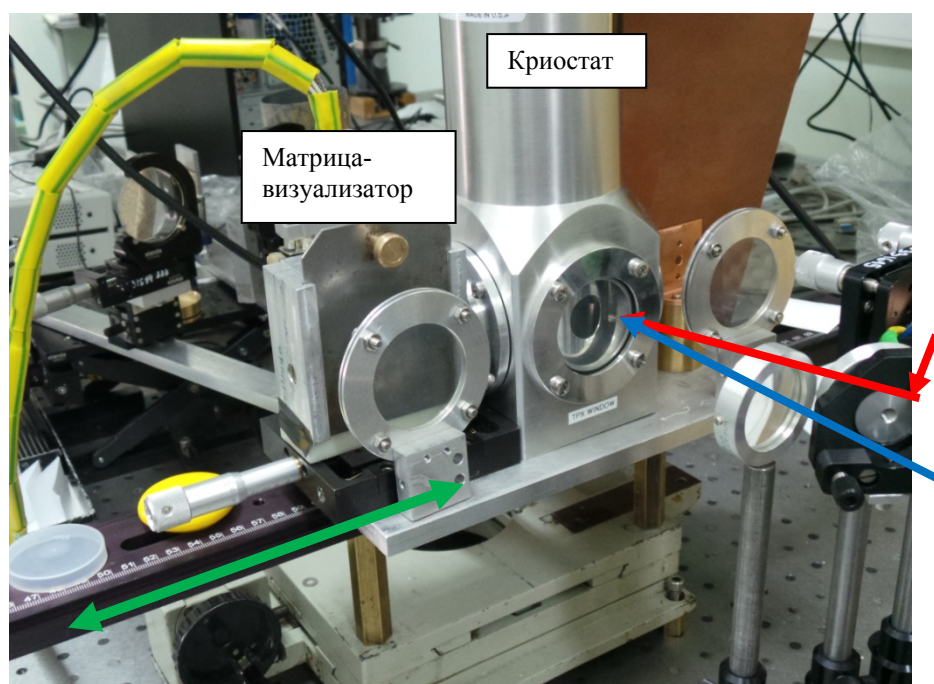
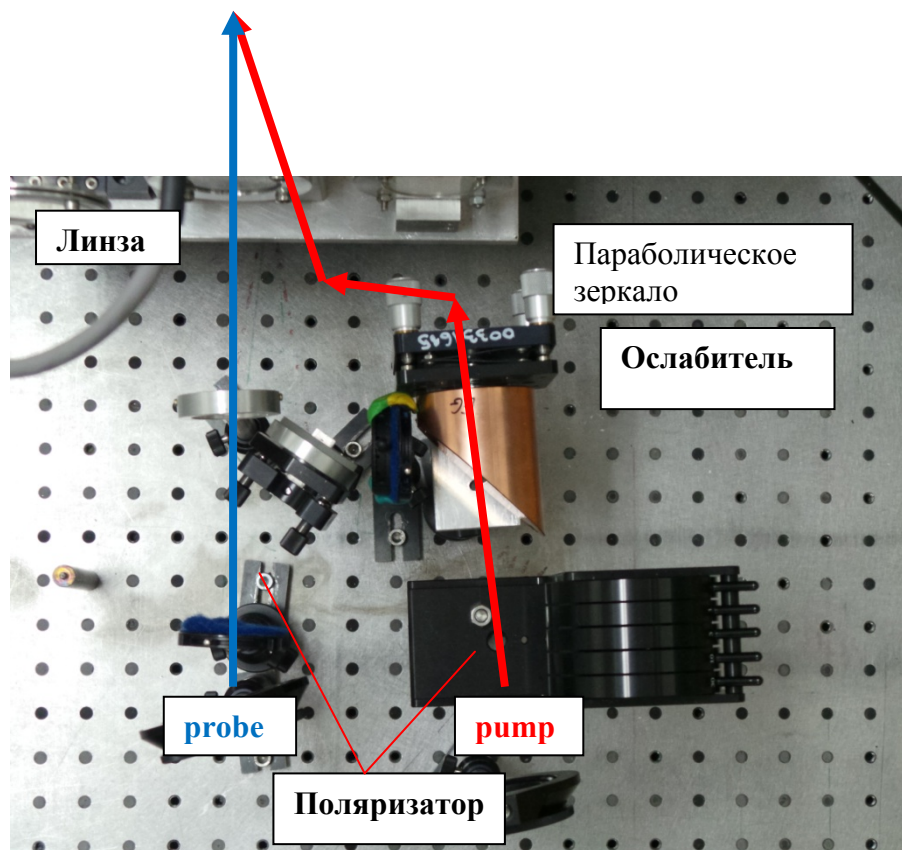


Рисунок 13 – Фрагменты установки по измерению времен релаксации. Цветные стрелки означают пучки накачивающего (pump, красная) и пробного импульса (probe) (синяя).

Зеленая двунаправленная стрелка указывает на диапазон перемещения каретки, содержащей криостат, матрицу для визуализации профиля пучка и муляж образца.

2.2 Результаты измерения динамики релаксации в Ge:Sb

На рисунке 14 представлен спектр излучения ЛСЭ на частоте, отвечающей возбуждению донорных центров германия при переходе в континуум состояний (зону проводимости германия).

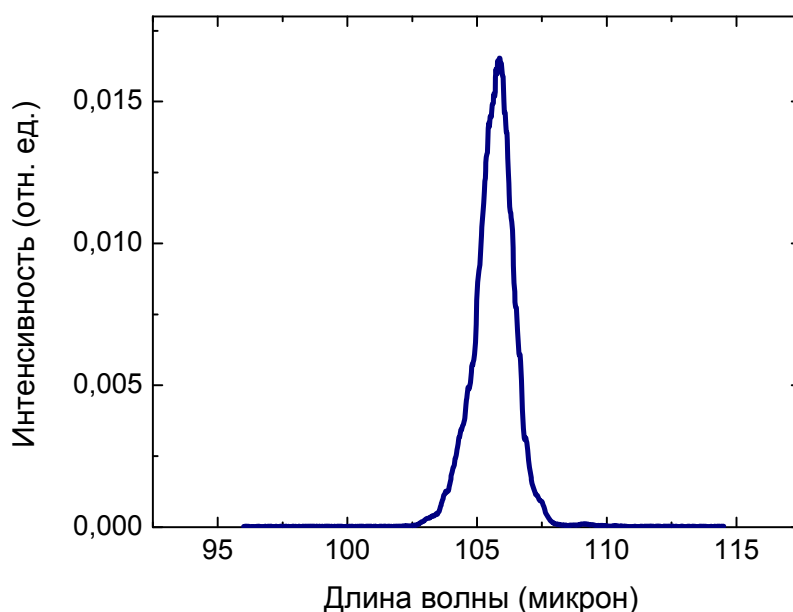


Рисунок 14 – Спектр излучения ЛСЭ для эксперимента по фотоионизации.

Рисунок 15 демонстрирует динамику релаксации Ge:Sb при фотоионизации донора при температуре 5К. Как следует из сравнения с опубликованными данными, измеренное время релаксации близко к измеренному на установке pump-probe FELBE, в центре Дрезден-Россендорф. В нашем случае фронт оказывается более пологим, что объясняется большей длительностью импульса. Время релаксации, таким образом, составляет порядка 1700 пс.

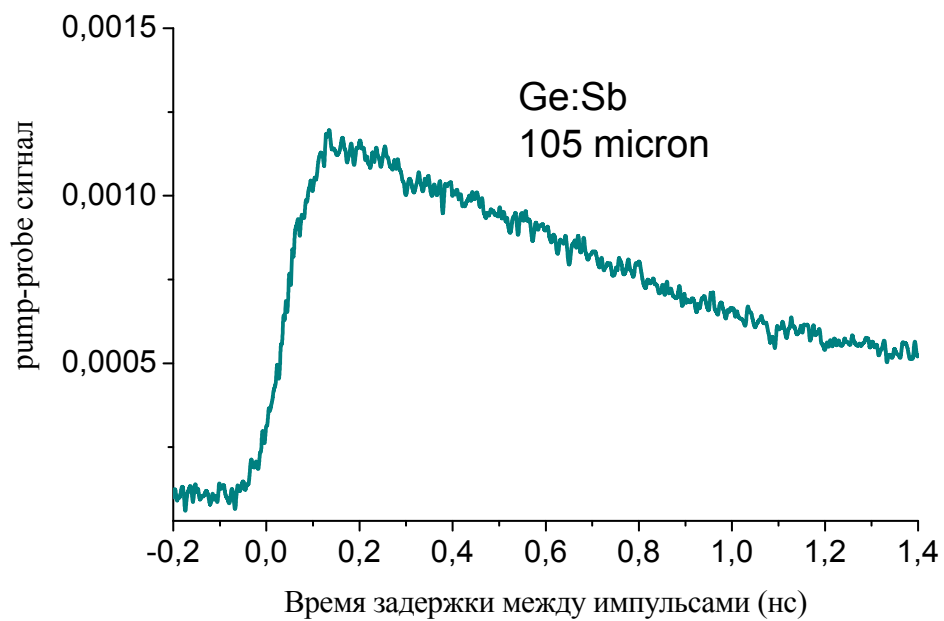


Рисунок 15 – Pump-probe сигнал для случая фотоионизации.

На рисунке 16 представлены скриншоты из опубликованной статьи [...], посвященной аналогичным измерениям в Ge:Sb, проведенным на pump-probe установке в HZDR с использованием излучения ЛСЭ FELBE.

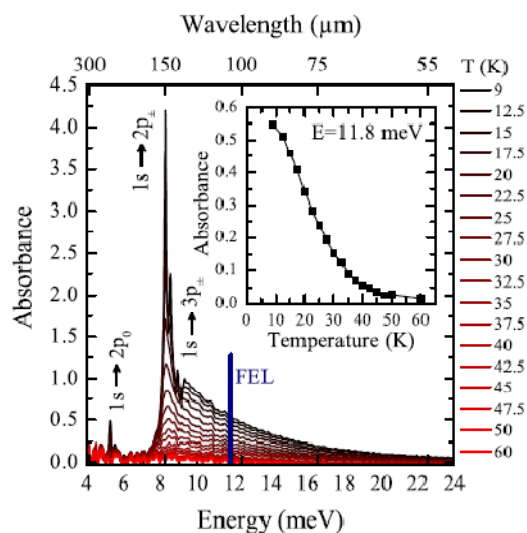


FIG. 2. (Color online) Absorbance (σNd) of the investigated Ge:Sb sample as a function of the temperature, showing spectral features corresponding to intracenter (discrete lines) and impurity-band transitions (continuum at energies larger than ~ 10 meV). The discrete lines correspond to transitions originating from the $1s(A_1)$ and $1s(T_2)$ antimony states, which is thermally populated. Inset: Absorbance in the sample at the FEL pump photon energy of 11.8 meV ($105 \mu\text{m}$) as a function of the sample temperature.

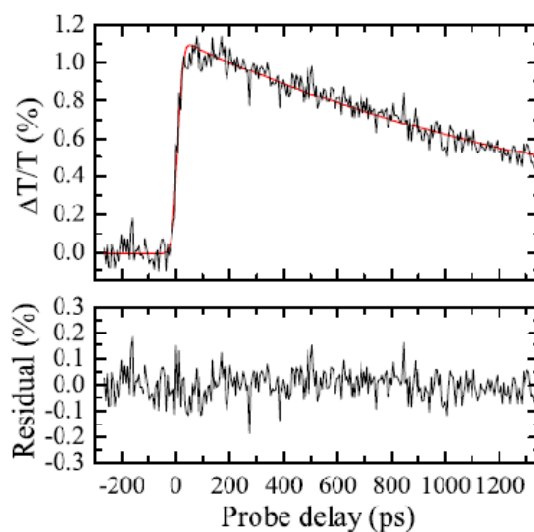


FIG. 4. (Color online) Pump-probe signal of the Ge:Sb sample at a pump-pulse energy of 0.3 nJ and a temperature of ~ 5 K. The straight red line is a fit using Eq. (6). The decay time is 1.7 ns. The residual is the difference between fit and measurement.

Рисунок 16 – Опубликованные результаты аналогичных измерений [8].

Сравнение результатов в этой статье и результата, полученного на собранной установке в Новосибирске, показывает их хорошее совпадение, что говорит о правильности работы собранной установки. Таким образом, продемонстрирована возможность измерения времен релаксации, на созданной в рамках настоящего проекта установке по измерению времен

изменения состояния среды методом пробного импульса с использованием излучения ЛСЭ на базе ИЯФ СО РАН.

Были проведены измерения времени релаксации при возбуждении локализованных примесных состояний. Рисунок 17 представляет спектр излучения ЛСЭ, соответствующий возбуждению состояния $2p_{\pm}$ сурьмы в германии (150 микрон). На рисунке 18 представлены результаты измерения методом пробного импульса для длины волны возбуждения 150 микрон при нескольких температурах.

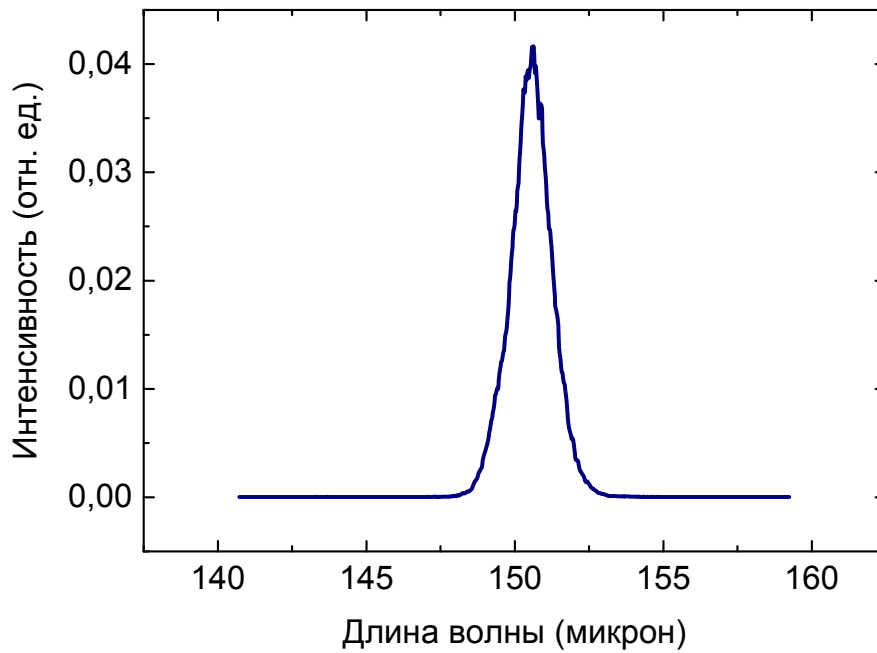


Рисунок 17 – Спектр излучения ЛСЭ для эксперимента по возбуждению состояния $2p_{\pm}$.

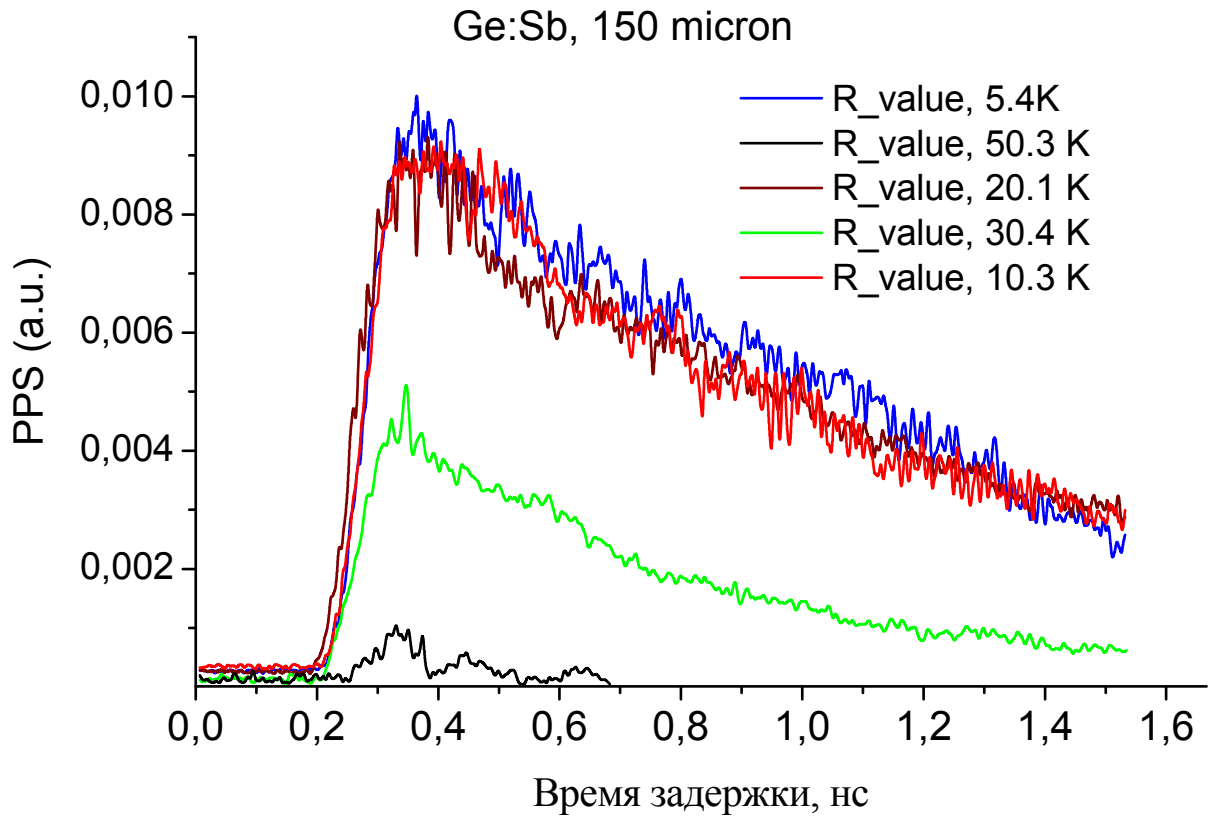


Рисунок 18 – Pump-probe сигнал для случая возбуждения $2p_{+/-}$ при различных температурах.

Ниже на рисунках 19, 20 представлены спектр возбуждения и pump-probe сигналы в случае исследования релаксационной динамики состояния $3p_{+/-}$ (длина волны возбуждения 142 микрон).

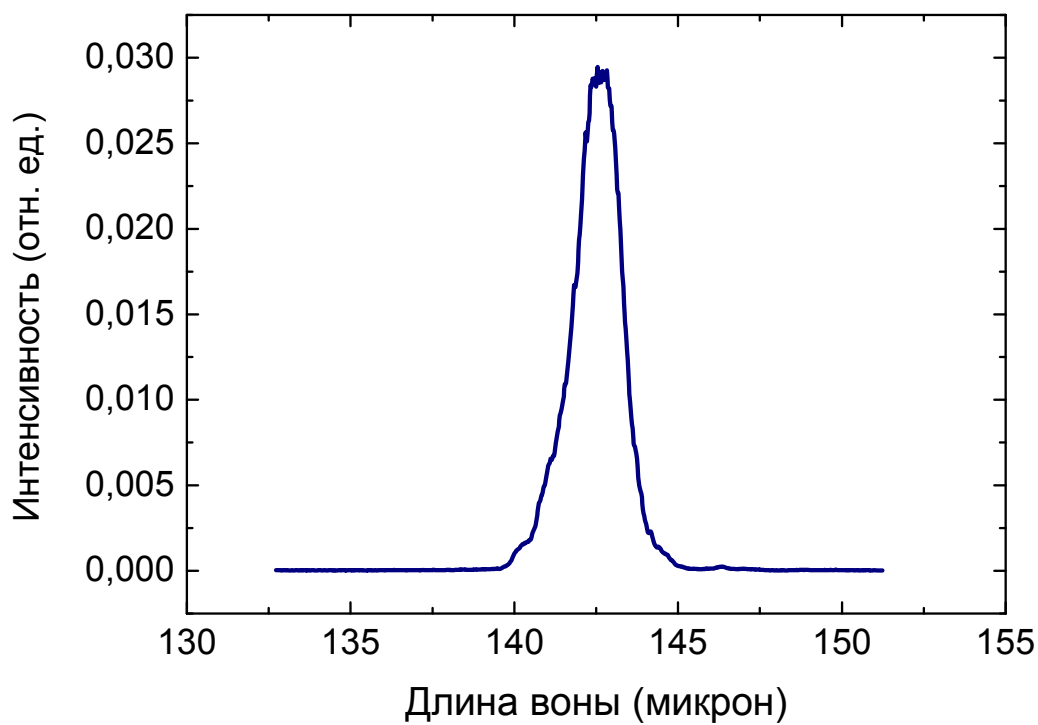


Рисунок 19 – Спектр излучения ЛСЭ для эксперимента по возбуждению Zr_{+} .

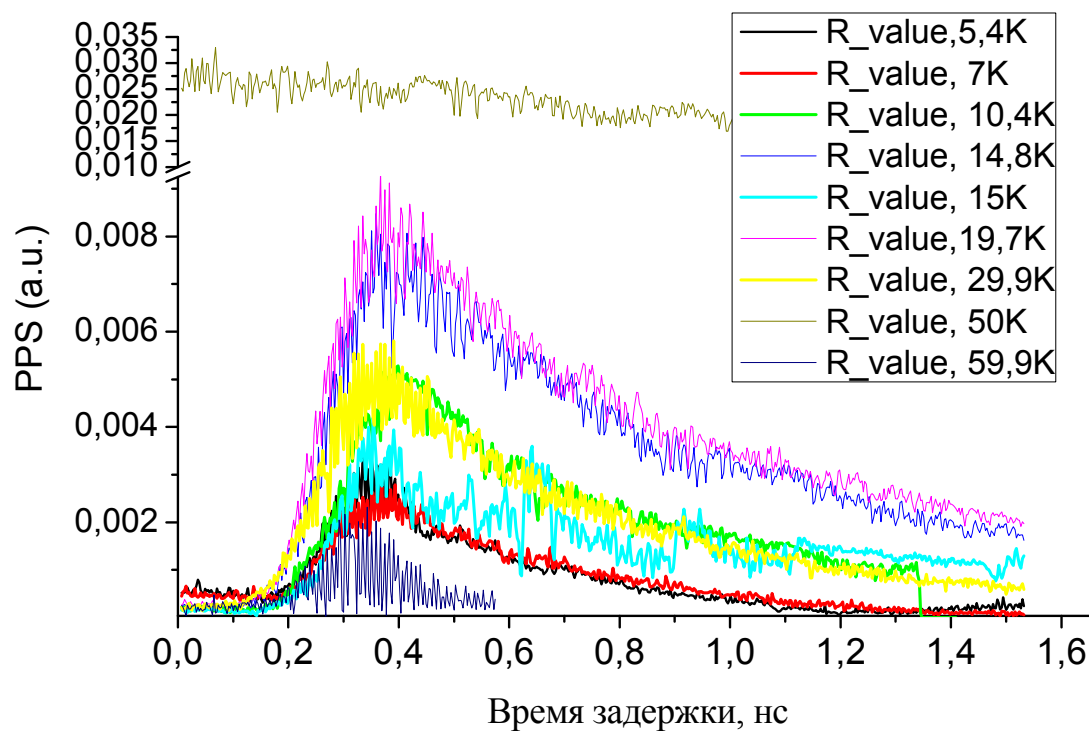


Рисунок 20 – Pump-probe сигнал для случая возбуждения Zr_{+} .

Как показывают результаты измерений, влияние температуры приводит к укорочению сигнала. Это можно связать с выбросом электронов в зону проводимости и населенностью возбужденных состояний.

Сравнение результатов измерений для фотоионизации и возбуждения локализованных состояний говорит о временах релаксации $3p_{+/-}$ порядка 600 пс. При накачке $2p_{+/-}$ времена оказываются на уровне 1200 пс. Таким образом, возбуждение более высоко лежащего состояния $3p_{+/-}$ дает более короткий отклик, что явно указывает на нарушение каскадной модели релаксации. Данное обстоятельство можно объяснить взаимодействием с междолинными фононами германия, имеющими энергию ~ 10 мэВ (ГА-фононы).

3. ПРОВЕДЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ТРЕБУЕМЫМИ НА ДАННОМ ЭТАПЕ КОНЦЕНТРАЦИЯМИ ПРИМЕСИ ОБРАЗЦОВ ОБЪЕМНОГО ГЕРМАНИЯ ГАЛЛИЕМ И КРЕМНИЯ ФОСФОРОМ МЕТОДОМ ЯДЕРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ НА ИСТОЧНИКЕ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. Л.Я. КАРПОВА

Процесс ядерного (нейтронного) легирования монокристаллического кремния осуществляется на исследовательском ядерном реакторе ВВР-ц филиала ФГУП «НИФХИ им. Л. Я. Карпова», расположенного в г. Обнинске Калужской обл. Работы проведены по договору № 229/4743-Д-ЕП-29-110-223-16 от 01.06.2016.

Метод ядерного (нейтронного) легирования германия и кремния заключается в том, что при облучении тепловыми нейтронами в результате ядерных превращений можно получить монокристалл с заданной концентрацией легирующей примеси.

Процесс ядерного (нейтронного) легирования монокристаллического кремния включает следующие технологические операции:

- приемка и входной контроль исходных монокристаллов кремния (заготовок);
- подготовка монокристаллов (слитков) к облучению;
- облучение слитков в реакторе;
- разампулировка и распаковка;
- дезактивация облучённых слитков;
- технологический дозиметрический контроль;
- подготовка облучённых слитков к отжигу;
- отжиг;
- подготовка слитков к измерению электрофизических параметров;
- измерение электрофизических параметров ядерно-легированного кремния (ЯЛК);
- выбраковка слитков ЯЛК;
- выходной дозиметрический контроль;
- упаковка слитков ЯЛК;

Методика нейтронного легирования кремния и германия описана в приложении Д.

На данном этапе были пролегированы две сборки образцов кристаллического германия, состоящих из четырех и двух образцов, и одна сборка, состоящая из шести образцов кристаллического кремния. Акт и протокол работ представлены в приложении Г. Все сборки образцов состояли из образцов с различным изотопным составом, что обуславливает

различную результирующую концентрацию примесей в образцах при одинаковом времени облучения сборок потоком тепловых нейтронов.

Легированные данным методом образцы отличаются очень высокой степенью однородности распределения примеси в кристалле, что обусловлено малым сечением поглощения тепловых нейтронов кристаллической решеткой. В ходе работ на данном этапе подвергнуты нейтронному облучению три сборки образцов, вследствие чего получены:

- шесть образцов монокристаллического кремния, легированного донорами фосфора с концентрацией $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

- четыре образца монокристаллического германия, легированных акцепторами галлия с концентрацией $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$;

- два образца монокристаллического германия, легированных акцепторами галлия с концентрацией $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$;

После облучения произведен отжиг образцов для устранения дефектов решетки, возникающих при облучении.

Проведенные работы по ядерному легированию соответствуют план-графику работ и требованиям технического задания.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ ФОСФОРА В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ.

Измерение темпов релаксации 2p-состояний мелкого донора фосфора в одноосно-деформированном кремнии – новая ранее не исследованная задача. Целью данной задачи является прямое измерение релаксационных времен возбужденных состояний доноров фосфора в объемном кристалле кремния в условиях одноосной деформации сжатия методом пробного импульса. Измерения проведены в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорфе (HZDR) с использованием излучения лазера на свободных электронах FELBE. Одноосная деформация приводит к расщеплению вырожденных вследствие многодолинности зоны проводимости кремния состояний, изменению энергий переходов между различными состояниями, и, как следствие, к изменению темпов излучения различных фононов при внутрицентральной релаксации. Последнее подтверждается существенным изменением пороговых характеристик кремниевого лазера на переходах между уровнями донора фосфора в условиях одноосной деформации образца в кристаллографическом направлении [100]. Такое изменение частично объясняется проведенными расчетами (см. отчет о ПНИ за 2-ой этап работ), но необходимо прямое экспериментальное подтверждение этого факта, что обуславливает необходимость проведенных работ. Измерение времен жизни состояний примеси методом пробного импульса дает как количественную, так и качественную информацию о влиянии одноосной деформации сжатия на физику релаксационных процессов в легированном мелкими донорами кристалле кремния.

Методика эксперимента, описана в Приложении Ж. В измерениях были использованы кремниевые образцы с концентрацией легирования $N_d = 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, которые были вырезаны в форме прямоугольных параллелепипедов с отполированными гранями. Образцы помещались внутрь специально спроектированного модуля давления (см. отчет о ПНИ за 3-ий этап). Величина прикладываемого к образцу давления контролировалась посредством измерения спектров инфракрасного поглощения, используя инфракрасный Фурье спектрометр. Измерения выполнялись в оптическом проточном криостате при температуре $T=5 \text{ К}$. Для достижения максимальной эффективности измерений поляризации пробного (probe) и накачивающего (pump) импульсов были ориентированы под углом 45° к направлению одноосного сжатия (см. рисунки 21, 22). В то же время лучи pump и probe импульсов направлены под углом 10 градусов друг к другу с ортогональными друг другу поляризациями.

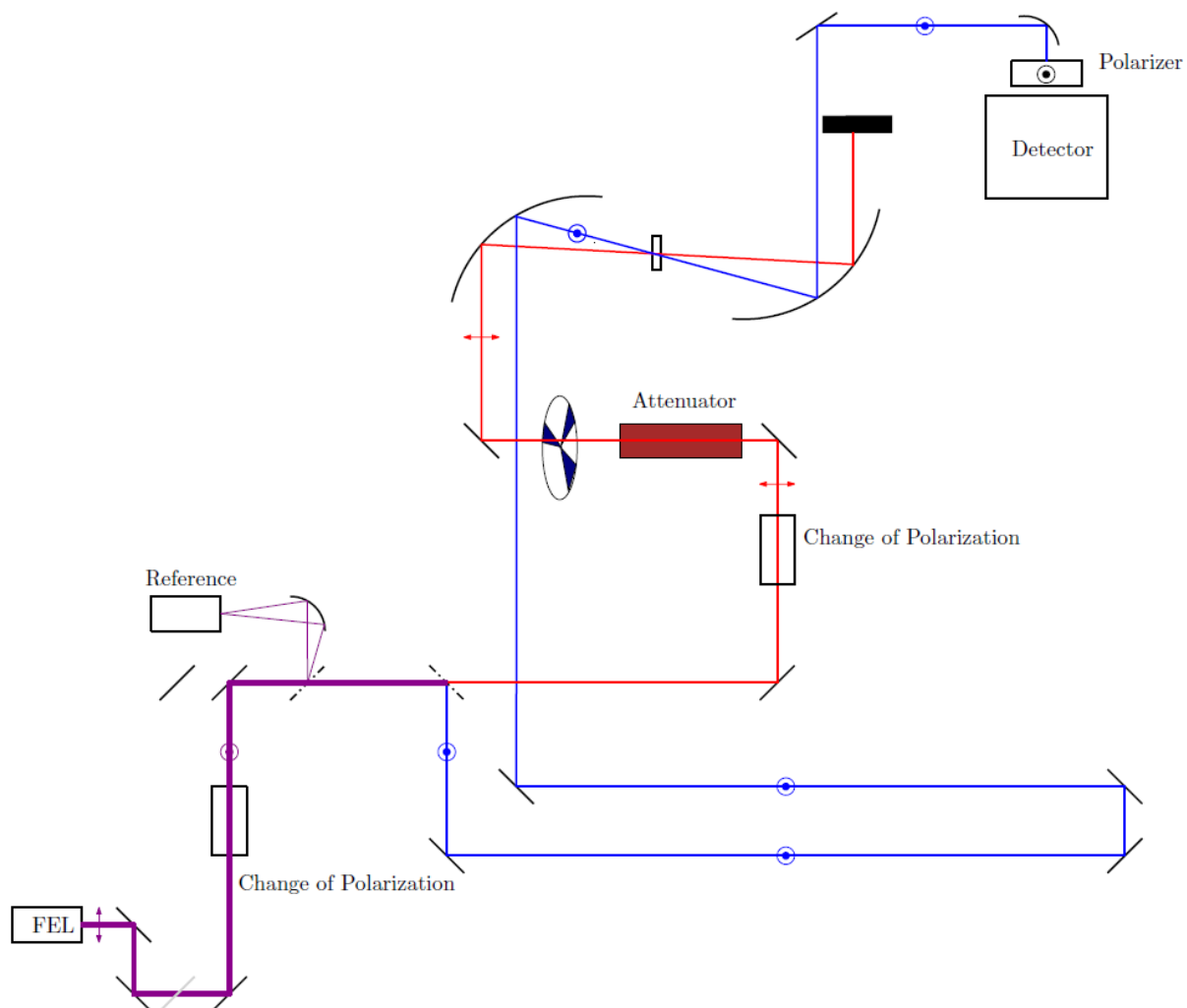
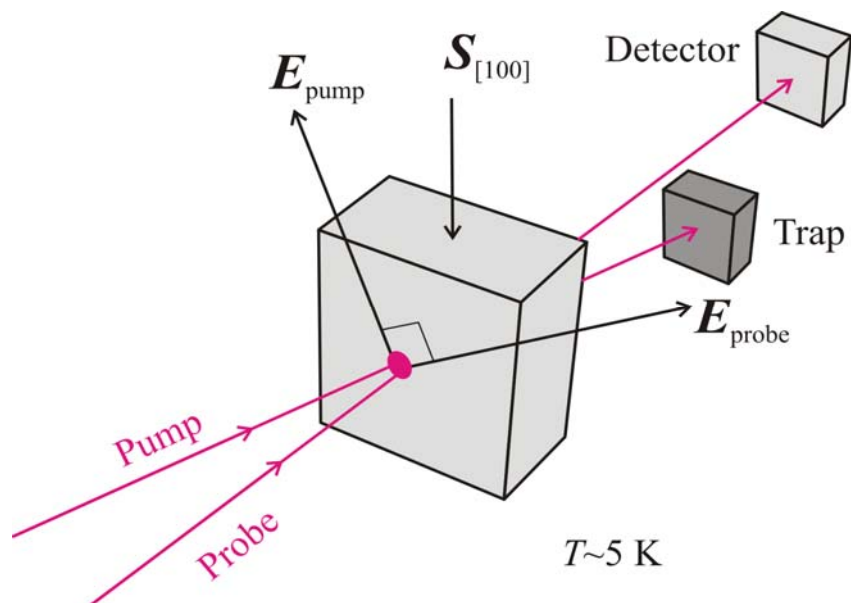


Рисунок 21 – Схема установки pump-probe на FELBE.



Рисуно22 – схема ориентации рупр и ргове лучей, а так же направление деформации в эксперименте.

На рисунке 23 показаны спектры прохождения и поглощения излучения ЛСЭ, проходящего через исследуемый образец. Этот спектр используется для более точной подстройки частоты излучения ЛСЭ под линии переходов.

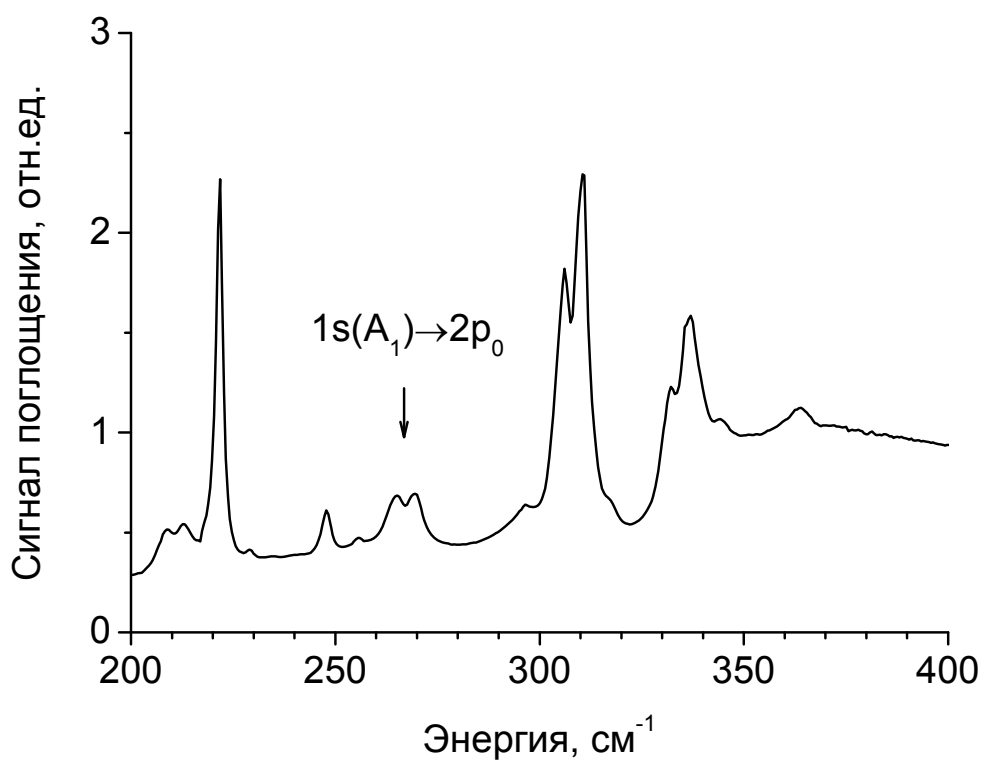
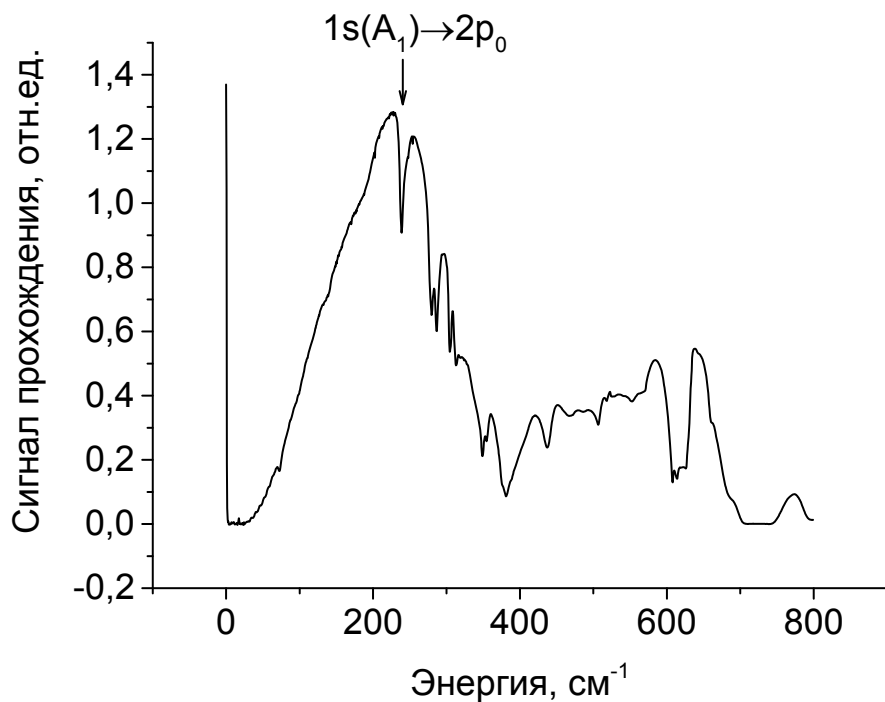


Рисунок 23 – Спектр прохождения при T=5К и спектр поглощения при T=40К через деформированный Si:P.

Рисунок 24 демонстрирует спектры излучения ЛСЭ FELBE, используемые в экспериментах.

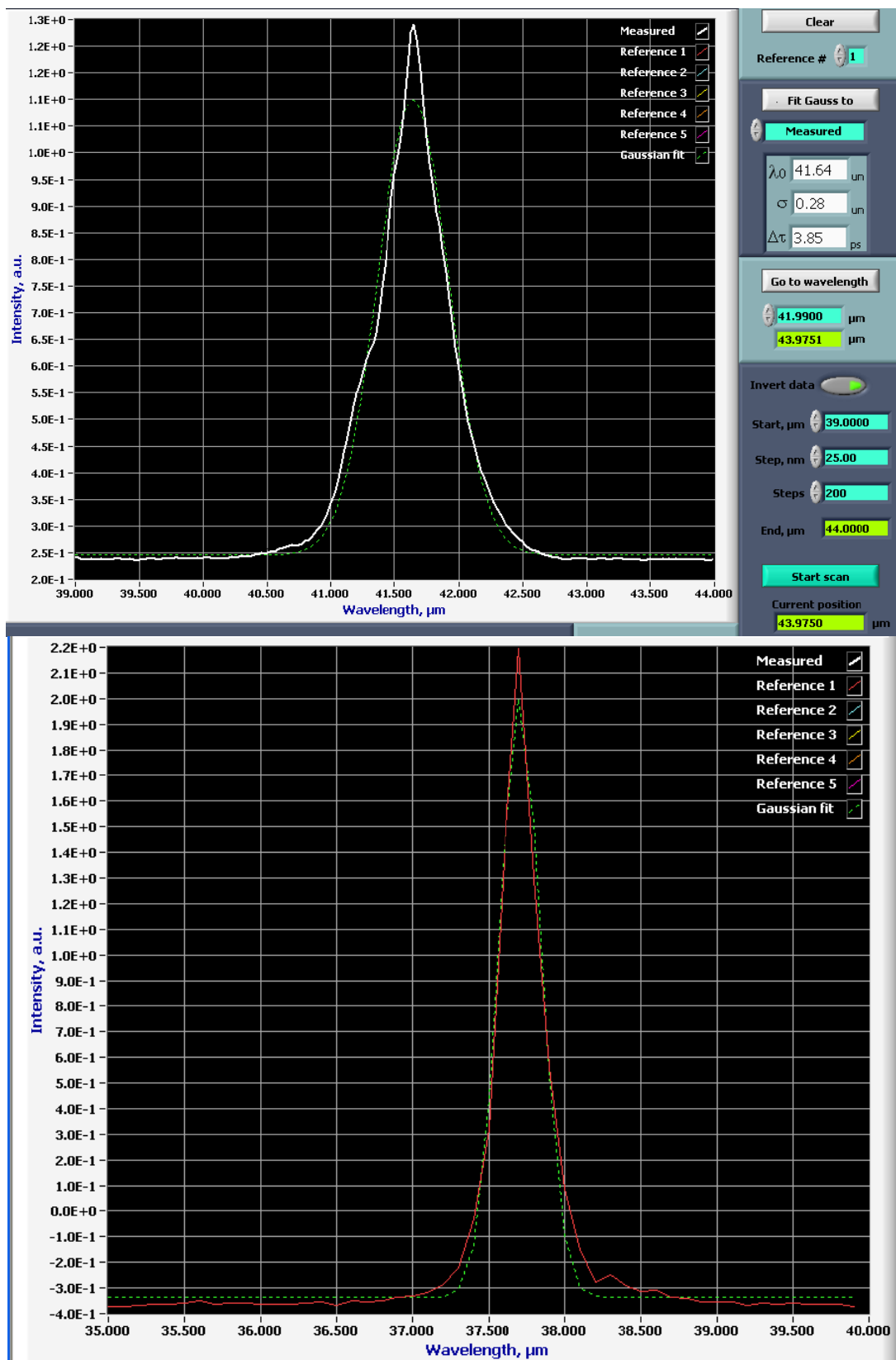


Рисунок 24 – осциллограммы спектров излучения ЛСЭ, используемого в эксперименте

На Рисунках 25, 26 представлены результаты измерения динамики релаксации при возбуждении в нижнюю компоненту $2p_0$ для двух значений деформации при плотностях мощности.

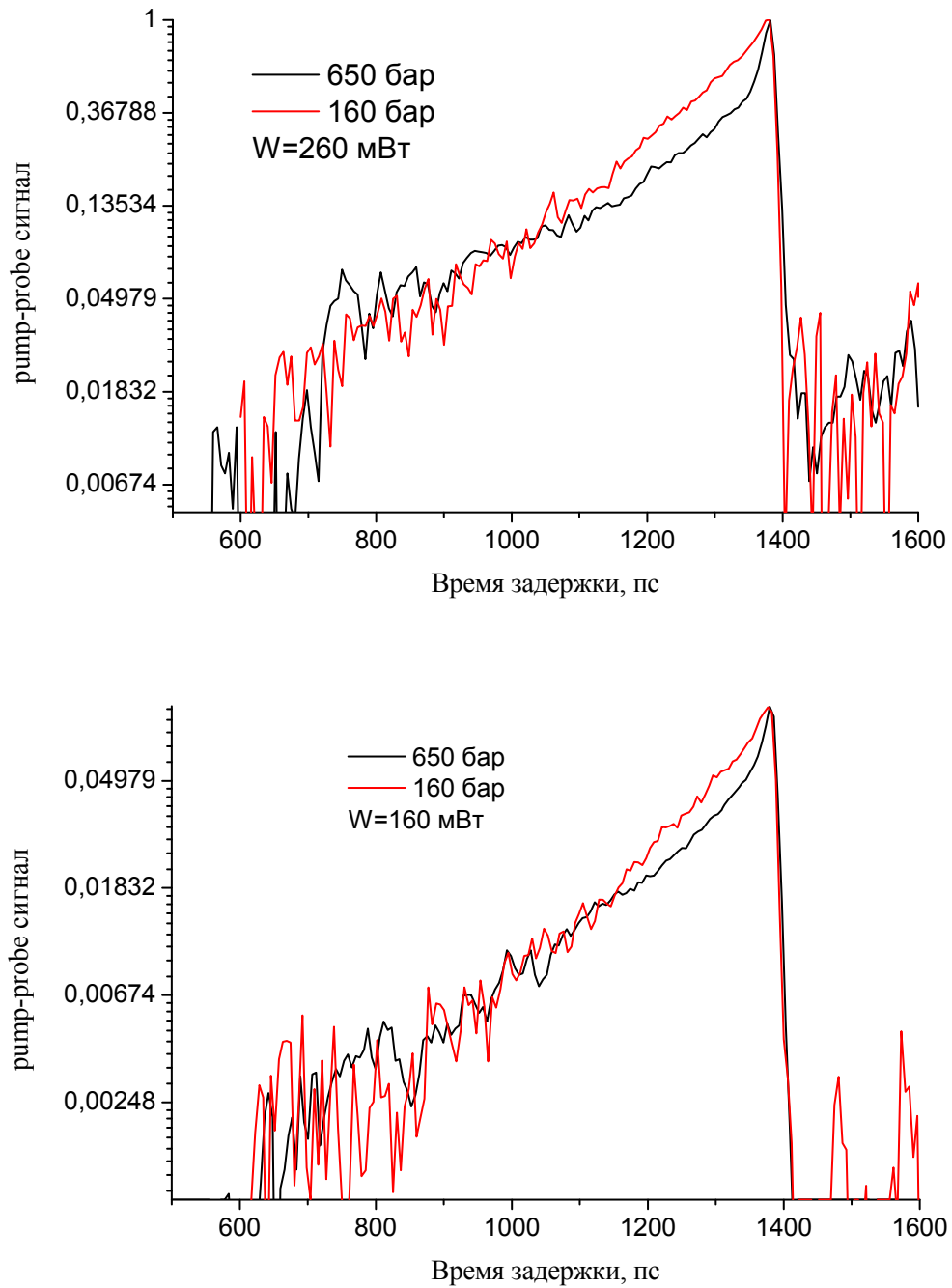


Рисунок 25 – pump-probe сигналы, полученные в эксперименте при мощности излучения ЛСЭ 160 и 260 мВт.

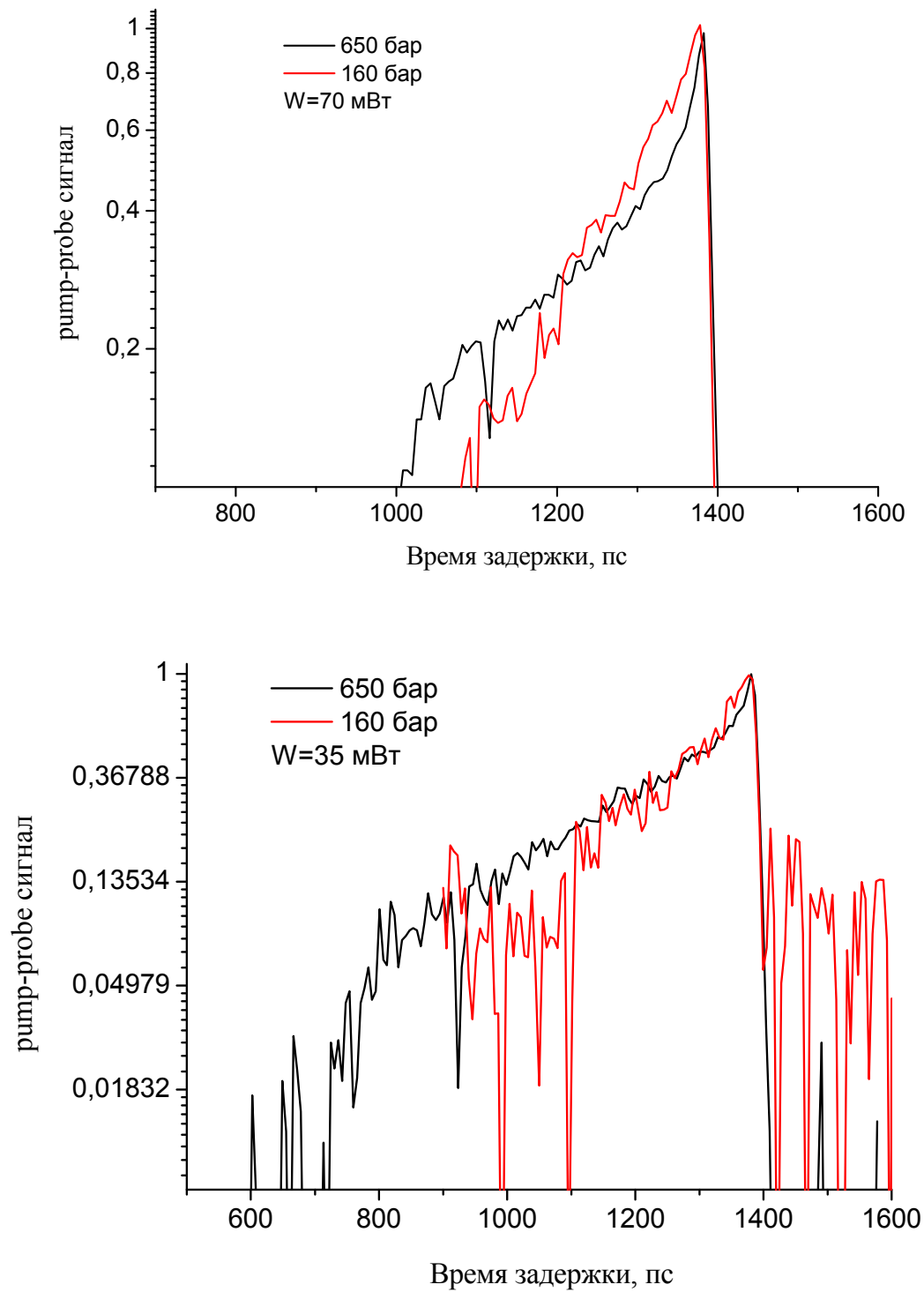


Рисунок 26 – pump-probe сигналы, полученные в эксперименте при мощности излучения ЛСЭ 35 и 70 мВт.

Таким образом, в течение выделенных рабочих смен на pump-probe установке в HZDR были выполнены серии измерений для двух значений прикладываемого к образцу давления, 150 и 650 бар вдоль кристаллографического направления [100]. Поскольку энергия перехода

$1s(A_1) \rightarrow 2p_0$ зависит от прикладываемого давления были использованы значения длин волн излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) 41.58 мкм и 37.64 мкм (рисунок 27). Излучение ЛСЭ было сфокусировано на площади 400 мкм с пиковой мощностью p_{imp} импульса 500 мВт. Рисунок 28 резюмирует описанные выше результаты измерения зависимости мощности пробного импульса (probe), прошедшего через образец на переходе между состояниями, связанными с нижними 2Δ -долинами зоны проводимости кремния $1s(A_1) \rightarrow 2p_0$, от времени его задержки относительно импульса накачки (p_{imp}) для обеих величин прикладываемых деформаций. Для лучшей иллюстрации физической зависимости прохождение probe импульса показано в логарифмическом масштабе. Результаты эксперимента показывают увеличение времени релаксации состояния $2p_0$ со 160 пс при давлении 150 бар до 260 пс при давлении 650 бар. Величина времени жизни измерялась как время задержки между p_{imp} и probe импульсами, при котором прошедший пробный импульс ослаблялся в e раз.

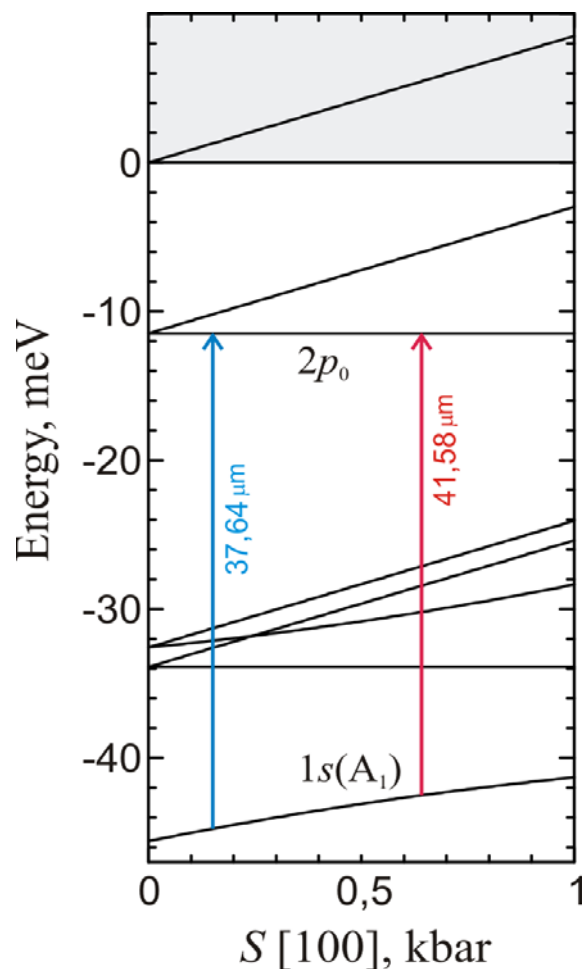


Рисунок 27 – схема, отражающая зависимость энергий уровней донора фосфора в кремнии в зависимости от величины прикладываемого к образцу давления.

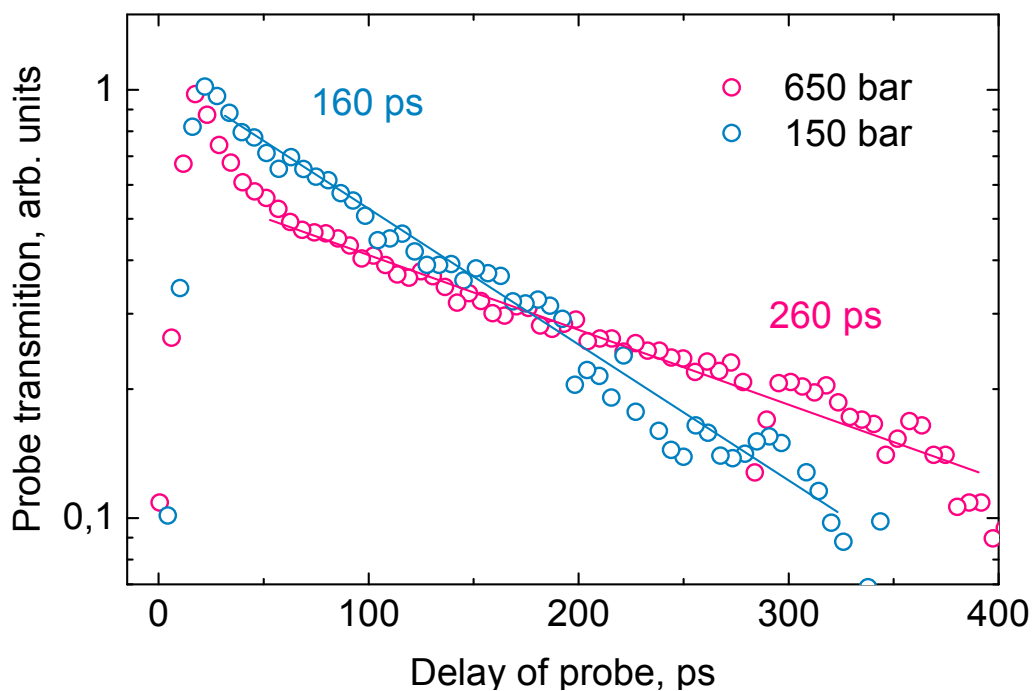


Рисунок 28 – Зависимость мощности пробного импульса, прошедшего через образец, на частоте перехода $1s (A_1) \rightarrow 2p_0$ от времени задержки (пс) пробного импульса относительно импульса накачки (pump-probe сигнал) для двух значений приложенной к образцу деформации.

Полученный результат подтверждает проведенные ранее вычисления темпов безызлучательной релаксации возбужденных состояний донора фосфора в кремнии. Согласно расчетам релаксация происходит главным образом вследствие междолинных переходов с излучением фононов. В недеформированном кремнии время жизни состояния $2p_0$ в сильной степени определяется излучением междолинных фононов f типа на переходе в отщепленную группу $1s$ -состояний. При приложении к образцу одноосной деформации происходит расщепление долин зоны проводимости кремния, и как следствие, изменение энергетических зазоров между различными связанными состояниями мелкого донора. Это приводит к нарушению резонанса с междолинными f -фононами, и уменьшению темпа релаксации возбужденного состояния $2p_0$.

Относительно уменьшение релаксационного темпа при большем значении деформации хорошо соотносится с расчетным отношением темпов при данных значениях прикладываемого давления.

Измерения времени жизни возбужденных состояний примесных центров в деформированных полупроводниках методом пробного импульса с использованием излучения ЛСЭ проводятся в рамках настоящего проекта впервые в мире, что обуславливает уникальность полученных результатов.

5. АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ ИНОСТРАННОГО ПАРТНЕРА

5.1 Обнаружение и исследование эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров и (или) акцепторов в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в г. Дрезден: исследование донора сурьмы. С помощью Фурье спектрометра будет измерен спектр поглощения на внутрицентровых переходах с основного состояния центра (серия Лаймана) в зависимости от интенсивности излучения ЛСЭ

Эксперимент по исследованию эффекта влияния сильного поля на локализованные состояния доноров сурьмы в кремнии проводился в следующей собранной установке на базе ЛСЭ: образец помещался в специальный медный держатель, крепящийся на холодном пальце в проточный гелиевый криостат STRATOS SL100. Охлаждение образца проводилось приблизительно до 6К. Излучение ЛСЭ необходимой длины волны (т.е. резонансной или нерезонансной к донорному переходу из основного состояния в возбужденное в диапазоне энергий между $2p_0$ и $3p_0$ состояниями донора) подводилось через фронтальное алмазное окно криостата. Излучение из образца выводилось в ортогональном направлении через специальный волновод с холодным сапфировым (Al_2O_3) и теплым полиэтиленовым (HDPE) окнами. Затем оно регистрировалось охлаждаемым Ge:Ga фотоприемником. Спектр излучения спектрально регистрировался монохроматором типа интерферометра Майкельсона фирмы Grobb-Parson.

В данной конфигурации эксперимента сдвиги линий стимулированного излучения на внутрицентровых переходах доноров сурьмы, вызванных влиянием поля лазера на свободных электронах, не происходили. Одной из возможных причин этого может быть недостаточное спектральное разрешение использовавшегося монохроматора (0,25/см) при максимальных плотностях потоков фотонов для регистрации слабого расщепления линий донорных переходов с участием возбужденных уровней сурьмы высокой степени вырождения в поле электромагнитной волны.

5.2 Исследование эффектов комбинационного рассеяния света на состояниях примесных центров (Рамановская спектроскопия): исследование сурьмы в кремнии.

Обнаружено стимулированное излучение на основе резонансного комбинационного рассеяния излучения лазера на свободных электронах на донорных центрах сурьмы в кремнии при низких температурах решетки (менее 10К) и плотностях потока фотонов, превышающих $1E24/cm^2/c$. Излучение имеет место при накачке с энергиями фотонов, превышающих возбуждение в состояние сурьмы типа $2p_0$ и вплоть до энергии, соответствующей накачке в состояние $3p_0$. Частота излучения сдвинута от частоты накачки на значение, равное разнице энергий связи основного состояния и состояния $1s(E)$, переход в которое из основного $1s(A_1)$ является в данном материале КРС-активным. Таким образом, наблюдается Стоксовое стимулированное излучение.

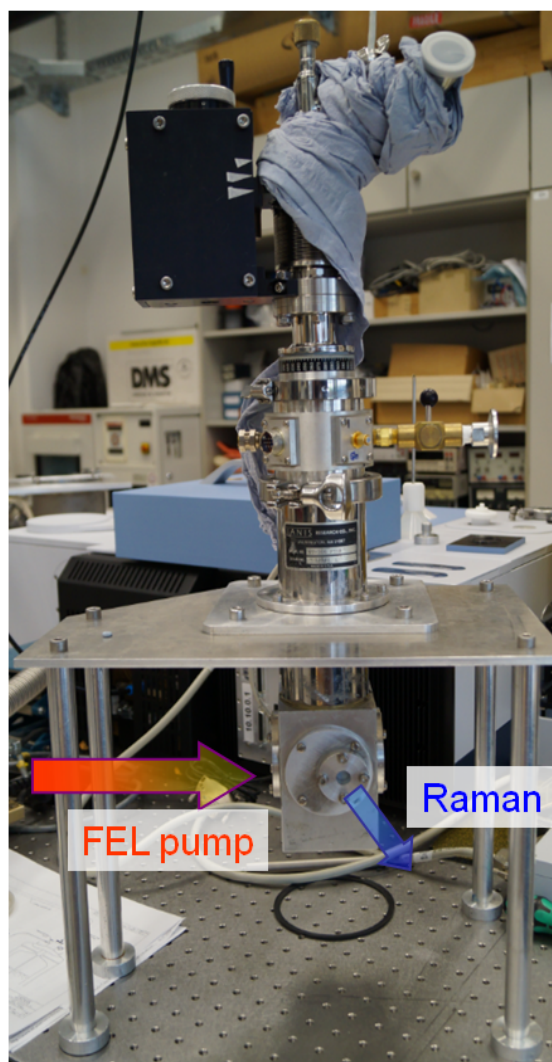
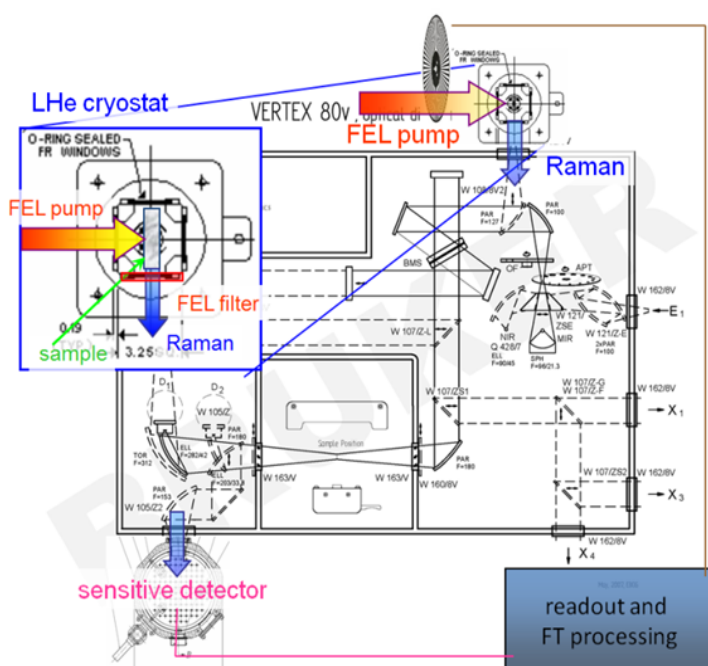


Рисунок 29 – Схема (слева) и фото (справа) экспериментальной установки по Рамановской спектроскопии

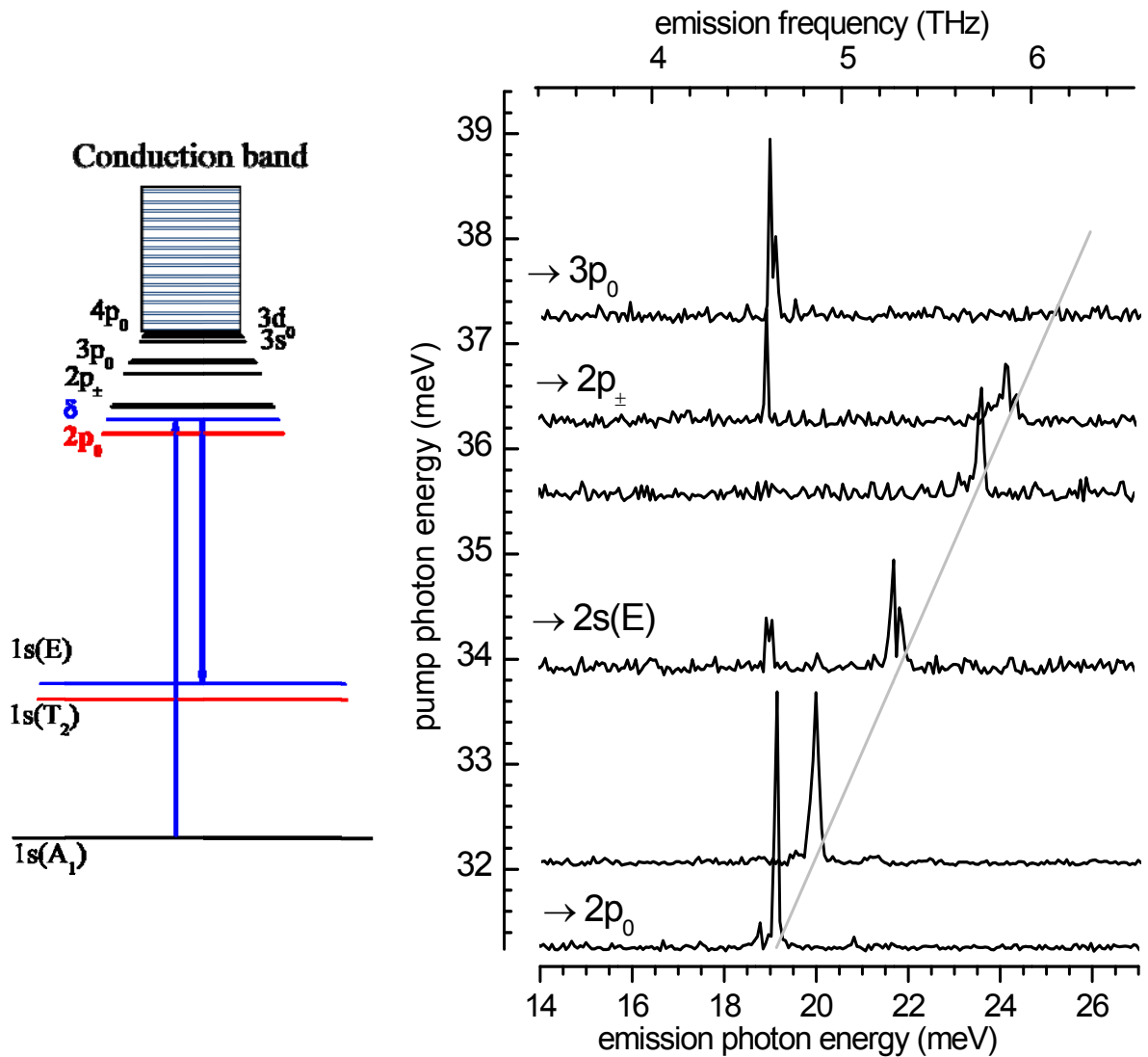


Рисунок 30 – Схема излучения при комбинационном рассеянии излучения лазера на свободных электронах на мелких донорных центрах в кремнии (слева); зависимость спектра Рамановского излучения доноров сурьмы в кремнии от частоты накачки (справа).

Спонтанное Стоксовое излучение не наблюдалось, по-видимому, из-за низкой величины и слабой направленности рассеянного излучения. Заметим, что конфигурация эксперимента не предусматривала специальной собирающей ТГц фотоны оптики – неперемного условия наблюдения спонтанного сигнала при КРС. Стоксовое излучение наблюдалось в образцах, легированных от $3E15/cm^3$ и до $6E15/cm^3$ с оптимумом у низкой границы диапазона. С

повышением температуры выше 10 К стимулированное Рамановское излучение пропадало. Относительно низкий порог стимулированного излучения в окрестности $2p_0$ состояния сурьмы предположительно может быть объяснен почти резонансным совпадением частоты $1s(E) \rightarrow 1s(A_1)$ перехода с энергией междолинного g-ТА фонона в кремнии. Именно взаимодействие донора с данным фононом, по-видимому, приводит к усилению эффекта КРС для кремния, легированного сурьмой.

5.3 Нелинейная терагерцовая спектроскопия экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп: применение монохроматического пробного излучения.

Девять рабочих смен на лазере на свободных электронах было выделено Научным консультационным комитетом для данного комплекса работ и выполнялись Дж. Шмидтом др. Ш. Виннерлом (J. Schmidt and Dr. S. Winnerl) (FEL-Proposals № 15100191 and № 15200423 «ТГц спектроскопия и ультрабыстрая динамика трехуровневой системы в одиночной широкой квантовой яме» ("THz-spectroscopy and ultrafast electron dynamics of a three level system in a broad single quantum well")). Эта работа включает в себя как измерения с использованием излучения лазера на свободных электронах одной частоты (одноцветная FEL-спектроскопия), так и измерения с широкополосным возбуждающим и узкополосным зондирующим систему излучением лазера на свободных электронах в терагерцовом диапазоне частот (THz FEL pump – broadband-THz-probe experiments).

При подготовке эксперимента предназначенные для исследований образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием оборудования центра Гельмгольца в Дрездене-Россендорфе (HZDR) и характеризованы с помощью транспортных, электроемкостных и магнетотранспортных (Шубников – де Гааз) измерений. Особенность задачи связана с маленьким поглощением внутри подзон единичной квантовой ямы, что требует применения модуляционной спектроскопии, при которой электрическим полем модулируется электронная плотность внутри квантовой ямы. Кроме того, были выполнены измерения разностного прохождения ТГц излучения при криогенных температурах, используя построенную ранее установку (без использования излучения лазера на свободных электронах), и проведена спектроскопия поглощения в инфракрасном диапазоне. Полученные экспериментальные результаты находятся в настоящее время в стадии анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе четвертого этапа по проекту Российскими участниками выполнены следующие работы:

1) Измерены вольт-амперные характеристики и спектр поглощения на внутризонных переходах выращенных гетероструктур в условиях температур жидкого гелия.

2) Создан прототип установки по измерению быстрых релаксационных процессов методом пробного импульса (накачка-зондирование) и проведены пробные измерения релаксации возбужденных состояний доноров сурьмы в кристалле германия при накачке в зону проводимости и внутрицентральной накачке излучением лазера на свободных электронах (NovoFEL).

3) Проведено нейтронное легирование образцов кремния и германия на уникальной установке «Многоцелевой модернизированный химико-технологический экспериментальный комплекс на базе исследовательского реактора ВВР-ц «Уникум»» в НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

4) Методом пробного импульса проведены измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров фосфора в одноосно-деформированном кремнии с использованием излучения ЛСЭ «FELBE».

Иностраным партнером:

1) Произведено обнаружение и исследование эффекта сильного поля – влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров сурьмы в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в г. Дрезден.

2) Проведены исследования эффектов комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия) на состояниях примесных центров сурьмы в кремнии.

3) Проведены работы по нелинейной терагерцовой спектроскопии экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп: с использованием монохроматического пробного излучения.

Работы Российского коллектива и иностранного партнера дополняют друг друга в плане исследования неравновесных состояний мелких примесных центров в кристаллах кремния и германия, обеспечивая полную картину физики явлений.

Задачи четвертого этапа работ по проекту выполнены полностью и соответствуют план-графику и требованиям технического задания. Сведения о ходе выполнения проекта размещены на официальном сайте ИФМ РАН (http://ipmras.ru/ru/results/sc_reports).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.П. Болховитянов, О.П. Пчеляков «Эпитаксия GaAs на кремниевых подложках: современное состояние исследований и разработок» // УФН, Т. 178, С. 459 (2008).
2. L. Pavesi, R. Turan (eds.) «Silicon Nanocrystals: Fundamentals, Synthesis and Applications», WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA, Weinheim (2010). 613 p.
3. H. Takagi, H. Ogawa, Y. Yamazaki, A. Ishizaki, T. Nakagiri «Quantum size effects on photoluminescence in ultrafine Si particles» // Appl. Phys. Lett., V. 56, P. 2379 (1990).
4. L.T. Canham «Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers» // Appl. Phys. Lett., V. 57, P. 1046 (1990).
5. P.D.J. Calcott, K.J. Nash, L.T. Canham, M.J. Kane, D. Brumhead «Identification of radiative transitions in highly porous silicon» // J. Phys.: Condens. Matter, V. 5, P. L91 (1993).
6. P.D.J. Calcott, K.J. Nash, L.T. Canham, M.J. Kane, D. Brumhead «Spectroscopic identification of the luminescence mechanism of highly porous silicon» // J. Lumin., V. 57, P. 257 (1993).
7. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, F. Priolo «Optical gain in silicon nanocrystals» // Nature, V. 408, P. 440 (2000).
8. N. Deßmann, S. G. Pavlov, V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, V. V. Tsyplenkov, S. Winnerl, M. Mittendorff, N. V. Abrosimov, H. Riemann, and H.-W. Hübers, Time-resolved electronic capture in *n*-type germanium doped with antimony, Physical Review B **89**, 035205 (2014).