

Министерство образования и науки Российской Федерации
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РАН – ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ 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
« 29 » декабря 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:

РАМАНОВСКАЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ. ИЗМЕРЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА. СПЕКТРОСКОПИЯ НАСЫЩЕНИЯ
(промежуточный)
Этап 5

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. Шагин

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 заключение)

подпись, дата

Исполнители:

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

Юрасов Д. В. (раздел 1)

подпись, дата

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

Цыпленков В. В. (раздел 4)

подпись, дата

Электроник, без ученой степе-
ни, без ученого звания

Сергеев С. М. (раздел 3, 5)

подпись, дата

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

Орлов М. Л. (раздел 6)

подпись, дата

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

Орлова Е. Е. (раздел 4)

подпись, дата

Младший научный сотрудник,
аспирант

Дербенева Н.В. (раздел 4)

подпись, дата

Младший научный сотрудник,
кандидат физико-
математических наук, без уче-
ного звания

Ковалевский К. А. (раздел 2, 4)

подпись, дата

Старший научный сотрудник,
кандидат физико-
математических наук, без уче-
ного звания

Жукавин Р. Х. (раздел 2, 3,5)

подпись, дата

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

Бекин Н. А. (раздел 1)

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 159 с., 48 рис., 8 источников, 9 приложений

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.

Задачами пятого этапа являются:

- измерение спектров пропускания образцов кремния и германия, легированных донорами и акцепторами методом ядерной трансмутации (нейтронное легирование);
- измерение временной динамики релаксации неравновесных состояний акцепторов галлия в одноосно-деформированном германии на собранной в рамках данного проекта установке на базе лазера на свободных электронах и ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения;
- измерение временной динамики релаксации неравновесных состояний доноров сурьмы и мышьяка в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса с использованием излучения лазера на свободных электронах FELBE;
- теоретические расчеты темпов релаксации состояний примесных центров в кремнии германии в условиях одноосной деформации кристаллов;
- проведение измерений по спектроскопии насыщения на примесных переходах в кристалле германия с использованием лазера на свободных электронах и ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения;
- проведение патентных исследований и подача заявки на патент
- обнаружение и исследование эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров мышьяка в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в г. Дрезден;
- исследование эффектов комбинационного рассеяния света на состояниях примесных центров (Рамановская спектроскопия): исследование мышьяка в кремнии.
- нелинейная терагерцовая спектроскопия экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп: применение монохроматического пробного излучения.

Работы пятого промежуточного этапа проведены с использованием современных апробированных методов. Российской стороной совместного проекта работы выполнены с использованием одной уникальной научной установки, оборудования двух центров коллективного пользования и

одного объекта зарубежной инфраструктуры. Задачи пятого этапа были выполнены полностью. Проведенные работы полностью соответствуют план-графику и требованиям технического задания.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДОНОРАМИ И АКЦЕПТОРАМИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СПЕКТРА ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ.	9
2. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ АКЦЕПТОРОВ ГАЛЛИЯ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА СОБРАННОЙ В РАМКАХ НАСТОЯЩЕГО ПРОЕКТА УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	2
2.1 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	2
2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ	2
3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ СУРЬМЫ И МЫШЬЯКА В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА.	4
4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТ ОДНООСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТЕМПОВ РЕЛАКСАЦИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ.	15
4.1 РАСЧЕТЫ ТЕМПОВ РЕЛАКСАЦИИ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ.....	15
4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ В ДЕФОРМИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ КРЕМНИЯ	21
4.3 ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И СКОРОСТИ БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ АТОМОМ ФОСФОРА.....	28
5. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СПЕКТРОСКОПИИ НАСЫЩЕНИЯ НА ПРИМЕСНЫХ ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНИЯ, КОТОРЫЕ ДАЮТ ИНФОРМАЦИЮ О ВРЕМЕНАХ ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ. ИЗМЕРЕНИЯ ПРОВЕДЕНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ НА БАХЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	34
5.1 ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	34
5.2 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ	34
6. ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	38
7. АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ ИНОСТРАННОГО ПАРТНЕРА.....	76
7.1 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 ДОНОРОВ МЫШЬЯКА. С ПОМОЩЬЮ ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА БУДЕТ ИЗМЕРЕН СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ НА ВНУТРИЦЕНТРОВЫХ ПЕРЕХОДАХ С ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРА (СЕРИЯ ЛАЙМАНА) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛСЭ.	76
7.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА СОСТОЯНИЯХ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ (РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ): ИССЛЕДОВАНИЕ МЫШЬЯКА В КРЕМНИИ.	77
7.3 НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ III-V ГРУПП: ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРОБНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	79

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	82
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ И ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДОНОРАМИ И АКЦЕПТОРАМИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДОНОРАМИ И АКЦЕПТОРАМИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ.....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ И ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА СОБРАННОЙ В РАМКАХ НАСТОЯЩЕГО ПРОЕКТА УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Г МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА СОБРАННОЙ В РАМКАХ НАСТОЯЩЕГО ПРОЕКТА УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Д АКТ И ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Е МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж АКТ РАБОТ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА ННГУ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО	144
ПРИЛОЖЕНИЕ З АКТ И ПРОТОКОЛ РАБОТ ПО СПЕКТРОСКОПИИ НАСЫЩЕНИЯ НА ПРИМЕСНЫХ ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНИЯ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ И МЕТОДИКА СПЕКТРОСКОПИИ НАСЫЩЕНИЯ НА ПРИМЕСНЫХ ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНИЯ.....	149

ВВЕДЕНИЕ

Работы пятого этапа являются очередным необходимым шагом к достижению общих целей совместного Российско-Германского 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) и проведение исследований релаксационной динамики неравновесных состояний мелких примесей в кристалле германия с ее использованием. На данном этапе были проведены исследования времен релаксации состояний акцепторов галлия в одноосно-деформированном германии методом пробного импульса (pump-probe) и спектроскопии насыщения при возбуждении системы излучением ЛСЭ на резонансной частоте внутрицентровых переходов.

Параллельно в соответствии с планом были проведены работы по исследованию физики неравновесных состояний мелких примесных центров в кремнии. Так в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорф проведены исследования динамики релаксации возбужденных донорных центров сурьмы и мышьяка в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса с использованием излучения ЛСЭ FELBE. Измерения релаксационной динамики методом пробного импульса в деформированных кристаллах проводятся в ходе настоящего проекта впервые в мире.

На данном этапе были проведены теоретические расчеты времен релаксации возбужденных состояний донорных центров в кремнии и германии. Цель таких работ – интерпретация получаемых результатов измерений методом пробного импульса. Были продолжены так же теоретические исследования физики неравновесных состояний мелких примесей в наноструктурах. Рассматривались нанокристаллы кремния, легированные донорами фосфора. Полупроводниковые наноструктуры 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.

За прошедшие с тех пор годы большие усилия теоретиков 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, пассив-

вация 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 остаются до конца не известными (например, спектр нейтрального донора магния). И использование расчетов из первых принципов является очень перспективным методом исследования.

Задачей иностранного партнера в рамках совместного проекта является построение исследовательских установок на базе ЛСЭ в Дрездене-Россендорфе и проведение соответствующих исследований. На данном этапе проведены работы по обнаружению и исследованию эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров мышьяка в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в Исследовательском Центре Дрезден-Россендорф (FELBE). Измерение спектра с помощью Фурье спектрометра показало, что в донорах мышьяка в кремнии линия стимулированного излучения не претерпевает сдвига под действием когерентного резонансного излучения ЛСЭ.

Были так же проведено исследование эффектов комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия) на донорах мышьяка. Наблюдается сдвиг линии стимулированного излучения на внутрицентровых переходах мелких доноров при изменении частоты накачки лазером на свободных электронах.

В рамках работ по нелинейной терагерцовой спектроскопии экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп были проведены эксперименты, используя измерительную станцию, которая была подготовлена на предыдущих этапах проекта. Нелинейная ТГц спектроскопия дала большое количество высококачественных данных по III-V квантовым структурам.

Научные работы иностранного и Российского коллективов занимаются изучением разных эффектов, но имеют общий объект исследования – кристаллический кремний и германий, легированные мелкими примесными центрами. В этом плане работы являются взаимодополняющими, научно-прикладная цель которых – развитие источников и детекторов электромагнитного излучения в ТГц диапазоне частот.

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

1. Измерение спектров пропускания образцов кремния и германия после нейтронного легирования донорами и акцепторами для уточнения спектра энергий электронных состояний.

Работы данного пункта план-графика выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур» – вакуумного Фурье-спектрометра BRUKER Vertex 80V. Акт и протокол работ представлены в приложении А. Методика измерений представлена в приложении Б. Характеристики этого прибора представлены в таблице 1.

Спектральный диапазон	Дальний ИК/ТГц: 5-680 см ⁻¹ ; Средний и ближний ИК: 380-15000 см ⁻¹ ; Видимый: до 25000 см ⁻¹ .
Детекторы	DTGS; HgCdTe(77 К); InSb(77К); InGaAs; Si; Болометр для дальней ИК области (4.2К).
Разрешение	до 0.07 см-1
Step Scan	есть, временное разрешение до 10 нс

На четвертом этапе работ по проекту было произведено нейтронное легирование двух сборок образцов германия и одной сборки образцов кремния. Из каждой сборки был взят один образец и подготовлен для спектральных измерений с целью уточнения спектра состояний примесных центров и определения качества легирования.

Перед спектроскопическими измерениями была проведена подготовка образцов. Из слитков кремния и германия были вырезаны пластины с не плоскопараллельными гранями для исключения влияния переотражения излучения внутри образца. Измерения проводились при температуре образца ~4 К.

На рисунке 1 показан спектр поглощения образца кремния, легированного донорами фосфора, из первой сборки с концентрацией $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В спектре явно видны линии донора фосфора. Линии довольно узкие, что говорит о соответствии качества нейтронного легирования образцов требуемому. На рисунках 2 и 3 показаны аналогичные спектры для германиевых образцов из двух различных сборок с концентрациями легирования акцепторами галлия $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

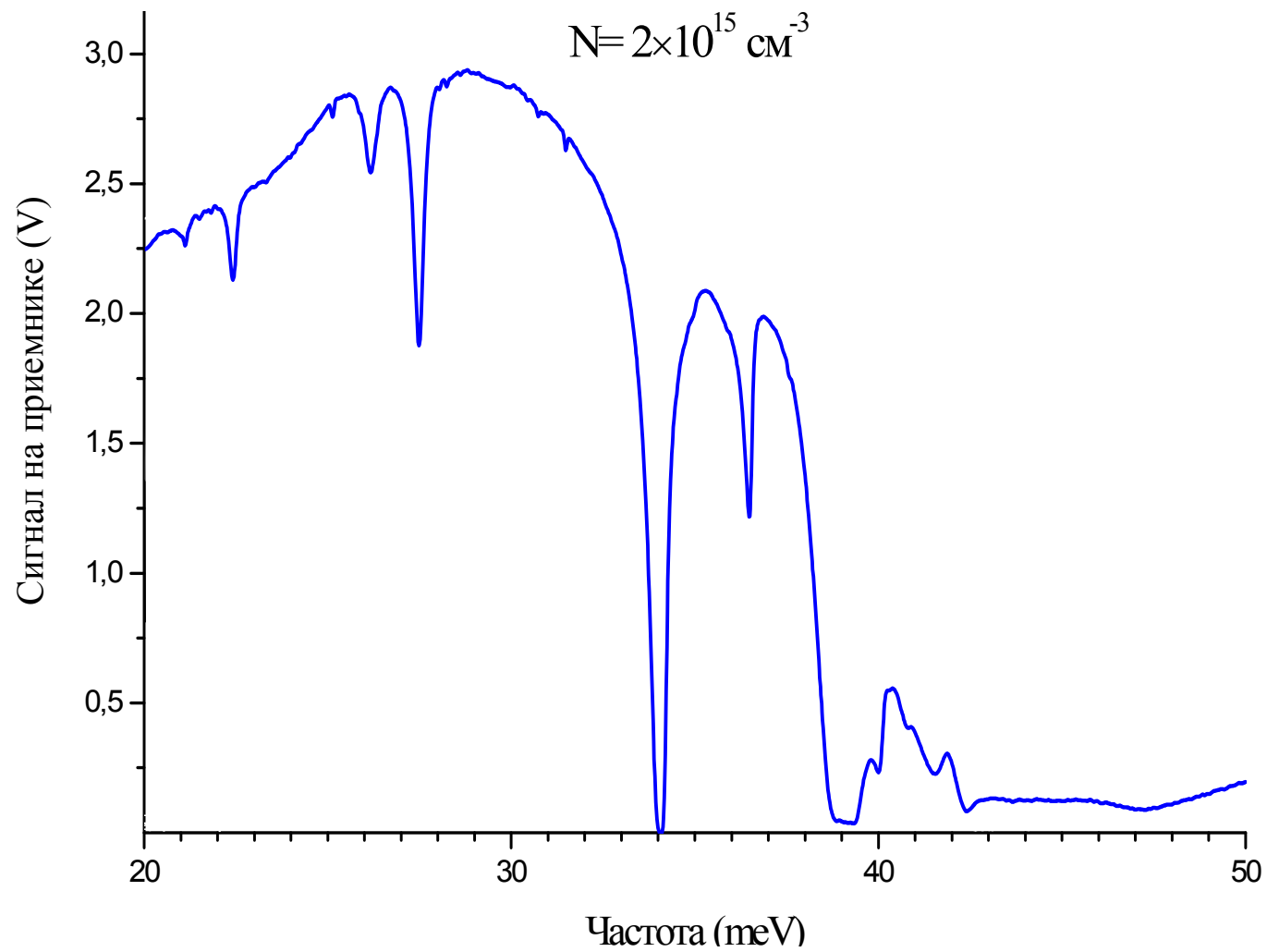


Рисунок 1 – Спектр пропускания образца кремния, легированного донорами фосфора до концентрации $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

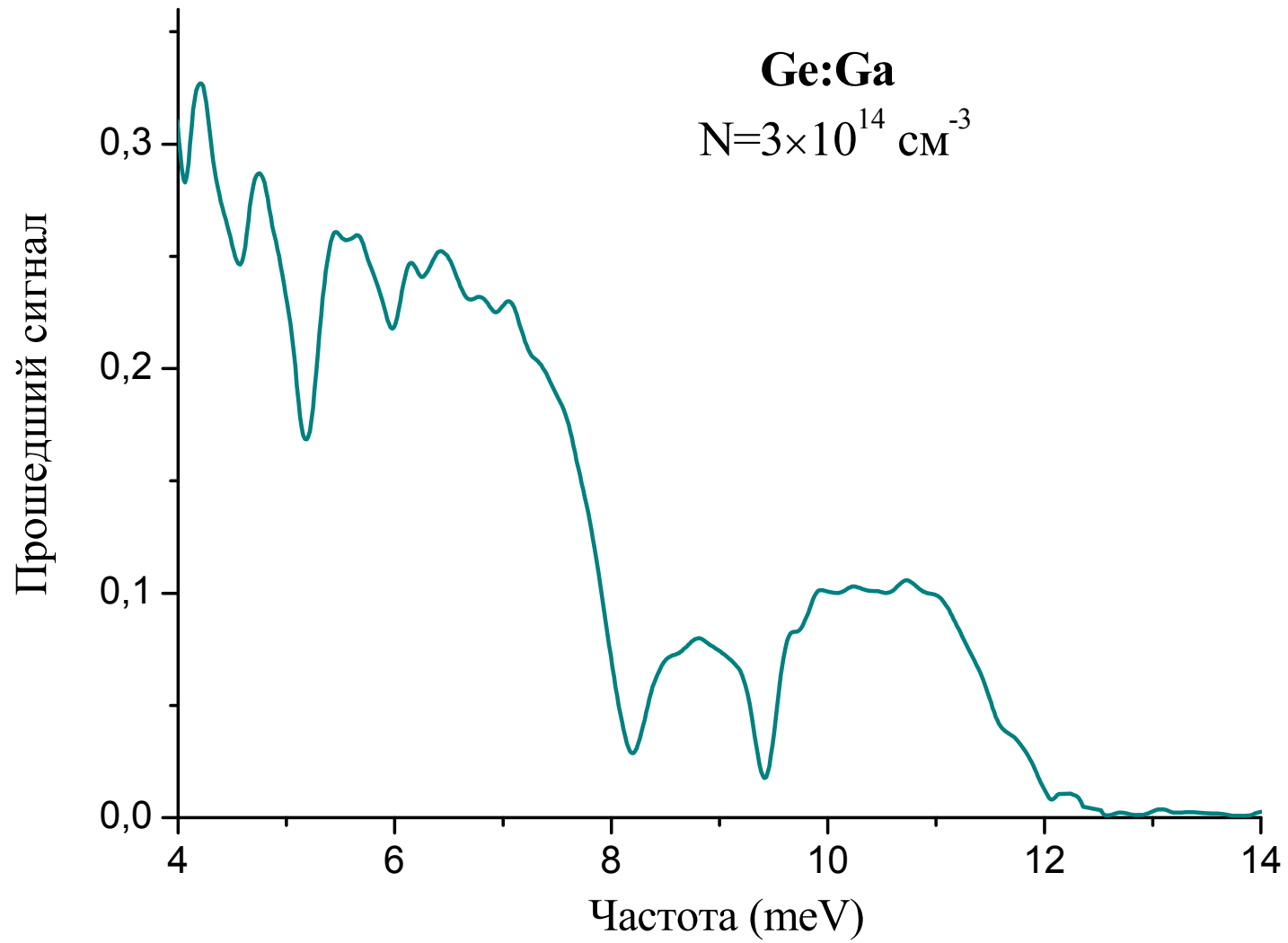


Рисунок 2 – Спектр пропускания образца германия, легированного акцепторами галлия до концентрации $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

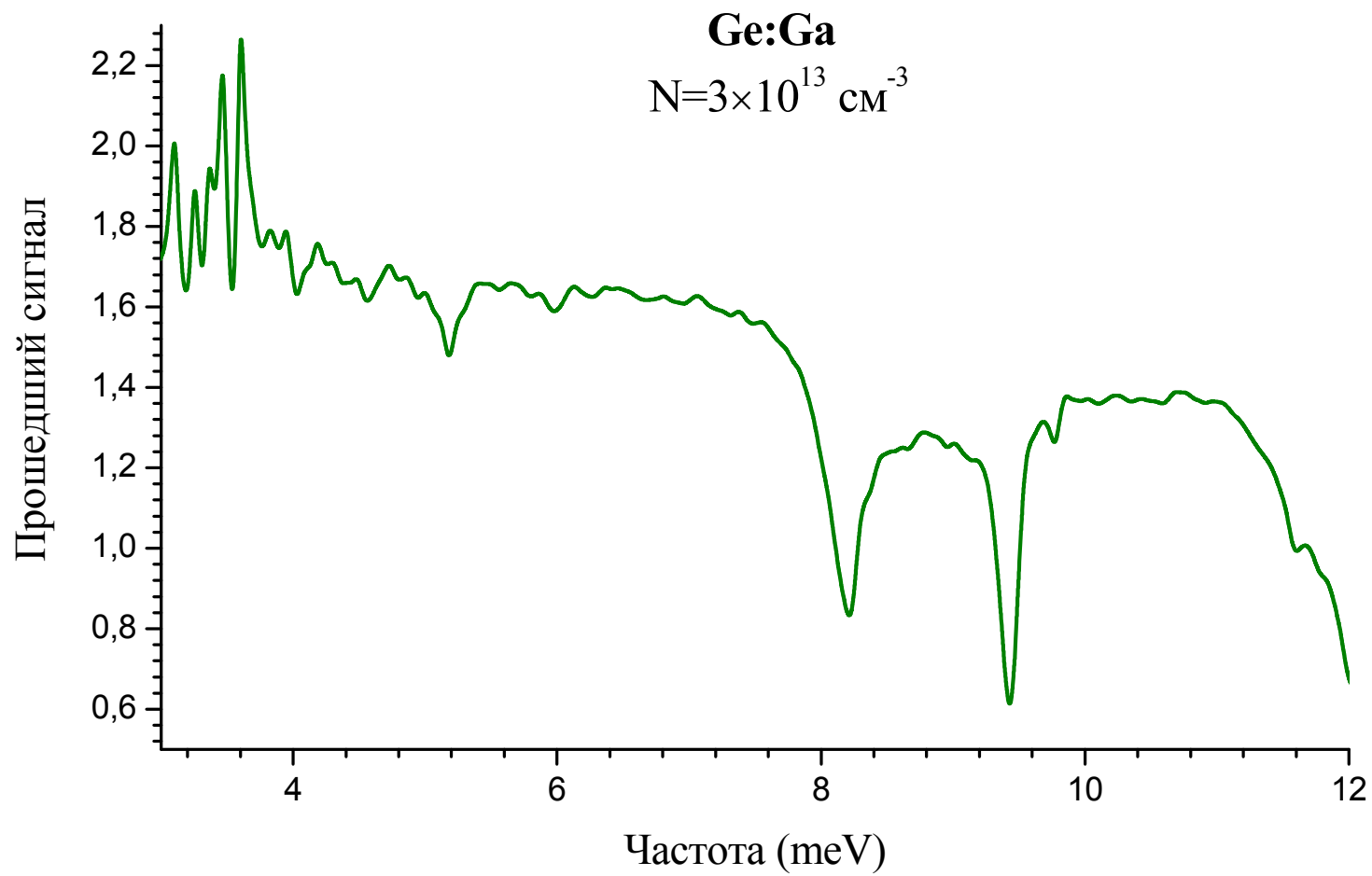


Рисунок 3 – спектр пропускания легированного галлием германиевого образца.
Концентрация галлия $N= 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Как видно из рисунков 2 и 3 для германиевого образца с меньшей концентрацией легирования наблюдаются более узкие линии поглощения (в диапазоне от 8 до 10 мЭВ), что связано с меньшим неоднородным уширением спектральных линий при меньших концентрациях примесных центров.

2. Проведение измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний акцепторов галлия в одноосно-деформированном германии на собранной в рамках настоящего проекта установке на базе ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения.

2.1 Используемое оборудование

Работы данного раздела проведены с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах, который относится к уникальным научным установкам, а так же оборудования центра коллективного пользования «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения». Акт и протокол работ представлены в приложении В, методика измерений – в приложении Г.

2.2 Результаты работ

Рисунок 4 демонстрирует временную динамику германиевого кристалла, легированного акцепторами галлия, при возбуждении длиной волны 105 микрон. Такая длина волны соответствует возбуждению в дно валентной зоны.

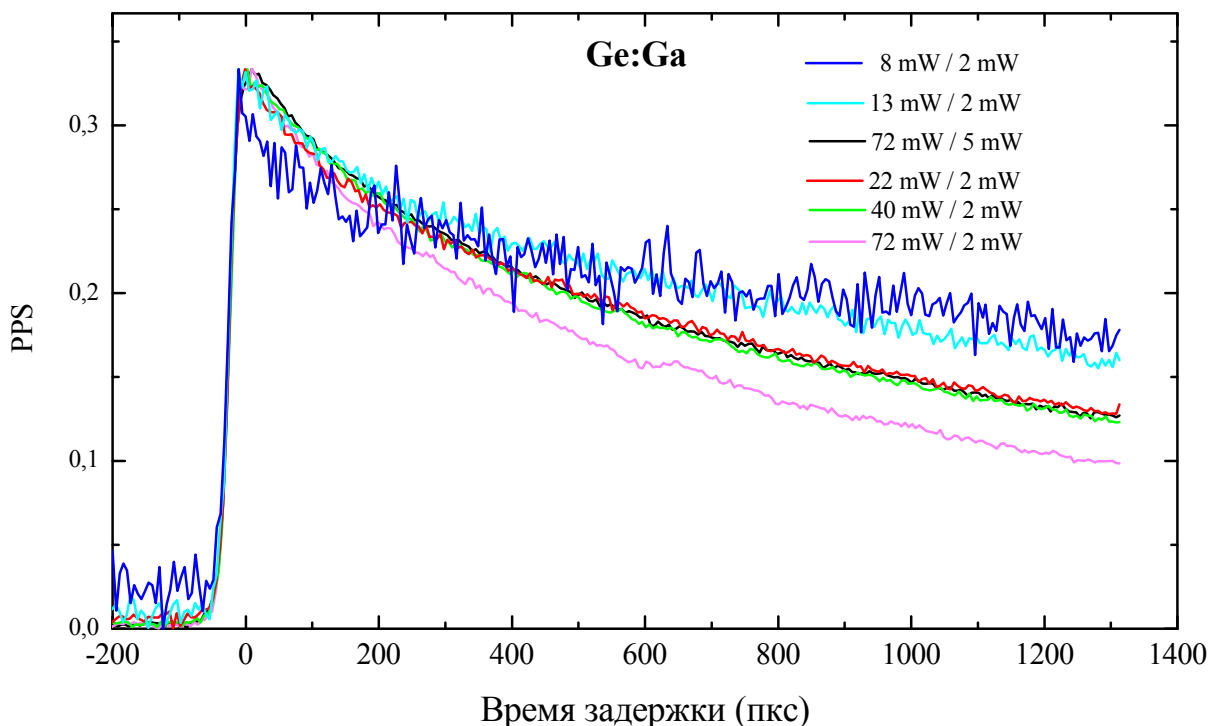


Рисунок 4 – Динамика релаксация возбужденных состояний в Ge:Ga, измеренная методом пробного импульса

Германий интересен с точки зрения развития детекторов электромагнитного излучения в инфракрасной и дальней инфракрасной области спектра, поэтому изучение релаксации и захвата именно свободных носителей заряда особенно актуально. На данном этапе было исследовано влияние деформации на скорость захвата при возбуждении системы излучением Новосибирского ЛСЭ. Величина деформации образца осуществлялась при помощи деформационного модуля, собранного на предыдущих этапах настоящего проекта и была порядка 1 кбар.

Как следует из кривой спада отклика, полученное время составляет порядка 1,5 нс. Увеличение мощности возбуждения привело к небольшому уменьшению времени отклика системы. Такая зависимость характерна для образцов с малой степенью компенсации и может объясняться увеличением вклада в общий $\mu\text{mp-probe}$ сигнал поглощения свободными носителями, т.к. при увеличении мощности возбуждения большее число носителей переходит в валентную зону. Поглощение в валентной зоне велико из-за расщепления зоны на подзоны легких и тяжелых дырок.

Сама величина отклика близка по порядку величины известным из литературы данным для недеформированных кристаллов, но заметна тенденция в сторону уменьшения времени захвата.

3. Проведение измерений временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров сурьмы и мышьяка в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса

Измерения проведены с использованием оборудования зарубежной инфраструктуры – лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорф (HZDR, FELBE), на базе которого построена станция по измерению времен релаксации методом пробного импульса. Акт и протокол работ представлены в приложении Д, методика измерений – в приложении Е. Образцы кремния, легированные мелкими донорами мышьяка и сурьмы, помещались в модуль давления, изготовленный на предшествующих этапах настоящего проекта, после чего проводились спектральные измерения для калибровки величины деформации по сдвигу линий примесного поглощения. Известная величина давления на кристалл позволяла выбирать соответствующую длину волны излучения ЛСЭ для резонансного возбуждения определенного состояния мелких доноров.

В кремнии, легированном мышьяком (As) были произведены измерения времен жизни возбужденных состояний при трех различных значениях деформации сжатия в кристаллографическом направлении [100]. На рисунке 5 – представлен спектр поглощения кремниевого образца с донорами мышьяка в отсутствии деформации. Положение спектральных линий соответствует указанному донору. Линии поглощения вблизи 42 и 47 мэВ соответствуют переходам из основного состояния $1s(A_1)$ на уровни $2p_0$ и $2p_{\pm}$. Линии при энергиях менее 30 мэВ соответствуют переходам с отщепленных уровней $1s(E, T_2)$. Голубым цветом показан спектр поглощения воды. Рисунок 6 представляет сигнал pump-probe для случая возбуждения уровня $2p_0$ донора мышьяка для различных уровней падающей мощности в канале pump. При максимальной мощности сигнал имеет большую длительность, что объясняется выбросом электронов в зону проводимости и последующим захватом на высоковозбужденные уровни донора. В данном эксперименте это время составляет порядка 2 нс, что свидетельствует о малом уровне компенсации в образце. При меньших мощностях сигнал укорачивается, а искомое время восстановления населенности составляет порядка 100 пс. На рисунке 7 показана динамика релаксации уровня $2p_{\pm}$. В отличие от уровня $2p_0$, можно констатировать, что при малых величинах мощности возбуждения регистрируется короткий отклик по длительности не превышающий 15-20 пс, то есть по порядку величины соответствует разрешающей способности установки.

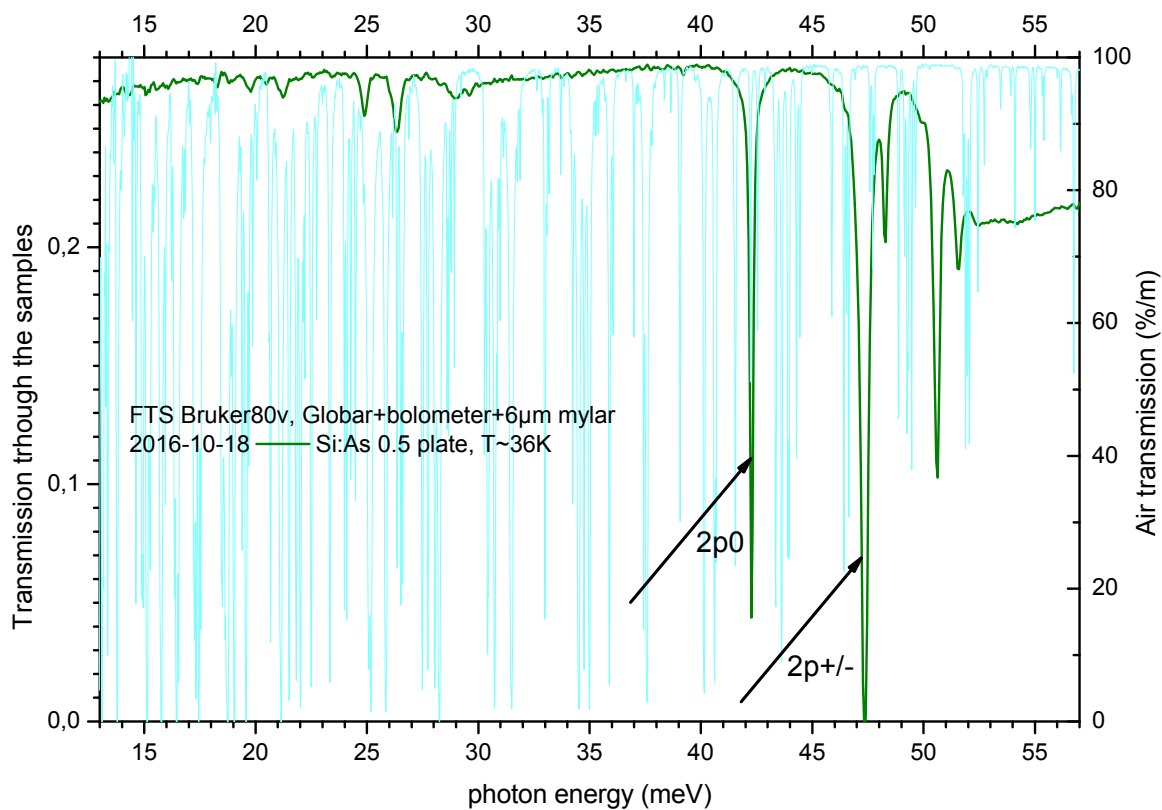


Рисунок 5 – спектр поглощения кремниевого образца, легированного донорами мышьяка, в отсутствии деформации

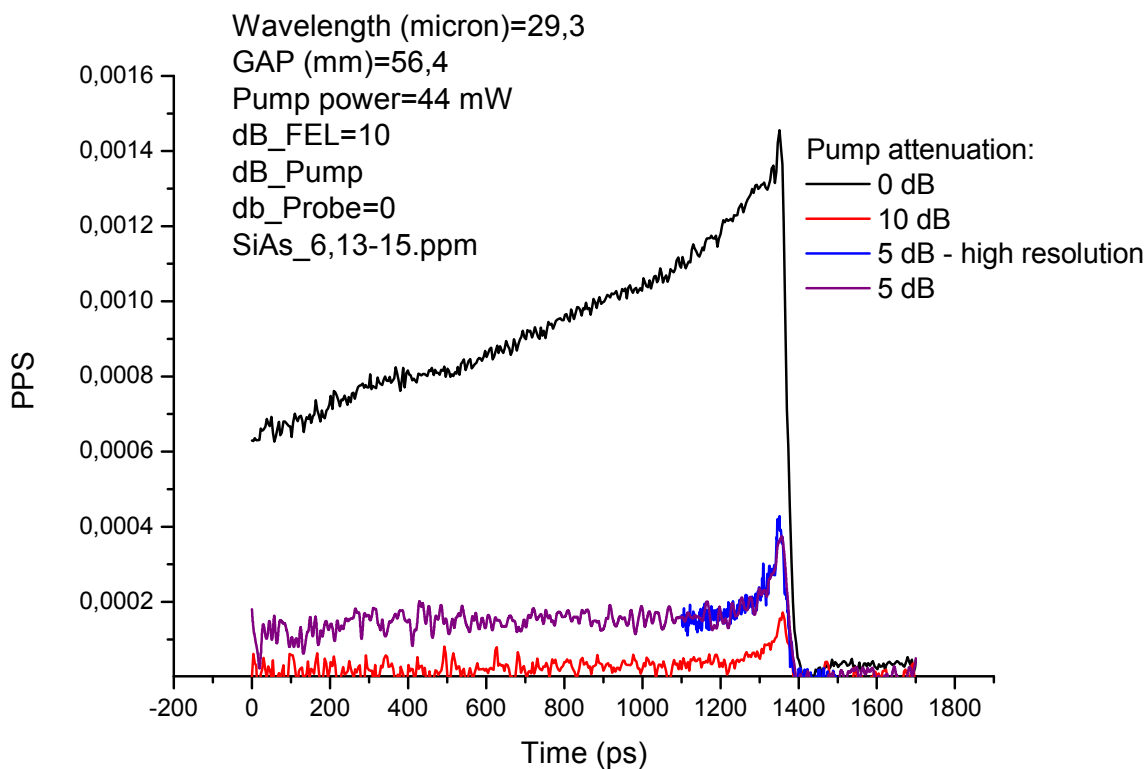


Рисунок 6 – Pump-пробе сигнал при возбуждении состояния $2p_0$ в Si:As в отсутствии деформации

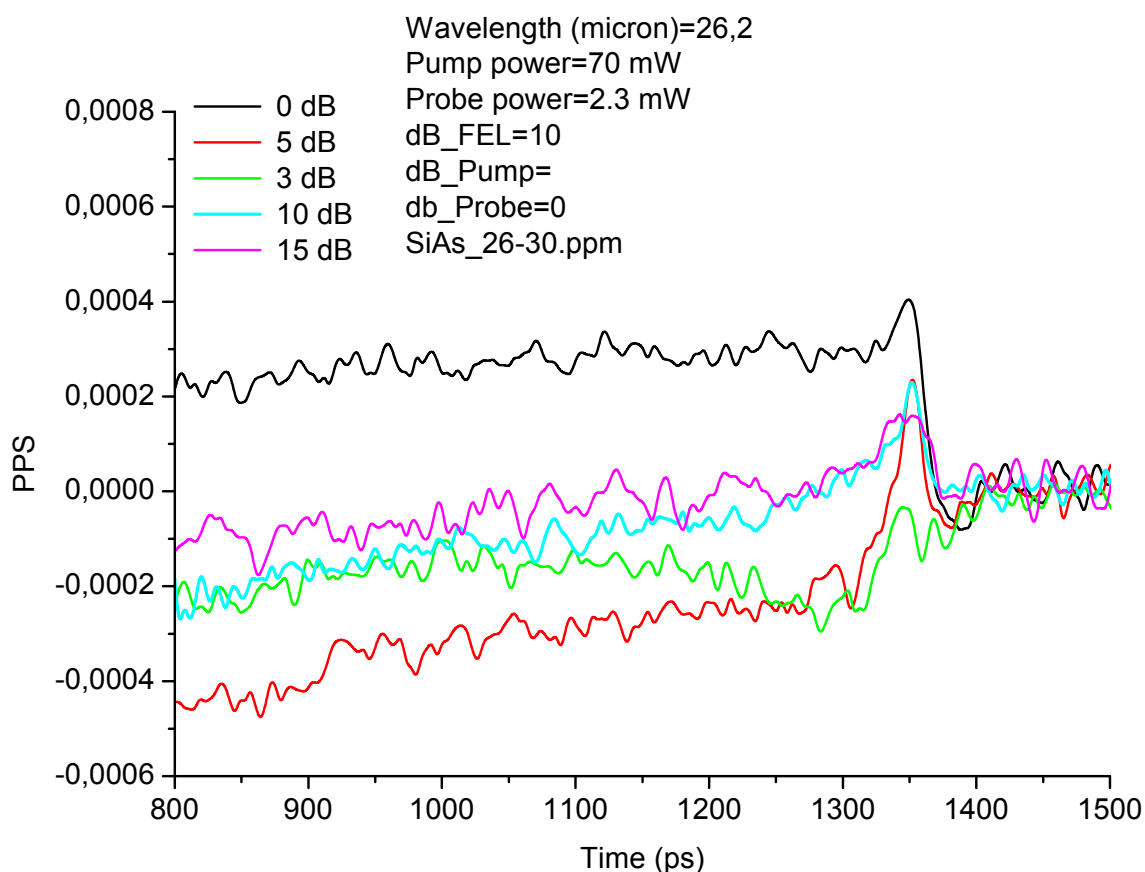


Рисунок 7 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_{\pm}$ в Si:As в отсутствии деформации

Рисунок 8 демонстрирует спектр поглощения образца при одноосном давлении порядка 230 бар, соответствующему междолинному расщеплению около 2 мэВ. Величина междолинного расщепления определяется по разности позиций положения компонент уровней. Наиболее подходящими для этой цели являются компоненты уровней $2p_0$ и $2p_{\pm}$ как самые интенсивные. При этом, в случае температур, при которых отщепленная группа не заселена, можно выбрать положение самой низкоэнергетической компоненты (то есть $2p_0$) и по известной из литературы зависимости оценить величину давления. Однако такой метод может давать погрешность ввиду отличия эффективного деформационного потенциала для основного состояния от долинного деформационного потенциала кремния. В данных исследованиях мы использовали первую процедуру из вышеупомянутых оценок давления. Так как приложение давления приводит к нарушению симметрии кристалла и примесного центра, необходимо использовать определенную взаимную конфигурацию для поляризаций накачивающего, зондирующего излучения и оси давления. В случае $2p_0$, как известно, линейно поляризованная волна взаимодействует с нижней компонентой состояния, поляризация направлена вдоль оси давления, а перпендикулярная компонента не взаимодействует, но взаимодействует с верхней компонентой (но для большей энергии кванта). Для уровня $2p_{\pm}$ волна с поляризацией вдоль оси давления не взаимодействует с нижней компонентой, но взаимодей-

ствует с верхней, а волна с ортогональной поляризацией – взаимодействует с обеими компонентами (естественно, частота излучения должна соответствовать конкретному переходу). Исходя из этого, была выбрана конфигурация, при которой ортогональные поляризации накачивающего и зондирующего пучков были повернуты на угол 45 градусов по отношению к оси давления, то есть сечение перехода для этих пучков составляет одинаковую величину.

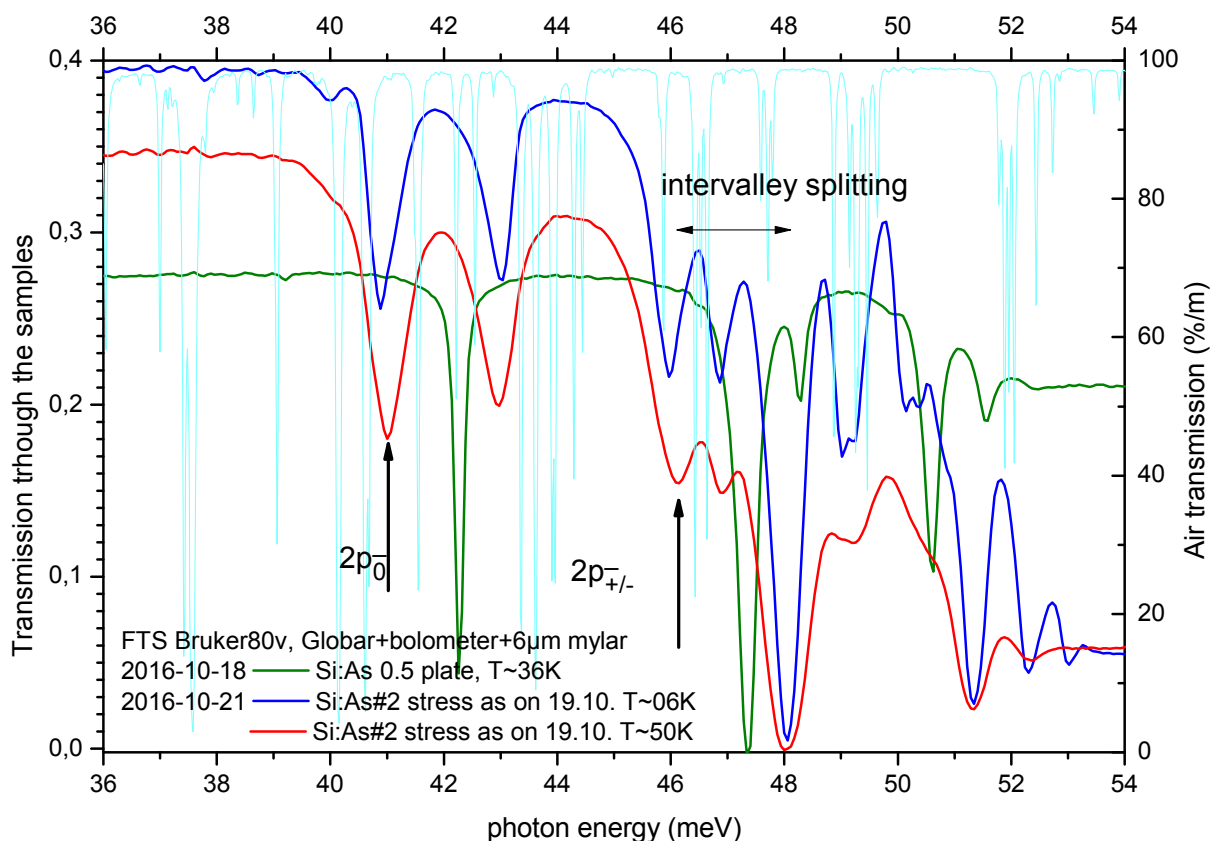


Рисунок 8 – Спектр поглощения кремниевого образца, легированного донорами мышьяка, при деформации 230 бар

На рисунке 9 представлен сигнал pump-probe для одноосно деформированного кристалла кремния, легированного мышьяком для междолинного расщепления порядка 2 мэВ при возбуждении нижней компоненты уровня $2p_0$. Как видно из откликов, очевидно наличие двух временных компонент. Первая соответствует по порядку величины длительности возбуждающего импульса, в то время как более длинная компонента связана со временем возвращения на основное состояние примеси и составляет порядка 100 пс. Подобная более длинная компонента, в соответствии с результатом, представленным на рисунке 10, отсутствует в отклике для нижней компоненты $2p_{\pm}$, поэтому можно сделать вывод о достаточно коротком времени жизни этого уровня, что качественно согласуется с проведенными расчетами для Si:As в условиях одноосной деформации.

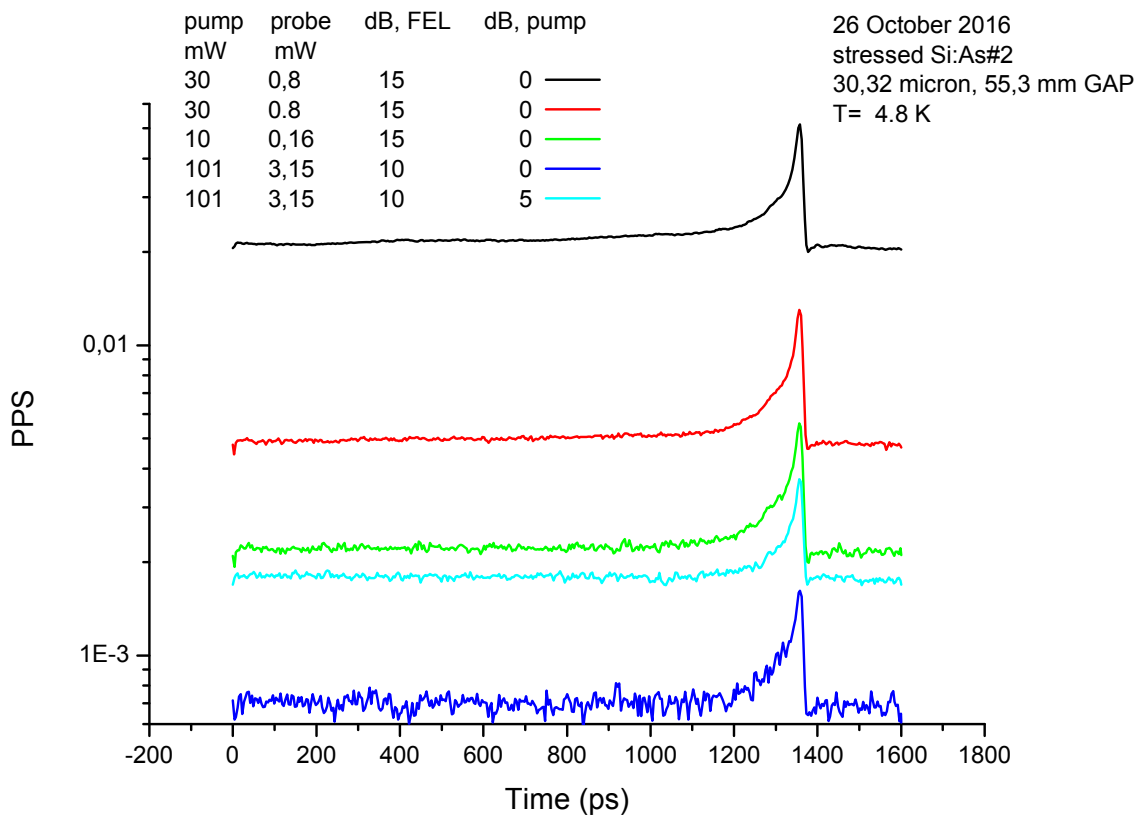


Рисунок 9 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_0$ в Si:As при деформации ~ 230 бар

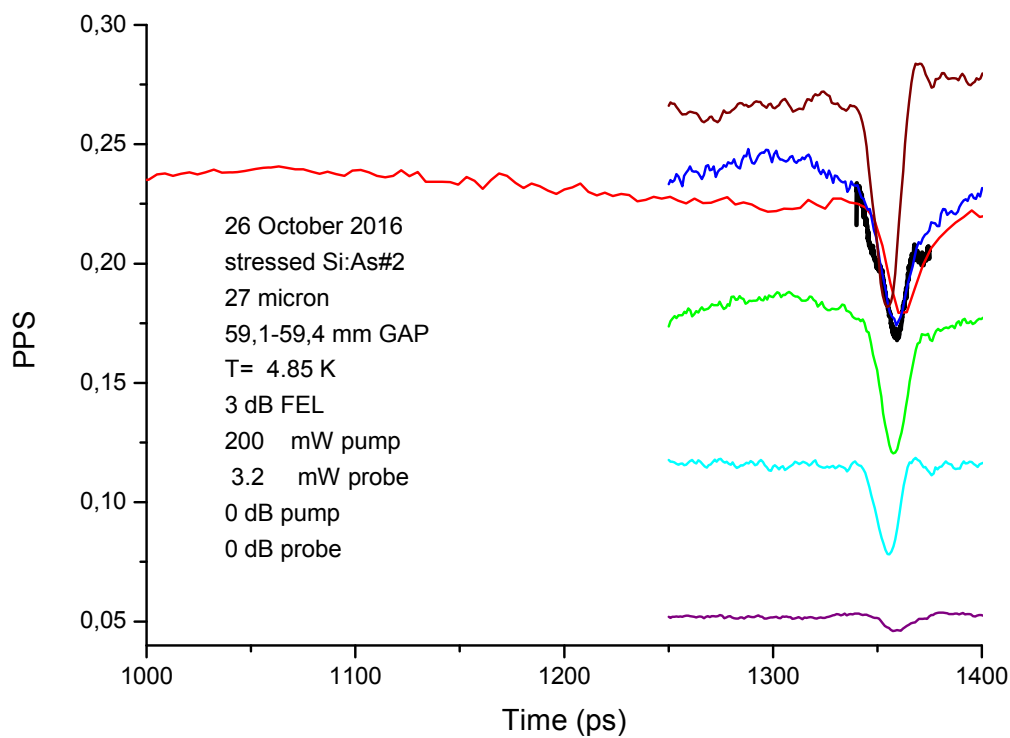


Рисунок 10 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_{\pm}$ в Si:As при деформации ~ 230 бар

Рисунок 11 демонстрирует спектр поглощения образца при одноосном давлении порядка 1 кбар, соответствующему междолинному расщеплению около 9 мэВ. Данная величина оценивалась по расщеплению уровней $2p_0$ и $2p_{\pm}$. При этом, оценка по сдвигу линии состояния $2p_0$ (~42 мэВ в недеформированном образце и 36 мэВ в деформированном) можно аналогично заключить, что величина давления на кремниевый образец – 1 кбар.

Необходимо отметить заметную диспропорцию для линий $3p_0$ и $2p_{\pm}$ по сравнению с недеформированным образцом. Данное изменение наблюдаемых интенсивностей, очевидно, связано с поляризационной чувствительностью образца, что, свою очередь, означает неизотропное распределение поляризаций для излучения в канале спектрометра.

На рисунке 12 представлен сигнал pump-probe для одноосно деформированного кристалла кремния, легированного мышьяком для междолинного расщепления порядка 9 мэВ при возбуждении нижней компоненты уровня $2p_0$. При снижении падающей мощности сигнал позволяет получить время отклика порядка 180-200 пс. Рисунок 13 демонстрирует сигнал pump-probe для нижней компоненты уровня $2p_{\pm}$. Время релаксации сигнала возбуждения составляет для указанного случая порядка 250 пс, что при учете времени релаксации нижележащего уровня $2p_0$, во-первых, позволяет получить время около 50-70 пс, а во-вторых, можно констатировать каскадный характер релаксации для данной величины деформации, что разительно отличается от случая недеформированного Si:As. С другой стороны, вид спектра пропускания явно свидетельствует о значительном перекрытии линий поглощения на переходах в $2p_{\pm}$ и $3p_0$. То есть, исключить влияние уровня $3p_0$ на общую скорость релаксации нельзя, хотя, как известно, сечение перехода для уровня $3p_0$ значительно ниже, по сравнению с $2p_{\pm}$, что хорошо видно из спектра пропускания для недеформированного кремния.

На рисунке 14 показан спектр пропускания кремния, легированного мышьяком при междолинном расщеплении порядка 18 мэВ, что соответствует давлению порядка 3 кбар. Величина давления оценивалась по расщеплению уровней $2p_{\pm}$ и подтверждается сравнением с результатом, рассчитанным исходя из сдвига нижней компоненты перехода из основного состояния в $2p_0$. На рисунке 15 представлен сигнал pump-probe для одноосно деформированного кристалла кремния, легированного мышьяком для междолинного расщепления порядка 18 мэВ при возбуждении нижней компоненты уровня $2p_0$. Исходя из полученных данных можно выделить время релаксации порядка 220 пс. Сигнал pump-probe, показанный на рисунке 16 дает меньшую величину для времени релаксации уровня $2p_{\pm}$ - около 150 пс. Наличие нескольких пиков в отклике вызвано плоскопараллельностью данного образца и отражено в интерференционной картине в спектре пропускания для линии $2p_0$. При этом $2p_{\pm}$ не показывает такую картину как в спектре, так и в отклике. Для данного давления снова наблюдается отклонение от каскадного характера релаксации.

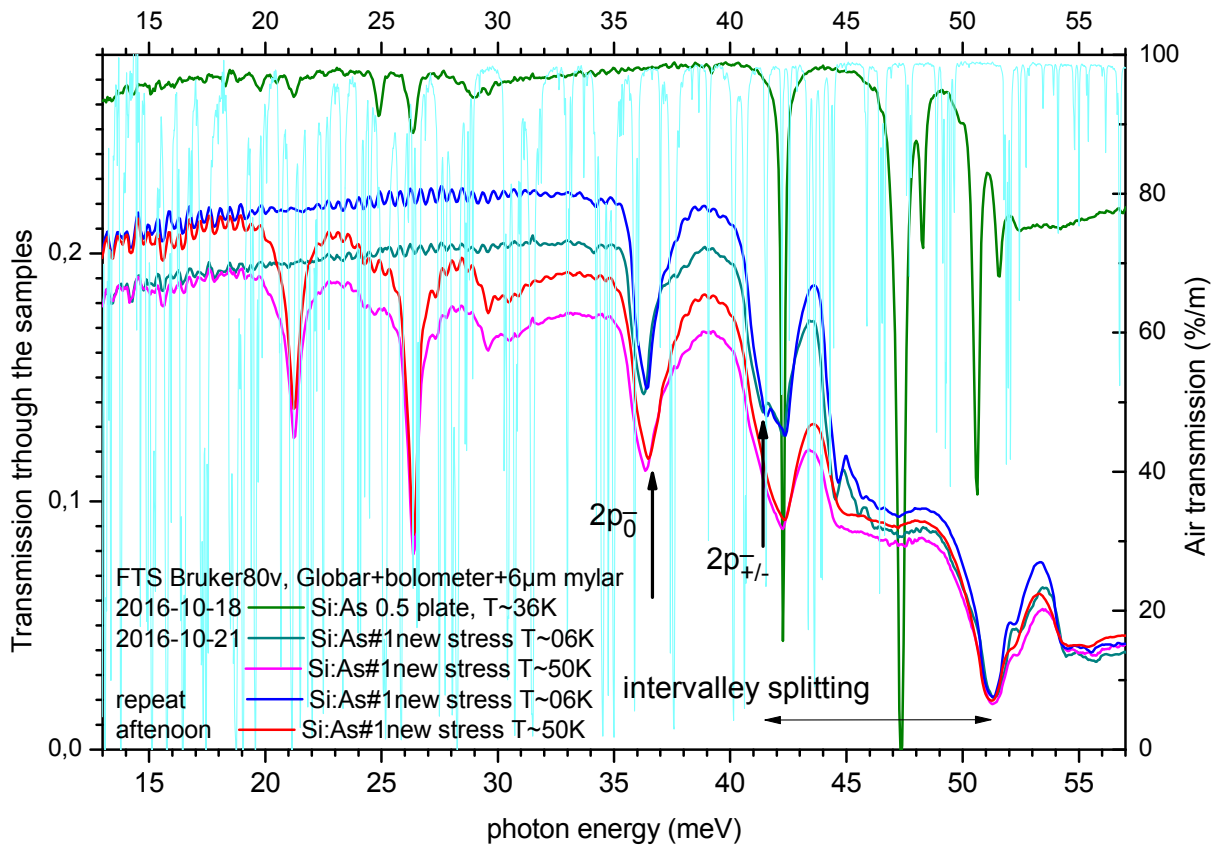


Рисунок 11 – спектр поглощения кремниевого образца, легированного донорами мышьяка, в отсутствии деформации (зеленым) и при деформации в 1 кбар при различных температурах

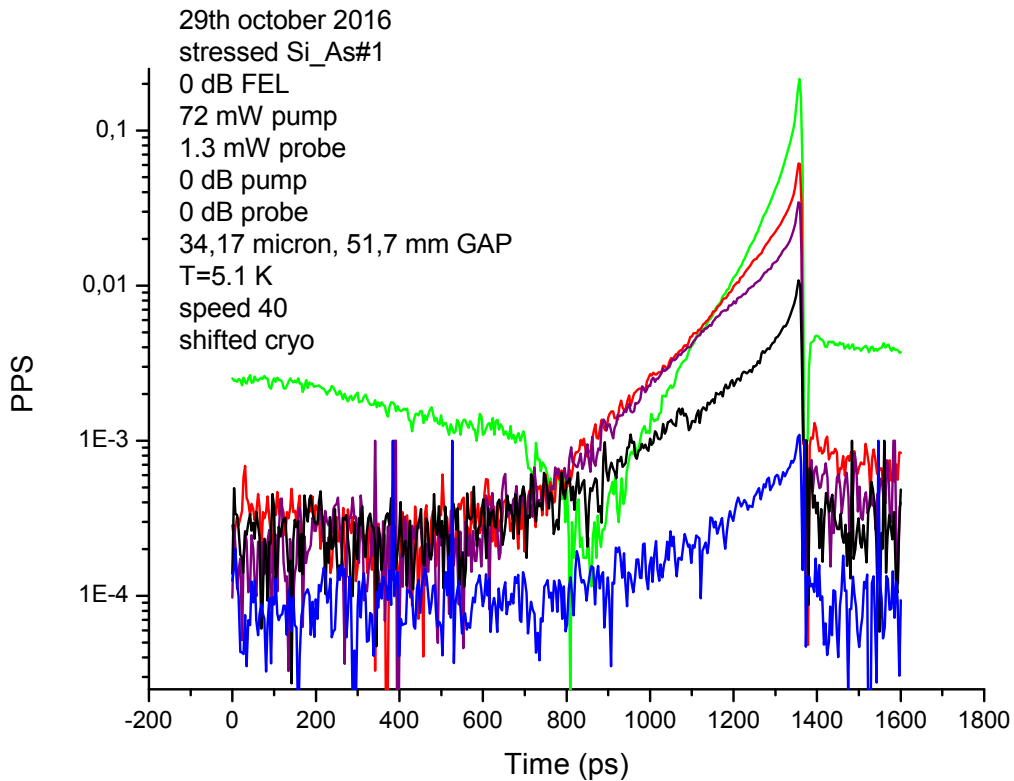


Рисунок 12 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_0$ в Si:As при деформации ~1 кбар

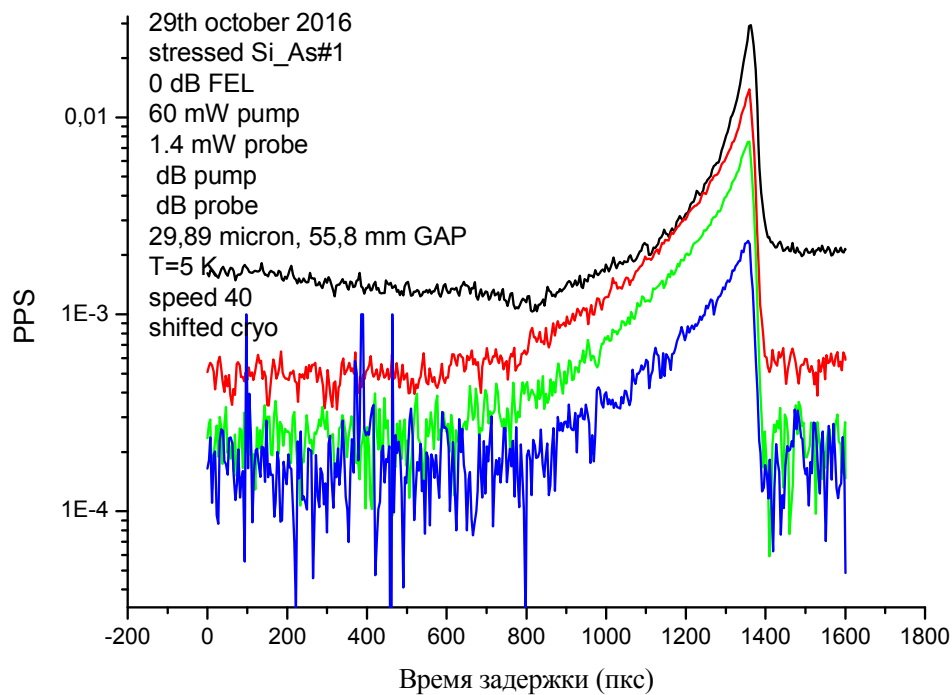


Рисунок 13 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_{\pm}$ в Si:As при деформации ~ 1 кбар

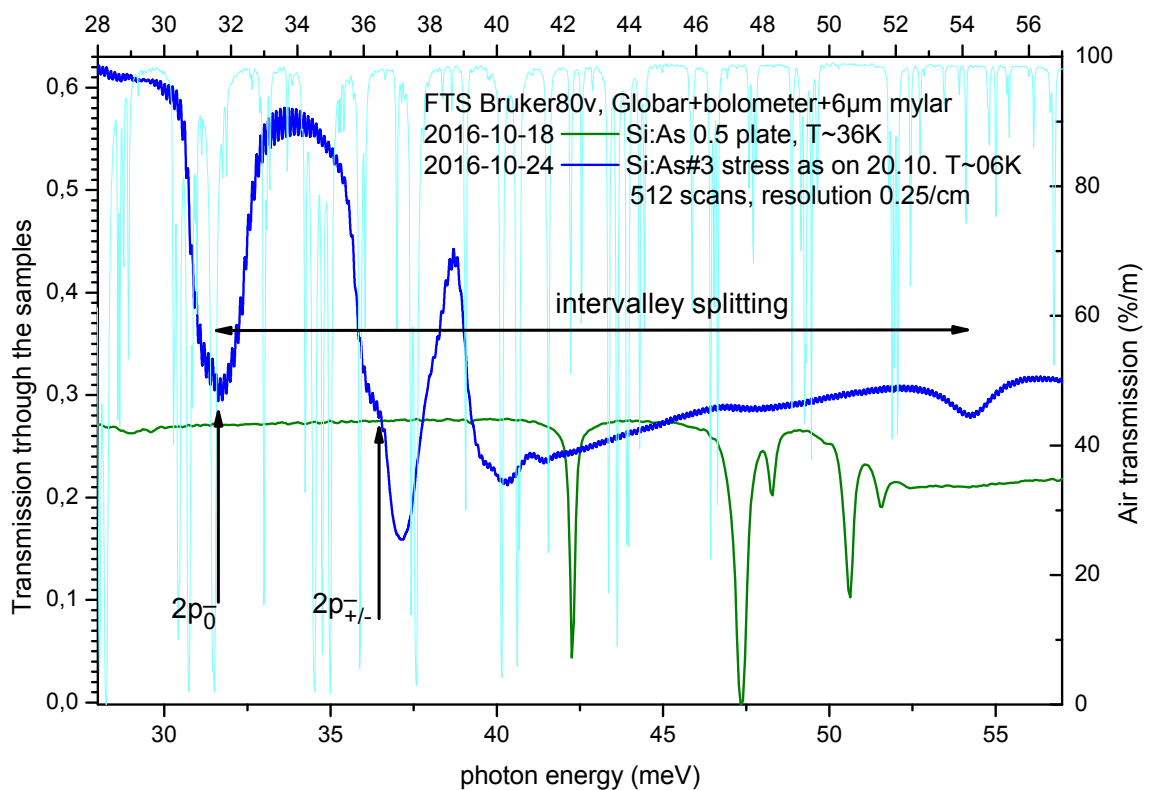


Рисунок 14 – спектр поглощения кремниевого образца, легированного донорами мышьяка, в отсутствии деформации (зеленым) и при деформации 3 кбар

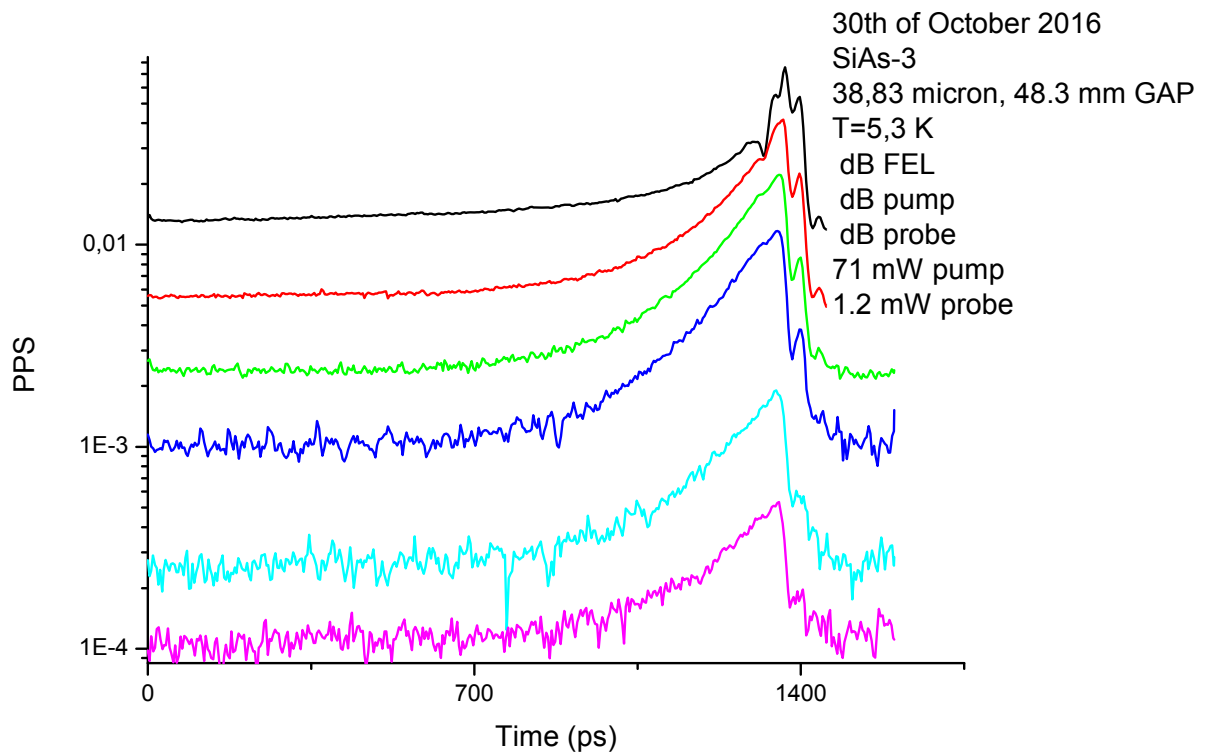


Рисунок 15 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_0$ в Si:As при деформации ~ 3 кбар

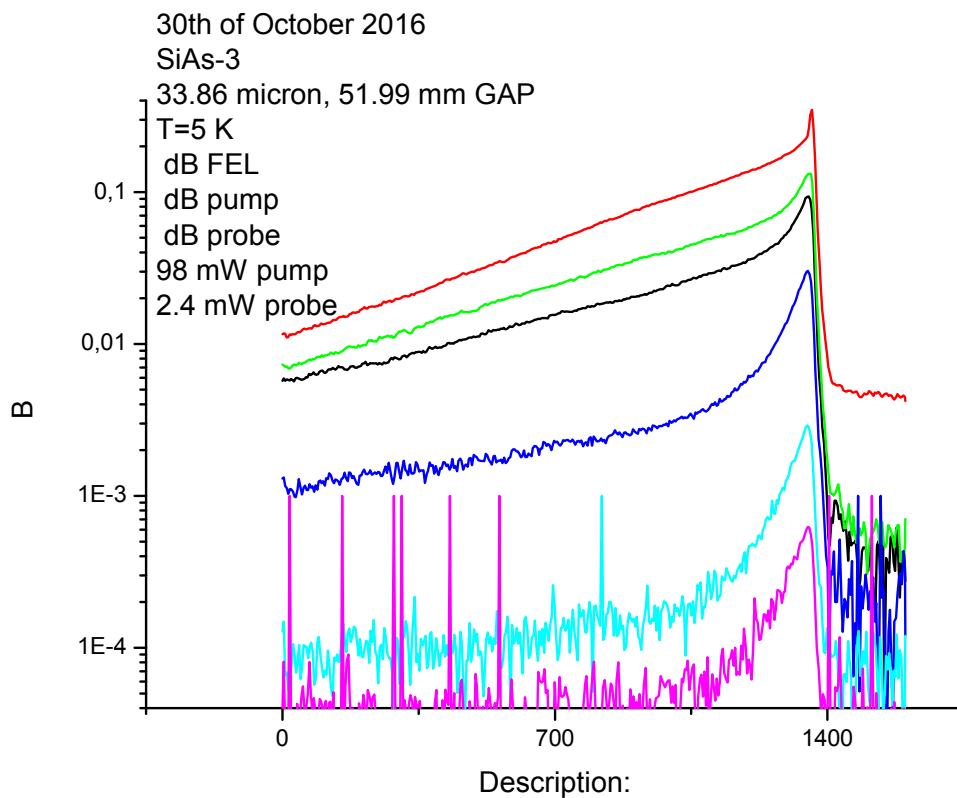


Рисунок 16 – Pump-probe сигнал при возбуждении состояния $2p_{\pm}$ в Si:As при деформации ~ 3 кбар

При нашем анализе мы отвлекались от возможности вторичного возбуждения электрона в зону проводимости, что оправдано для малых мощностей возбуждения.

Ниже на рисунке 17 представлен спектр поглощения кремния, легированного донорами сурьмы при деформации 115 бар.

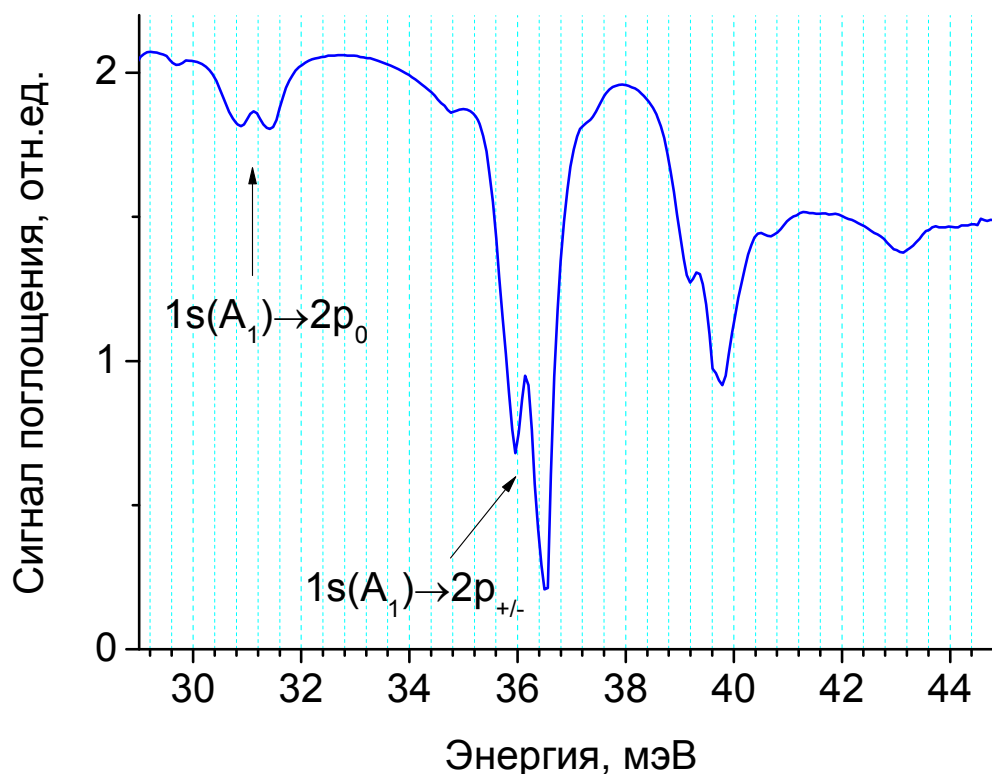


Рисунок 17 – спектр поглощения кремния, легированного донорами сурьмы при деформации 115 бар

Возбуждение среды излучением ЛСЭ FELBE происходило на длинах волн 41.05 мкм и 34.4 мкм, что соответствует переходам из основного состояния в нижние компоненты состояний $2p_0$ и $2p_{\pm}$ соответственно. На рисунках 18 и 19 представлены измеренные pump-probe сигналы на соответствующих длинах волн. Т.к. деформация образца небольшая (~115 бар), то динамика релаксации коэффициента прохождения среды не сильно отличается от случая недеформированного образца, но в случае состояния $2p_0$ наблюдается тенденция в стороны увеличения длительности отклика. Это объясняется уменьшением вклада междолинных фононов f-типа в общий темп релаксации $2p_0$ состояния и подтверждается теоретическими расчетами.

В приложении Д представлен полный спектр первичных данных эксперимента – pump-probe сигналов (PPS) при различных мощностях и частотах накачивающего среду и зондирующего импульсов.

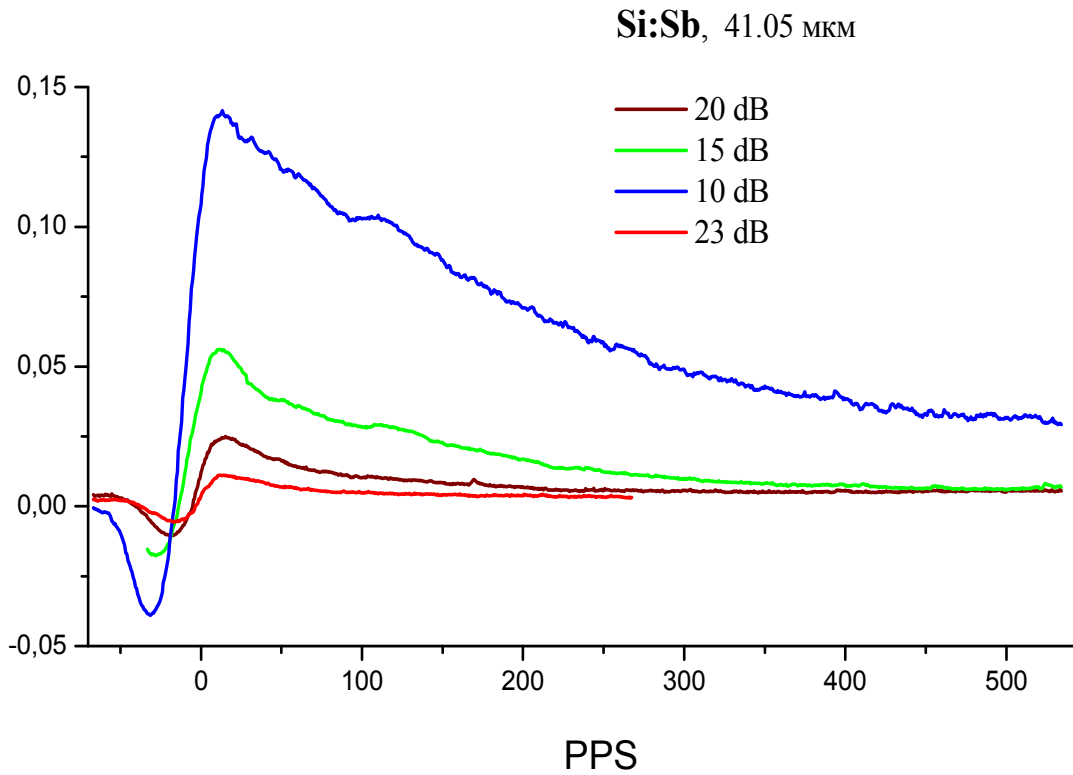


Рисунок 18 – Динамика релаксации состояния $2p_0$ в деформированном кремнии, легированном донорами сурьмы при различных мощностях возбуждения. Давление на образец ~ 115 бар.

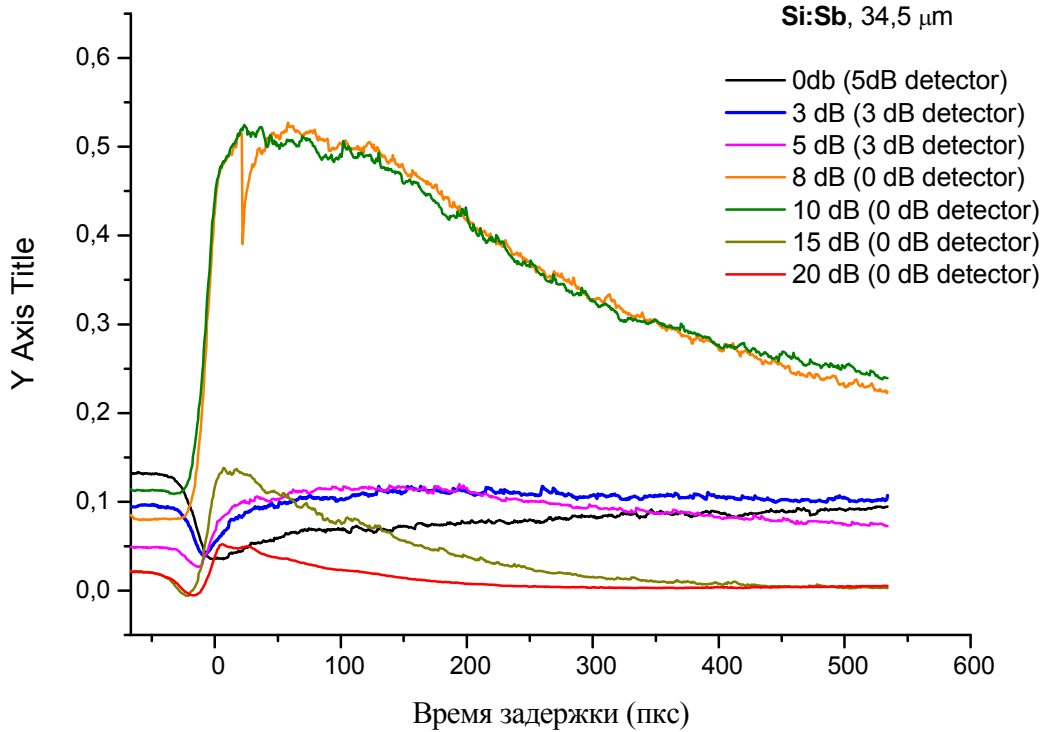


Рисунок 19 – Динамика релаксации состояния $2p_{\pm}$ в деформированном кремнии, легированном донорами сурьмы при различных мощностях возбуждения. Давление на образец ~ 115 бар.

4. Теоретические расчеты зависимостей от одноосной деформации темпов релаксации возбужденных состояний мелких примесных центров в кристаллах кремния и германия.

В данной главе приводится описание модели и результатов вычисления скоростей релаксации возбужденных состояний доноров сурьмы и мышьяка в кристалле германия в зависимости от одноосной деформации сжатия в кристаллографическом направлении $[111]$.

4.1 Расчеты темпов релаксации в одноосно-деформированном германии

4.1.1 Волновые функции

Волновые функции примесных центров в германии описывались в рамках метода эффективных масс. В отличие от кристалла кремния долины зона проводимости германия четырехкратно вырождена, и минимумы зоны проводимости (долины) ориентированы вдоль кристаллографического направления $[111]$. В качестве базисных долин выбраны долины в направлениях $[111]$, $[1\bar{1}1]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}11]$. Расположение долин в k -пространстве представлено на рисунке 20.

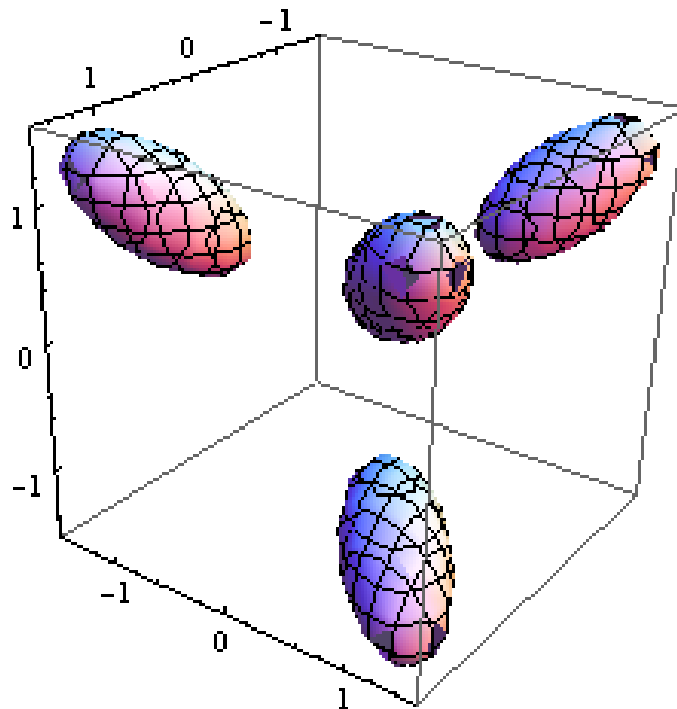


Рисунок 20 – Расположение долин зоны проводимости германия в пространстве волновых векторов

Согласно методу эффективных масс в многодолинных полупроводниках волновые функции донорных состояний являются линейными комбинациями функций различных долин с одной энергией E и представляются в виде:

$$\Psi_l = \sum_l \alpha_l F_n^l(\vec{r}) \varphi_l(\vec{k}, \vec{r}), \quad (1)$$

где $\varphi_l(k, r)$ – блоховская волновая функция на дне зоны проводимости l -ой долины, $F_n^l(r)$ – огибающая волновой функции донорного состояния n -го уровня l -ой долины, а α_l – коэффициенты, определяющиеся из соображений симметрии для точечной группы тетраэдра T_d и отражающие распределение волновой функции по долинам. Суммирование в кристалле германия проводится по четырем долинам.

Основное 1s-состояние мелких доноров в германии расщеплено на однократно вырожденное состояние 1s(A) и трехкратно вырожденное 1s(T). В случае одноосного сжатия в направлении [111] триплет расщепляется на однократно и двукратно вырожденные состояния. Распределение связанного состояния по долинам зоны проводимости германия так же зависит от приложенной деформации. Волновая функция основного Ψ_1 и первого возбужденного 1s-типа Ψ_2 состояний мелкого донора при одноосном сжатии вдоль направления [111] следующим образом распределяются по долинам:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{1}{\sqrt{3+\alpha^2}} (\alpha 111) \\ \Psi_2 &= \frac{1}{\sqrt{3+\beta^2}} (\beta 111) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha = -1 + 2 \frac{\Delta}{4\Delta_c} + 2 \sqrt{1 - \frac{\Delta}{4\Delta_c} + \left(\frac{\Delta}{4\Delta_c}\right)^2}$, $\alpha\beta = -3$, Δ – междолинное расщепление,

$\Delta_c - 1/4$ энергетического зазора между основным и 1s триплетным состояниями в недеформированном кристалле. Образовавшееся при расщеплении 1s-триплета дуплетное состояние.

4.1.2 Результаты расчетов в кристалле германия

На рисунке 21 представлена схема уровней донора мышьяка в кристалле германия в зависимости от одноосной деформации сжатия в направлении [111].

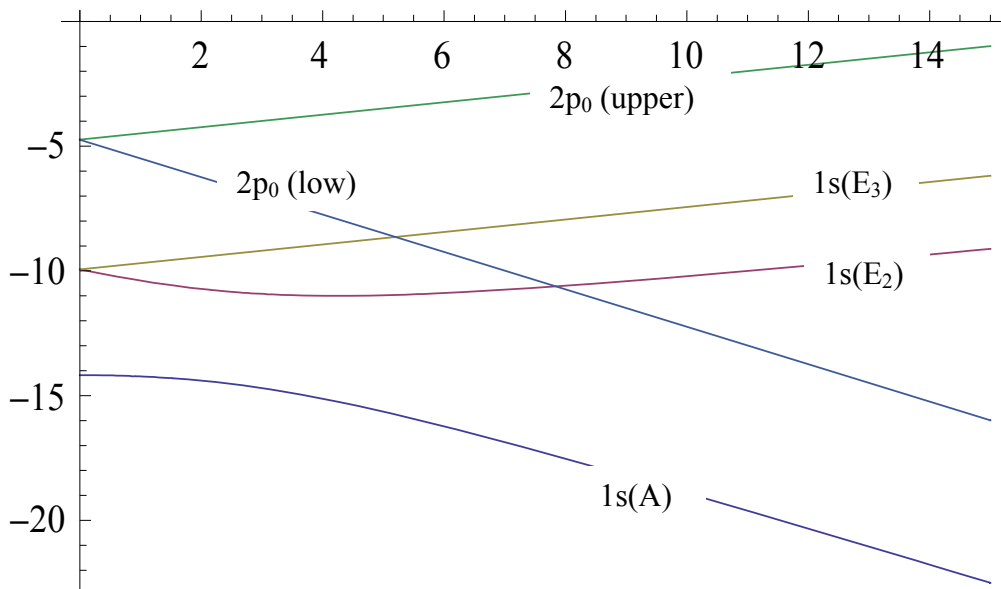


Рисунок 21 – Схема уровней донора мышьяка в кристалле германия в зависимости от одноосной деформации сжатия в направлении [111]

На данном этапе были рассчитаны скорости релаксации возбужденных $1s$ состояний, состояния $2p_0$, связанного с нижними долинами зоны проводимости германия, на переходе во все $1s$ состояния, а так же состояния $2p_{\pm}$, тоже связанного с нижними долинами зоны проводимости германия, в зависимости от одноосной деформации в направлении [111]. Согласно расчетам значительный вклад в общий темп релаксации в донорах мышьяка вносят только внутривалинные переходы с излучением акустических фононов с продольной поляризацией (LA). Взаимодействие с поперечными фононами приблизительно на порядок слабее и дает заметного вклада в релаксацию состояний. В донорах же сурьмы необходимо учитывать и взаимодействие с поперечными (TA) фононами. Междолинными переходами при взаимодействии с фононами пренебрегалось.

На рисунке 22 показаны зависимости от давления (междолинного расщепления) скоростей релаксации $1s$ состояний. На следующем рисунке 23 представлены темпы релаксации состояния $2p_0$, связанного с нижними долинами зоны проводимости германия, на переходах в два различных $1s$ состояния, в которые внутривалинный переход разрешен. Переход их нижнего $2p_0$ состояния в состояние $1s(E_3)$ запрещен, т.к. эти состояния образованы разными долинами зоны проводимости кристалла германия, и переход между ними возможен только с участием междолинных фононов. Минимальная энергия междолинного перехода при излучении фононов в германии порядка 10 мэВ, что для данного перехода находится за пределами рассматриваемых величин деформации.

Видно, что времена жизни донорных состояний не превышают доли наносекунд, что для $1s$ состояний более чем в 10 раз, а для $2p_0$ в несколько раз длиннее, чем времена жизни аналогичных состояний в кристалле кремния.

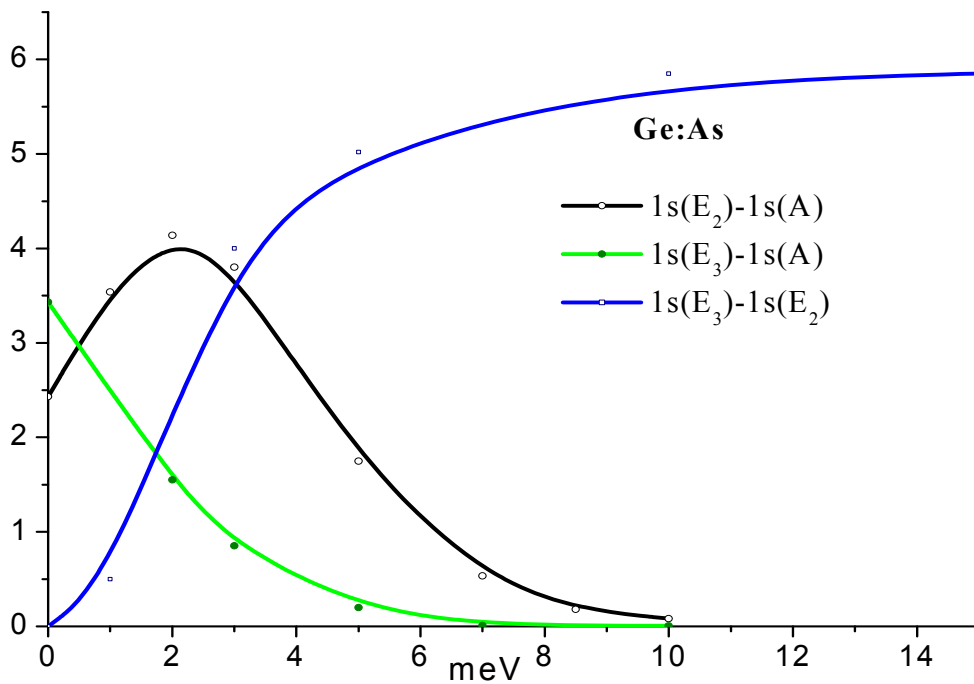


Рисунок 22 – Зависимости от деформации в направлении [111] темпов релаксации 1s состояний в доноре мышьяка (As) в германии. Давление в 1кбар соответствует междолинному расщеплению 10,81 мэВ

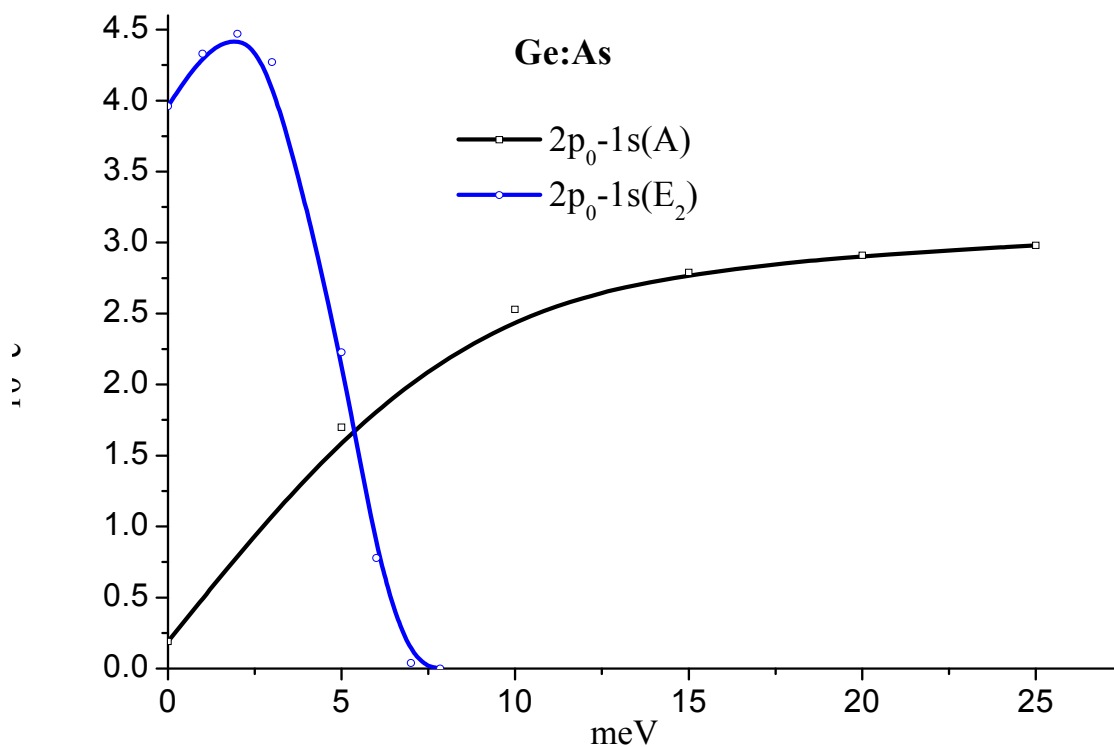


Рисунок 23 – Зависимости от деформации в направлении [111] темпов релаксации состояния $2p_0$ в доноре мышьяка (As) в германии. Давление в 1кбар соответствует междолинному расщеплению 10,81 мэВ

Далее представлены результаты аналогичных расчетов для донора сурьмы (Sb) в германии. На рисунке 24 показана схема уровней мелкого донора в зависимости от одноосной деформации сжатия в кристаллографическом направлении [111].

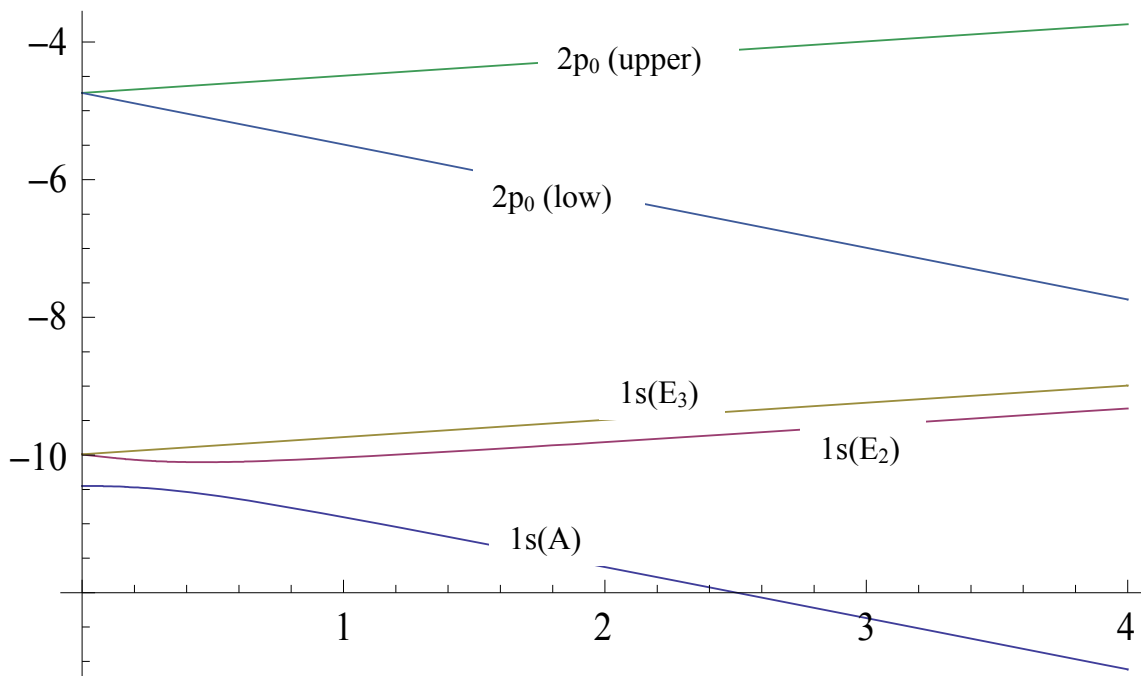


Рисунок 24 – Схема уровней донора сурьмы в кристалле германия в зависимости от одноосной деформации сжатия в направлении [111]

Донор сурьмы в германии более мелкий донор по сравнению с мышьяком с более маленьким химическим сдвигом. Это приводит к тому, что состояния донора, полностью разделяются по долинам уже при очень маленьких величинах деформации (порядка 1 мэВ, что приблизительно соответствует давлению 100 бар). Это приводит к тому, что изменение всех темпов релаксации состояний сурьмы происходит при малых деформациях. Дальнейшее увеличение давления не приводит к изменению скоростей релаксации при внутримолекулярных процессах электрон-фононного взаимодействия.

На рисунках 25 и 26 представлены деформационные зависимости темпов релаксации 1s состояний и состояния $2p_0$, связанного с нижними долинами.

Релаксация состояния $2p_{\pm}$ для обоих доноров, связанного с нижними долинами зоны проводимости германия, определяется переходами в нижележащие состояния $3p_0$, $2p_0$, $2s$, и практически не зависит от прикладываемого к кристаллу давления. Переходы в 1s состояния гораздо слабее из-за большего энергетического зазора. Полная скорость релаксации состояния $2p_{\pm}$ менее 10^9 с^{-1} .

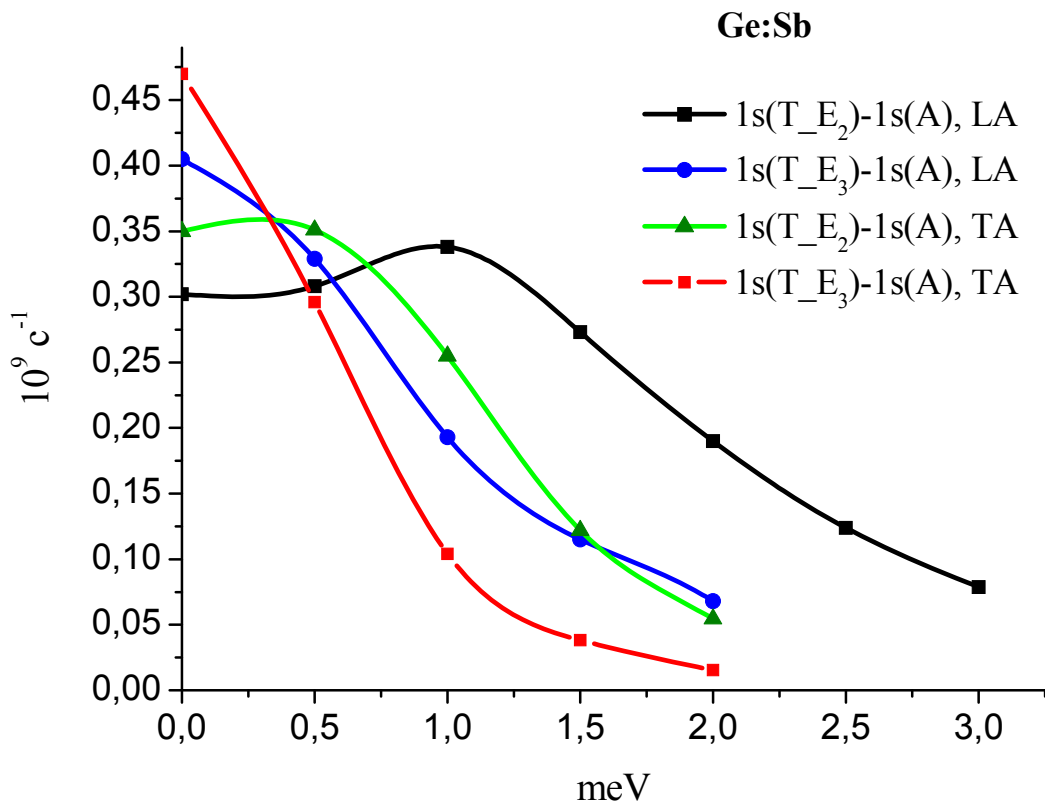


Рисунок 25 – Зависимости от деформации в направлении [111] темпов релаксации 1s состояний в доноре сурьмы (Sb) в германии.

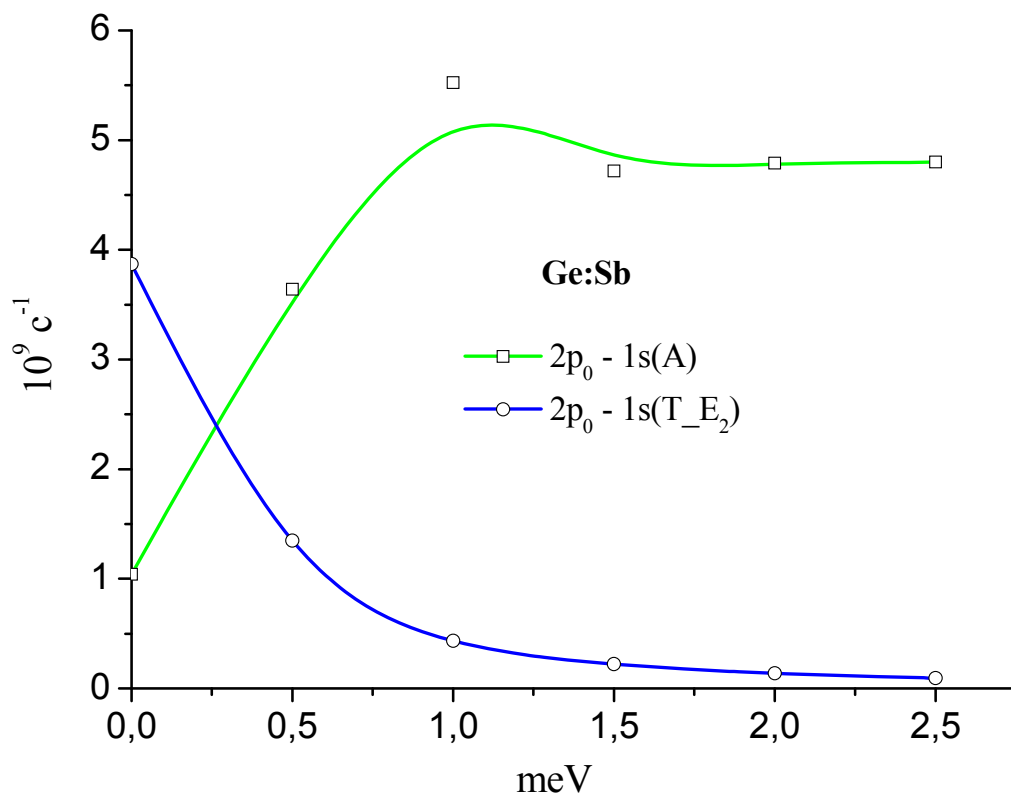


Рисунок 26 – Зависимости от деформации в направлении [111] темпов релаксации 2p₀ состояний в доноре сурьмы (Sb) в германии.

Переход между состояниями расщепившегося $1s$ триплета в донорах сурьмы со спонтанным излучением фонона в отличие от мышьяка не существенен из-за маленькой энергии перехода. Но энергия этого перехода уже близка к значению kT даже при температуре жидкого гелия. Это значит, что можно ожидать, что на практике населенности этих состояний будут близки вследствие индуцированных переходов с числами заполнения фононных мод, определяемых температурой.

Проведенные расчеты релаксационных темпов состояний доноров в деформированном кристалле германия необходимы для правильной интерпретации проводимых на данном этапе и планируемых на следующих этапах измерений времен жизни возбужденных состояний методом пробного импульса на базе Новосибирского лазера на свободных электронах.

4.2 Результаты расчетов в деформированном кристалле кремния

На данном этапе проведены расчеты зависимостей от одноосной деформации скоростей релаксации состояний мелких примесей в кристалле кремния. На основе полученных зависимостей вычислены населенности донорных состояний при оптическом возбуждении среды в зависимости от одноосной деформации в направлении $[100]$, и проведено сравнение с полученными в рамках данного проекта экспериментальными данными по измерению зависимостей поляризации стимулированного излучения на внутрицентровых переходах в одноосно-деформированном кремнии. Показано, что между состояниями верхних 4Δ -долин зоны проводимости кремния так же формируется инверсия населенностей при оптическом возбуждении среды, эти состояния тоже играют существенную роль в стимулированном излучении кремния на внутрицентровых переходах мелких доноров. Результаты работ частично опубликованы (ссылка на статью в интернете: <http://journals.ioffe.ru/articles/43903>).

Расчеты в деформированном кремнии частично описаны в отчете за второй этап. В этом же отчете описана модель, используемая для описания волновых функций мелких доноров в кристалле кремния, в том числе в условиях одноосного сжатия, а так же теория, в рамках которой рассматриваются релаксационные процессы при излучении фононов, описана в отчете за второй этап.

Ниже на рисунке 27 показаны зависимости от одноосной деформации сжатия уровней энергии доноров висмута и фосфора. Релаксация нижних возбужденных состояний доноров в кремнии определяется главным образом междолинными переходами с излучением фононов, и изменение темпов этих переходов при оказании давления на кремниевый кристалл обусловлено в основном изменением энергетических зазоров между состояниями. Но имеет значение также и изменение долиной структуры волновых функций при деформации, т.е. изменение вкладов различных долин зоны проводимости кремния в волновую функцию состояния. Проведенные оценки показывают, что отношение порогов накачки на ортогональных поляризациях численно совпадает с от-

ношением вероятностей оптической ионизации доноров, которые оценивались лишь с учетом анизотропии долин и распределения волновой функции основного состояния по долинам зоны проводимости кремния.

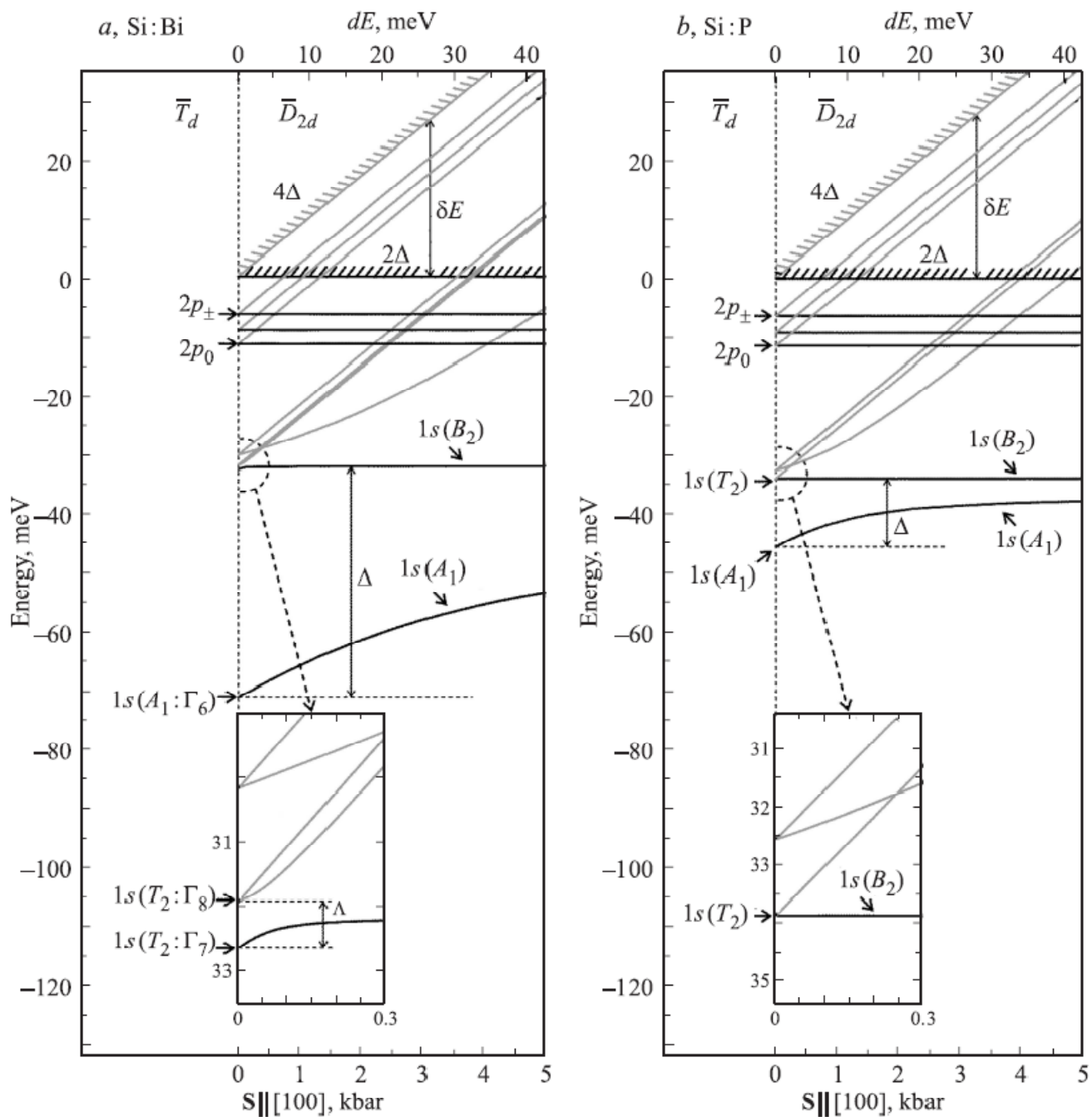


Рисунок 27 – Зависимости от одноосной деформации уровней энергии доноров висмута (слева) и доноров фосфора (справа).

Теоретические расчеты сравнивались с полученными экспериментально зависимостями от деформации интенсивности стимулированного излучения на различных поляризациях (вдоль оси деформации и ортогональной ей), а также порога оптической накачки тоже при двух значениях поляризации. Данные зависимости представлены на рисунках 28 и 29 соответственно. Образцы для экспериментальных исследований выращены в рамках настоящего проекта иностранным партнером (институт роста кристаллов (IKZ, Berlin)), что описано в отчетах за предыдущие этапы.

Давление на образец оказывалось вдоль кристаллографического направления [100]. Если верхним рабочим состоянием является состояние $2p_0$, то поляризация стимулированного излучения вдоль оси давления соответствует случаю, когда генерация развивается на состояниях донорных центров, связанных с нижними долинами зоны проводимости. Ортогональная оси давления поляризация соответствует верхним долинам. Этот случай реализуется в донорах фосфора и мышьяка при любых значениях деформации, в донорах мышьяка при давлении более 300 бар и в донорах висмута при давлении большем 1.5 кбар.

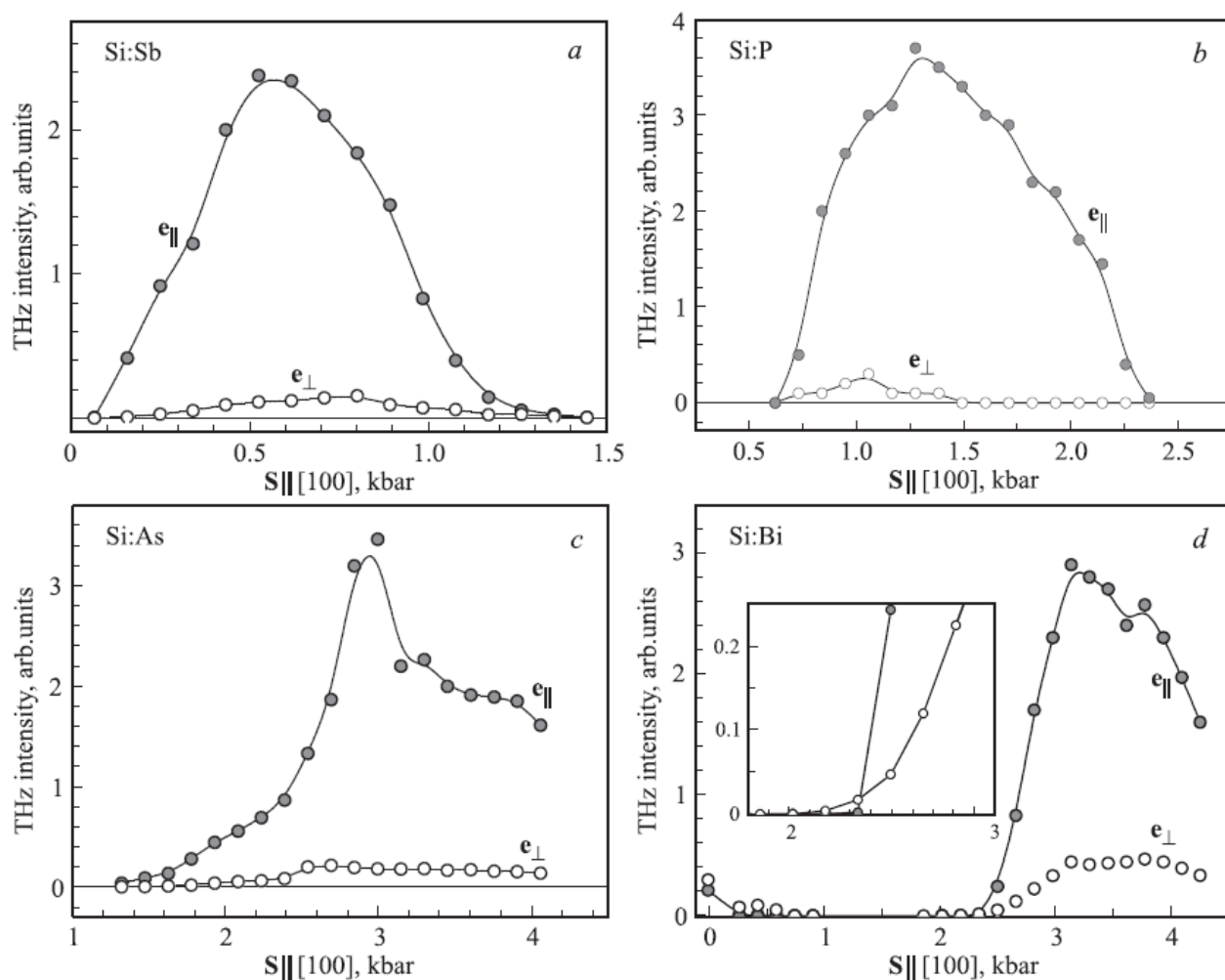


Рисунок 28 – Зависимости от деформации интенсивности стимулированного излучения на различных поляризациях (вдоль оси деформации и ортогональной ей) для доноров V группы в кремнии.

Из графиков видно, что основной вклад в генерацию стимулированного излучения дают переходы между состояниями, связанными с нижними долинами зоны проводимости кремния. Для доноров висмута результат измерения не соответствует спектральным данным, согласно которым основной вклад должны давать состояния верхних долин. Такое несоответствие, по-видимому, связано с многомодовым режимом генерации, и то, излучение какой моды регистрируется в конкретном измерении, зависит от геометрии этого конкретного эксперимента.

Из экспериментальных зависимостей от деформации порога оптической накачки доноров сурьмы в кремнии для двух значений поляризации излучения накачки (рисунок 29) видно, что для обоих значений поляризации существует оптимальный диапазон давлений, когда порог минимален. Так же видно, что для поляризации излучения накачки, лежащей вдоль оси деформации порог приблизительно в полтора-два раза больше.

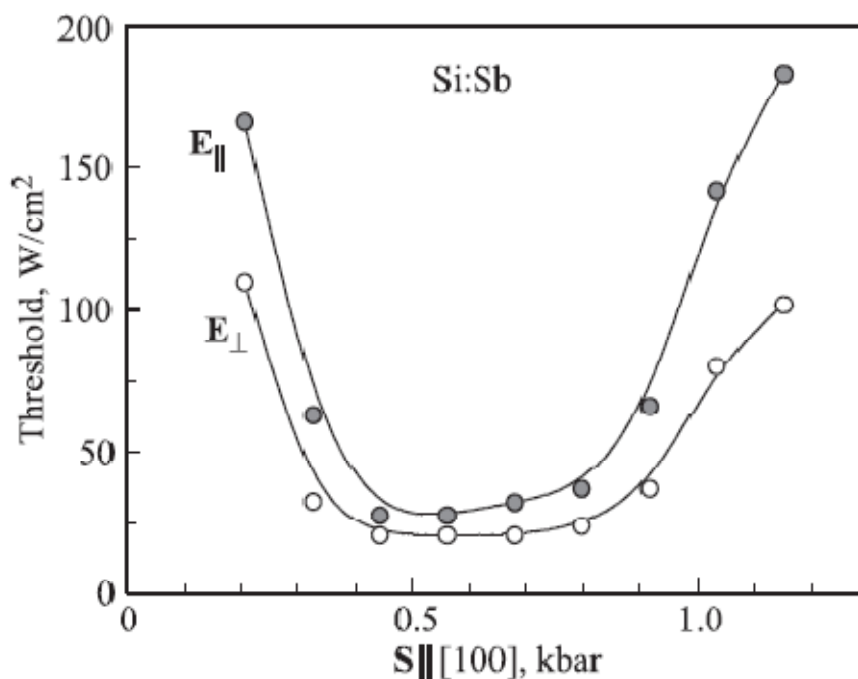


Рисунок 29 – зависимость от одноосной деформации порога накачки доноров сурьмы в кремнии для двух значений поляризации накачки

В предположении, что зависимость инверсии населенностей на рабочих переходах от деформации определяется лишь деформационной зависимостью сечения фотовозбуждения мелких доноров, проведены оценки инверсии. Полученные зависимости для доноров фосфора, сурьмы и мышьяка для двух значений поляризации накачки показаны на рисунке 30. Конечно, такая оценка не дает правильные зависимости инверсии населенностей для разных поляризаций накачки, но да-

ет близкое к эксперименту их отношение. Отсюда можно сделать вывод, поляризационная зависимость инверсии определяется поляризационной зависимостью сечения накачки.

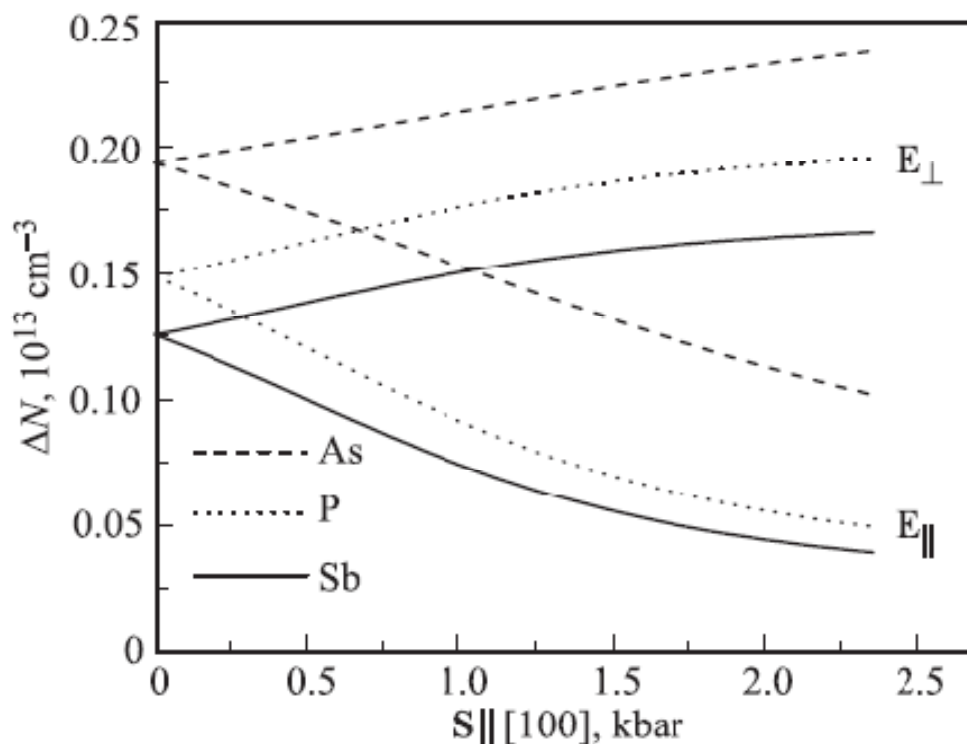


Рисунок 30 – Оценка инверсии населенности в зависимости от давления при различных поляризациях накачки

Правильные зависимости от прикладываемого к образцу давления населенностей рабочих состояний можно получить, только анализируя внутрицентровые релаксационные процессы. Частично такая работа проведена на втором этапе. На данном этапе закончены необходимые расчеты релаксационных темпов, и для доноров висмута проанализирована зависимость инверсии населенностей от деформации.

Доноры висмута наиболее интересны с точки зрения анализа деформационных зависимостей населенностей состояний, т.к. в висмуте наблюдается наиболее сложная смена релаксационных каналов из-за того что при различных давлениях различные переходы входят и выходят из резонанса с междолинными оптическими фонами. На рисунке 31 отображены зависимости инверсии населенностей на различных переходах донорного центра висмута в кремнии в зависимости от междолинного расщепления (пропорционально прикладываемому давлению).

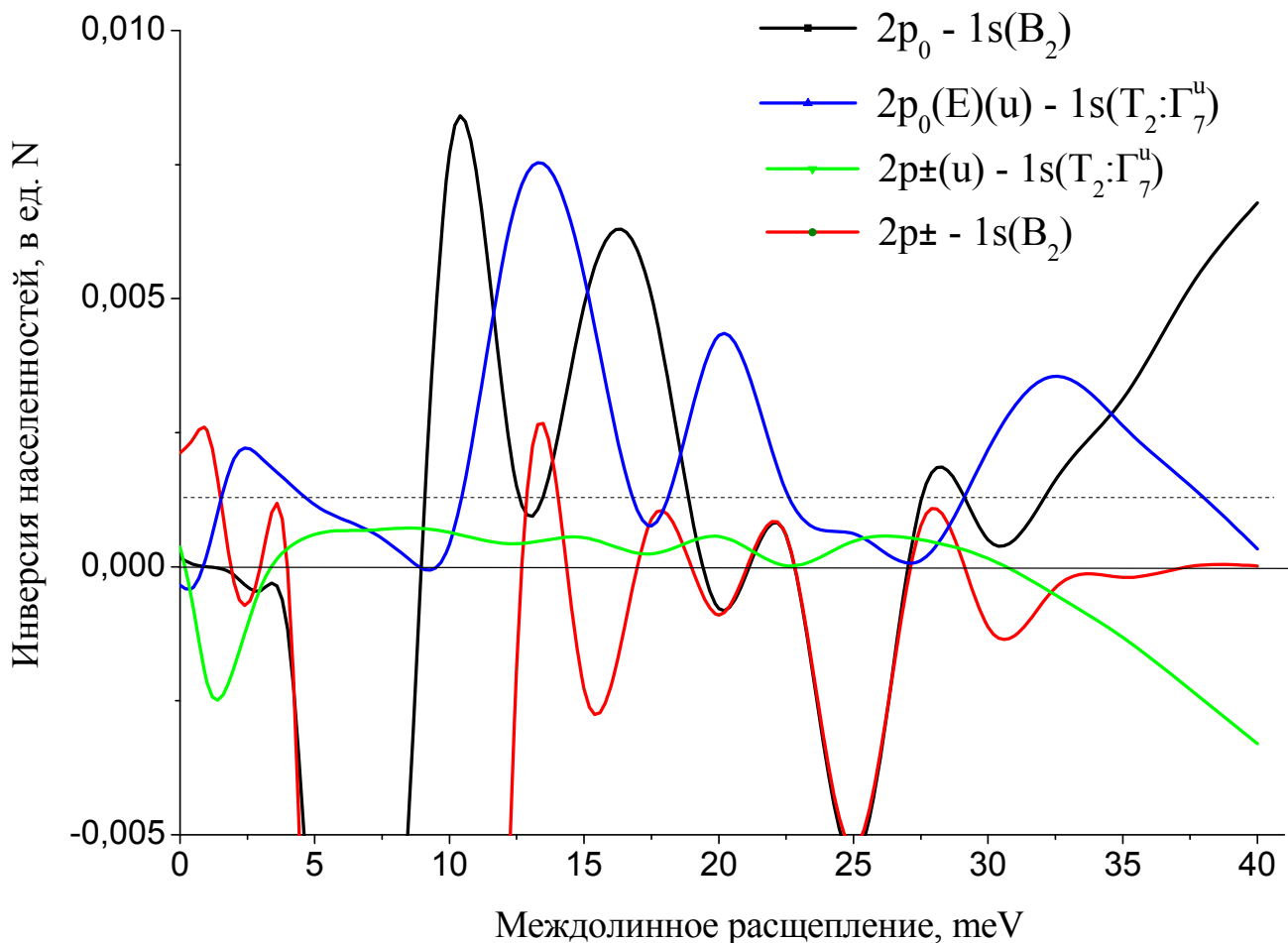


Рисунок 31 – зависимость от междолинного расщепления инверсии населенностей на различных переходах донорного центра висмута в кремнии

Если на рисунке качественно представить уровень пороговой инверсии (пунктирная линия на рисунке), необходимой для возникновения генерации, то рассчитанные зависимости качественно объясняют возникновение «зон» генерации, т.е. диапазонов деформаций, в которых генерация присутствует, объясняет переключение рабочих переходов и, следовательно, поляризационные зависимости. Количественное несовпадение данной рассчитанной зависимости можно объяснить тем, что в эксперименте при оказании давления на образец, кристалл деформируется неоднородно, что приводит к тому, что пики в расчетной зависимости размываются и становятся гораздо менее выраженными. Неоднородность деформации – это принципиально всегда присутствующий фактор, который необходимо принимать во внимание. Другой причиной количественных расхождений может быть поглощение отрицательно заряженными центрами, которое так же сильно зависит от деформации кристалла. Такое поглощение может приводить к отличиям экспериментально наблюдаемой мощности стимулированного излучения и рассчитанной зависимости инверсии населенностей.

Проведены так же расчеты деформационных зависимостей темпов релаксации возбужденных состояний в донорах сурьмы и мышьяка в кремнии. Ниже на рисунках 32 и 33 представлены рассчитанные зависимости полных релаксационных темпов, т.е. данные темпы учитывают взаимодействие со всеми типами фононов.

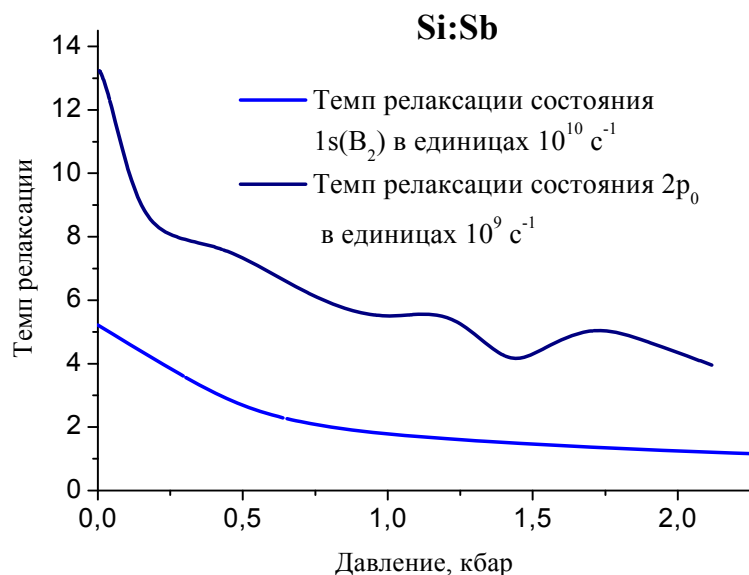


Рисунок 32 Зависимость от одноосной деформации в направлении [100] полного темпа релаксации состояния $2p_0$ в донорах сурьмы в кремнии.

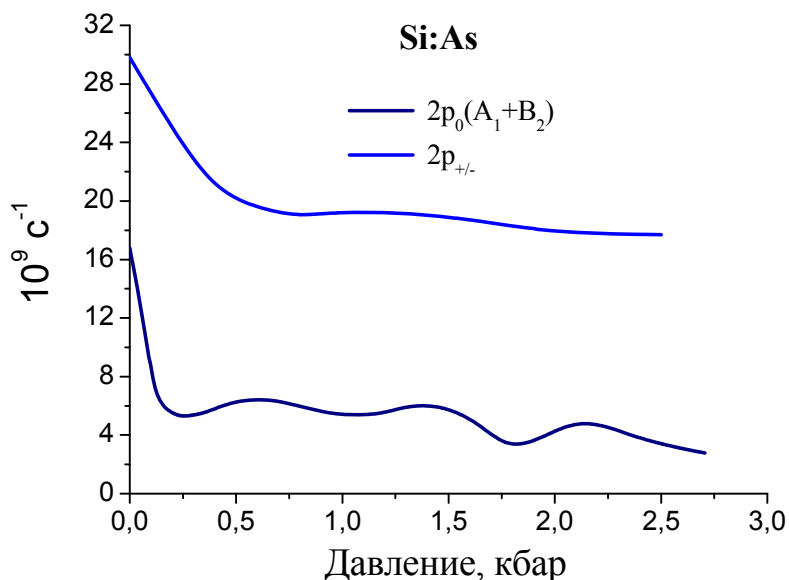


Рисунок 33 Зависимость от одноосной деформации в направлении [100] полных темпов релаксации состояний $2p_0$ и $2p_{\pm}$ в донорах мышьяка в кремнии.

Анализ результатов измерений времен жизни состояний в этих донорах в деформированном кремнии, полученных на данном этапе методом пробного импульса с использованием ЛСЭ FELBE показывает, что изменение релаксационной динамики под действием деформации происходит в соответствии с рассчитанными кривыми.

4.3 Электронная структура и скорости безызлучательной Оже-рекомбинации и излучательной рекомбинации в нанокристаллическом кремнии, легированном атомом фосфора.

На данном этапе были проведены расчеты спектра электронных состояний в нанокристаллах кремния, легированных донорами фосфора, а так же релаксации электронных состояний в них. Вычисления проведены с использованием вычислительного кластера ННГУ им. Н.И. Лобачевского, относящегося к центру коллективного пользования «Высокопроизводительные вычислительные технологии». Акт о работах представлен в приложении Ж.

Кремниевые нанокристаллы представляют собой кусочки кремния нанометровых размеров, помещенных в какую-либо матрицу. Из-за того что, происходит навязывание периода кристаллической решетки кремния окружающей матрицей, нанокристалл подобно гетероструктурам можно рассматривать как деформированный кусок кремния. Так как развитие теории расчетов спектра электронных состояний в нанокристаллах дает новые возможности, которые можно приложить и к объемным материалам, то исследование физики состояний примесных центров в нанокристаллах становится особенно актуальным.

В рамках данной работы было выполнено исследование электронной структуры и скоростей излучательных и безызлучательных (Оже) процессов в нанокристаллах кремния размерами 1, 1.4, 1.6, 1.85 нм (размер включает кремниевое ядро и поверхность). Каждый нанокристалл был сформирован на основе кристаллической решетки объемного кремния: в центре располагался атом кремния, вокруг которого формировались координационные сферы количеством 5, 8, 10, 11 соответственно. Полученные кристаллиты имели группу симметрии T_d . Оборванные связи на поверхности нанокристалла были пассивированы водородом - этот атом, обладая слабым потенциалом по сравнению с кремнием, вносит наименьшие изменения в электронные и оптические свойства кремниевых кристаллитов, позволяя при этом избавиться от состояний, которые могли быть порождены нескомпенсированными связями на поверхности кристаллита. Длина связи кремний-водород была выбрана равной соответствующей длине в хорошо изученной молекуле SiH_4 . Для исследования влияния фосфора на скорости излучательной рекомбинации в структуре каждого кристаллита центральный атом кремния был замещен на изокорный атом фосфора (рисунок 34).

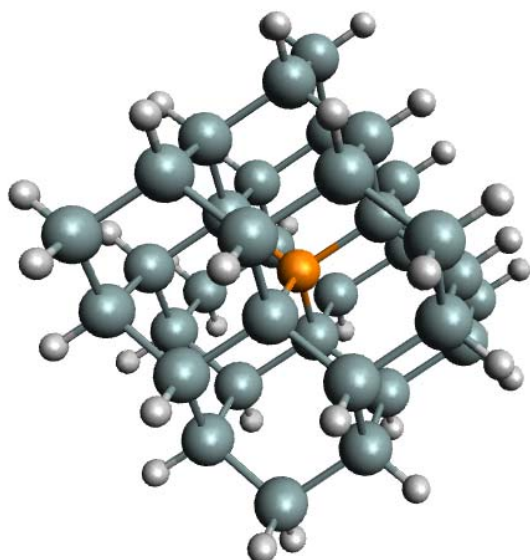


Рисунок 34 – Кристаллическая структура нанокристалла размером 1.0 нм и конфигурацией $\text{Si}_{34}\text{P}_1\text{H}_{36}$: большие серый атомы – кремний, маленькие серые атомы – водород, в центре оранжевый атом – фосфор.

Оптимизация геометрии полученных структур первоначально была проведена в рамках молекулярной механики методом универсального силового поля (UFF) с помощью программы Avogadro [1]. Преимущество этого метода состоит в том, что он, будучи универсальным, позволяет довольно быстро получить первое приближение к релаксированной структуре, которое впоследствии может быть уточнено другими методами. На основе полученных структур последующая оптимизация геометрии была проведена в рамках теории функционала плотности (DFT) с помощью программного комплекса GAMESS [2] с использованием базиса гауссовых функций 6-31G и обменно-корреляционного функционала на основе обобщенно-градиентного приближения PBE [3], который довольно хорошо описывает структуры на основе кремния. Релаксация кремниевых кристаллитов проводилась до тех пор, пока максимальные и средние по кристаллиту проекции сил Хеллмана-Фейнмана не достигали величины, меньшей или равной 10^{-4} эВ/Å.

Для структур, удовлетворивших этому требованию, был проведен расчет электронной структуры в рамках DFT с помощью программного комплекса Octopus [4], в котором реализован сеточный метод решения уравнений Кона-Шема [5] с использованием псевдопотенциалов. В качестве граничных условий использовалось обращение в ноль волновой функции на границе нанокристалла. Для определения шага по сетке h и линейного размера суперячейки L , в которой находится кристаллит, для каждого нанокристалла был проведен ряд расчетов полной энергии с различными значениями h и L , оптимальные параметры были выбраны исходя из условия $\Delta E_{tot} \leq 10^{-2}$ эВ (рисунок 35).

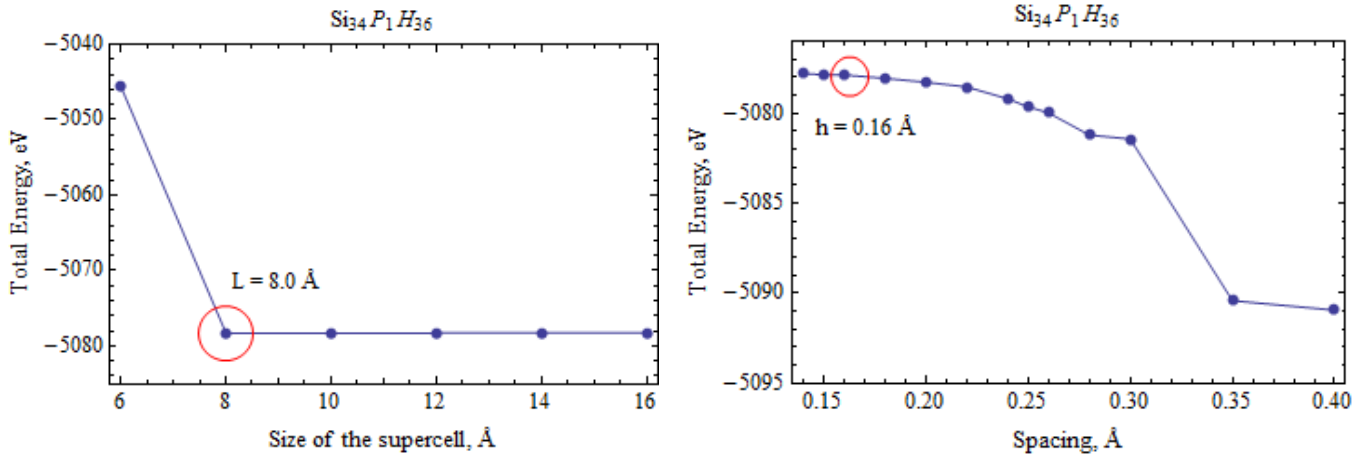


Рисунок 35 – Зависимость полной энергии нанокристалла $\text{Si}_{34}\text{P}_1\text{H}_{36}$ от размера суперъячейки L и шага по сетке h . Оптимальные параметры: $L = 8.0 \text{ \AA}$, $h = 0.16 \text{ \AA}$.

На рисунке 36 представлен результат расчета электронной структуры кремниевого нанокристалла с размером 1 нм. Семейство нижних электронных уровней в присутствии фосфора расщепляется на уровни синглета, дублета и триплета, причем основным (и достаточно сильно отщепленным, на энергию $\Delta E \sim 0.5 \text{ эВ}$) оказывается именно синглетный уровень, что характерно и для объемного кремния.

На рисунке 37 представлена зависимость ширины запрещенной зоны, а также величины отщепления донорного синглетного уровня от размера кристаллита. Видно, что с увеличением размера нанокристалла ширина запрещенной зоны, как и величина отщепления уменьшаются.

Для полученных структур был проведен расчет скоростей излучательной и безызлучательной (Оже) рекомбинации. В приближении изотропного излучения вероятность τ_R^{-1} излучательной рекомбинации в единицу времени при переходе из электронного состояния в основное дырочное состояние в нанокристалле (вероятность электронно-дырочной рекомбинации в единицу времени) может быть рассчитана по формуле (3).

$$\tau_R^{-1} = \frac{4e_0^2 (x_{eh}^2 + y_{eh}^2 + z_{eh}^2) n(E_{ph}/\hbar) E_{ph}^3 F^2(E_{ph}/\hbar)}{3\hbar^4 c^3}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}_{eh} = x_{eh}\mathbf{e}_x + y_{eh}\mathbf{e}_y + z_{eh}\mathbf{e}_z$ – матричный элемент оператора радиус-вектора на электронных («e») и дырочных («h») состояниях, E_{ph} – энергия излучаемого фотона, $n(\omega)$ – коэффициент преломления среды как целого на частоте ω , который в пределе уединенного нанокристалла, внедренного в некоторую диэлектрическую матрицу, может быть записан как

$$n(\omega) = n_d(\omega), \quad (4)$$

где $n_d(\omega)$ – показатель преломления диэлектрической матрицы на частоте ω , $F(\omega)$ – локальный полевой фактор на частоте ω , связанный с комплексной диэлектрической функцией нанокристалла $\varepsilon_{NC}(\omega) = \varepsilon'_{NC}(\omega) + i\varepsilon''_{NC}(\omega)$ и показателем преломления окружающего диэлектрика:

$$F(\omega) = \frac{3n_d^2(\omega)}{2n_d^2(\omega) + \varepsilon'_{NC}(\omega)} \quad (5)$$

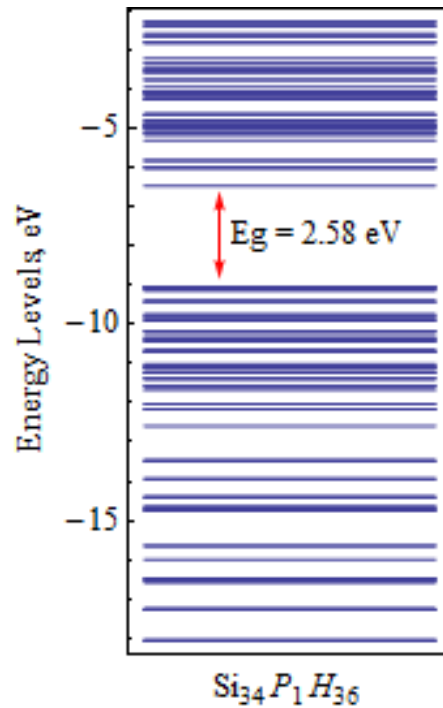


Рисунок 36 – Электронная структура нанокристалла кремния диаметром 1 нм.

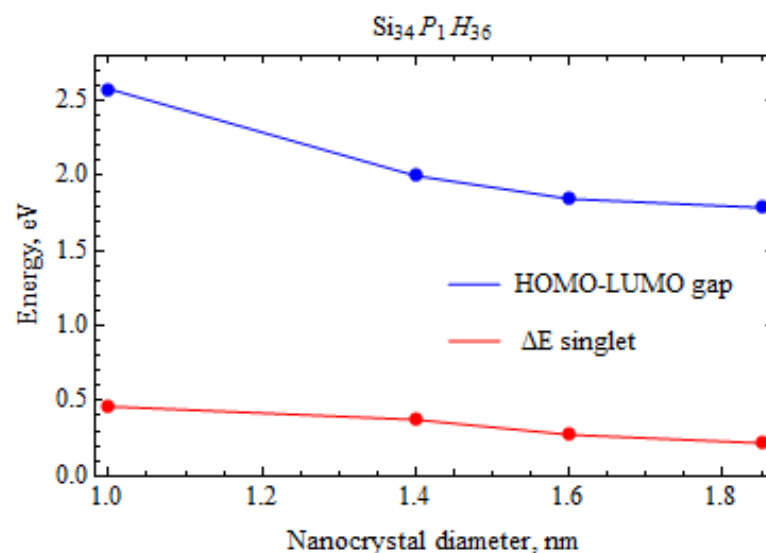


Рисунок 37 – Синим цветом представлена зависимость ширины запрещенной зоны, а красным - величины отщепления донорного уровня ΔE от диаметра нанокристалла.

Подставив $n(\omega)$ и $F(\omega)$ в исходное выражение, получим явное выражение для расчета вероятности излучательной рекомбинации в единицу времени:

$$\tau_R^{-1} = \frac{12e_0^2(x_{eh}^2 + y_{eh}^2 + z_{eh}^2)E_{ph}^3 n_d^5(E_{ph}/\hbar)}{\hbar^4 c^3 (2n_d^2(E_{ph}/\hbar) + \varepsilon'_{NC}(E_{ph}/\hbar))^2} \quad (6)$$

Матричные элементы \mathbf{r}_{eh} рассчитываются на основе волновых функций, полученных «из первых принципов». Поскольку расчет был проведен для нанокристалла в вакууме, то $n_d(\omega)$ необходимо положить равной 1. В качестве нулевого приближения для $\varepsilon'_{NC}(E_{ph}/\hbar)$ можно выбрать $\varepsilon'_{NC}(E_{ph}/\hbar) \approx 5$, что справедливо для кремниевых кристаллитов с размерами 1-2 нм.

На рисунке 38 приведена зависимость скорости излучательной рекомбинации для кристаллитов размерами 1 нм и 1.4 нм от энергии фотона. Хорошо прослеживается край поглощения для энергии, соответствующей ширине запрещенной зоны. В видимой области спектра (до 3.26 эВ, соответствующая длина волны 380 нм) максимальные значения скорости излучательной рекомбинации достигают значений до $10^7 - 10^8$ 1/с.

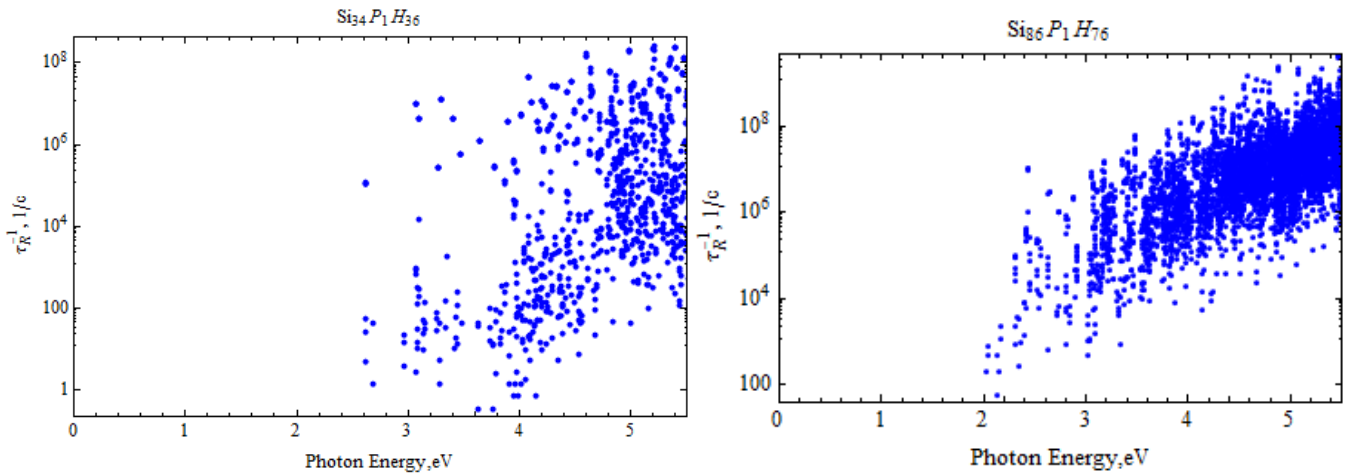


Рисунок 38 – Зависимость скорости излучательной рекомбинации для кристаллитов размерами 1 нм (график слева) и 1.4 нм (график справа) от энергии фотона.

Скорости безызлучательной Оже-рекомбинации были рассчитаны в рамках первого порядка теории возмущений на основе «золотого» правила Ферми:

$$\tau_A^{-1} = \frac{2\pi}{\hbar} |V_{if}|^2 \Delta(E_f - E_i) \quad (7)$$

где E_f – энергия конечного состояния, E_i – энергия начального состояния, $|V_{if}|^2$ – матричный элемент Кулоновского взаимодействия, $\Delta(E_f - E_i)$ – аппроксимация дельта-функции функцией Лоренца:

$$\Delta(x) = \frac{\gamma}{\gamma^2 + x^2} \quad (8)$$

В дальнейшем, при расчете скоростей Оже-рекомбинации для eeh -процесса предполагалось, что два возбужденных электрона в зоне проводимости находятся на нижнем уровне энергии, и дырка в валентной зоне также находится в своем основном состоянии – т.е. занимает верхний уровень. В результате кулоновского взаимодействия электронов один из них переходит в основное состояние валентной зоны, а другой – на более высокий уровень по энергии в зоне проводимости. Скорость перехода определяется матричным элементом кулоновского взаимодействия, который имеет две составляющие: дальнедействующую $V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ и короткодействующую $W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$. Дальнедействующая составляющая, являющаяся водородоподобной в объемном полупроводнике, в нанокристалле модифицируется за счет возникновения поляризационных зарядов на границе нанокристалла. Эту часть потенциальной энергии можно представить в следующем виде [7]:

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{e^2}{\varepsilon_s |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} + \frac{e^2(\varepsilon_s - \varepsilon_d)}{\varepsilon_s R} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)P_n(\cos\theta)r_1^n r_2^n}{(n\varepsilon_s + (n+1)\varepsilon_d)R^{2n}} \quad (9)$$

Короткодействующая часть потенциала была взята согласно [8]:

$$W(\mathbf{r}, \mathbf{h}) = -\frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{h}|} \left[A \exp(-\alpha|\mathbf{r} - \mathbf{h}|) + \left(1 - A - \frac{1}{\varepsilon_s}\right) \exp(-\beta|\mathbf{r} - \mathbf{h}|) \right] \quad (10)$$

где $A=1,142$, $\alpha=0,82/a_b$, a_b – боровский радиус, а ε_s и ε_d – диэлектрические проницаемости кремния и вакуума, соответственно.

В таблице 2 представлено сравнение скоростей безызлучательной рекомбинации и максимальных значений скоростей излучательной рекомбинации в видимой области спектра. Видно, скорость Оже-процесса в легированном кристаллите все еще остается на несколько порядков выше, чем скорости излучательной рекомбинации, что приводит к необходимости поиска другого способа модификации структуры кристаллитов, способствующих подавлению безызлучательных процессов.

Таблица 2 – Скорости безызлучательной рекомбинации и максимальные значения скоростей излучательной рекомбинации в видимой области спектра

Диаметр нанокристалла →	1.0 нм Si ₃₄ P ₁ H ₃₆	1.4 нм Si ₈₆ P ₁ H ₇₆	1.6 нм Si ₁₂₂ P ₁ H ₁₀₀	1.85 нм Si ₁₄₆ P ₁ H ₁₀₀
$\tau_R^{-1}, c^{-1}, \max$	10^7	10^8	$5 \cdot 10^8$	10^9
τ_A^{-1}, c^{-1}	$8 \cdot 10^{11}$	$9 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{12}$

5. Проведение измерений по спектроскопии насыщения на примесных переходах в кристалле германия, которые дают информацию о временах жизни возбужденных состояний. Измерения проведены с использованием лазера на свободных электронах на бахе ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения

5.1 Используемое оборудование

Работы данного раздела проведены с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах, который относится к уникальным научным установкам, а так же оборудования центра коллективного пользования «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения». Акт и протокол работ представлены в приложении 3, методика измерений – в приложении И.

5.2 Результаты работ

Как известно, в модели двухуровневой системы спектроскопия насыщения может давать информацию о временах релаксации возбужденного уровня. В рамках простой модели предполагается, что знание сечения перехода и плотности мощности, при которой происходит просветление среды, достаточно для получения времени (скорости) релаксации. Однако такое рассмотрение неявно предполагает определенное соотношение времени релаксации (вообще говоря, неизвестное), диапазона имеющихся интенсивностей и времени воздействия (длительность лазерного импульса). В рамках проекта было запланировано сравнение результатов измерения времени релаксации для примеси германия методами памп-проба и насыщения. Для этих целей была выбрана примесь галлия и переход, соответствующий D-линии, как одной из самых интенсивных. Как известно, время релаксации для D-линии составляет порядка 160 пс. Длительность лазерного импульса ЛСЭ Novo-FEL составляет 100-150 пс в зависимости от установок и длины волны излучения. Следовательно, система не успеет войти в стационар и корректную величину получить нельзя. Для преодоления этого было использовано удвоение длительности, которую предоставляет созданная на базе ЛСЭ установка. Для целей эксперимента была зафиксирована задержка между импульсами порядка их длительности и уравнена их интенсивность. Образец для измерений представлял собой клиновидную пластинку толщиной порядка 500 микрон. Концентрация акцепторов составляла порядка 10^{15} см⁻³. Рисунок 39 представляет результат измерения сигнала pump-probe для D-линии. Отклик составляет порядка 250 пс, что при имеющейся длительности импульса ЛСЭ 120 пс, рассчитанной по интерференционной картине при сведении двух пучков, дает время релаксации порядка 130 пс, что близко к известной величине. Для последующих измерений импульс проба сдвигается на 120 пс, что соответствует длительности импульса ЛСЭ.

D:\Data\2016-NovoFEL-November\pump-probe20161129\
New measurements (after modifications)\
GeGa476_pump-probe_150um_20161202_35cm_stage_4.1K_probe-10mWt_pump-50mWt.dat

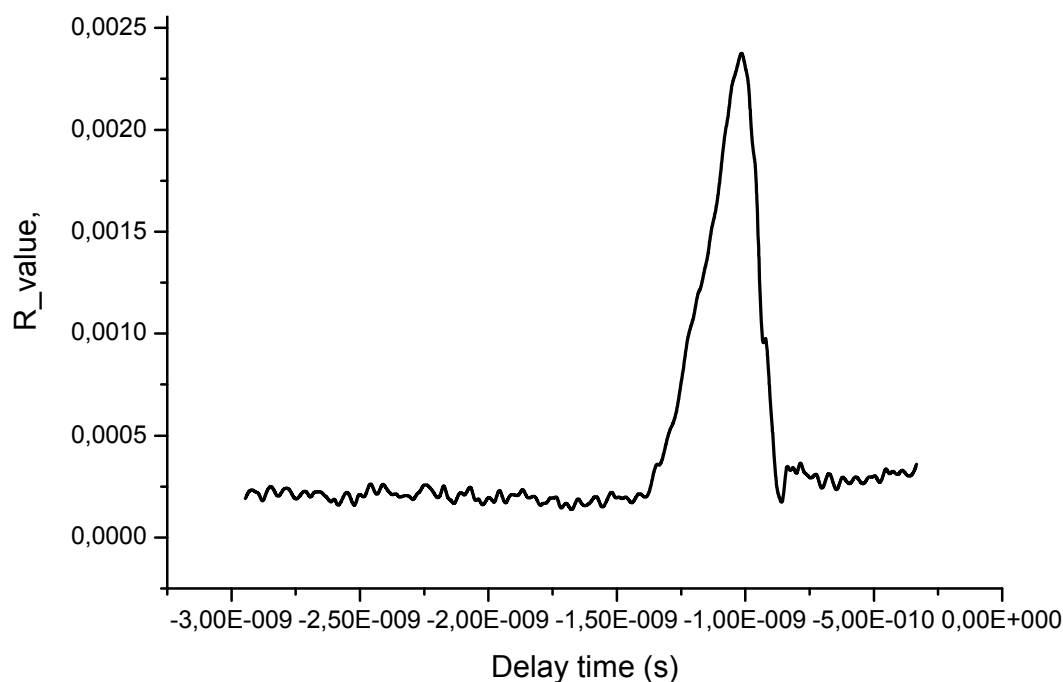


Рисунок 39 – pump-probe сигнал для D-линии в германии, легированном акцепторами галлия

Рисунок 40 демонстрирует зависимости прохождения для обоих пучков при перпендикулярных поляризациях. В этом случае предполагается, что возбужденные атомы слабо взаимодействуют со вторым импульсом. Как видно из рисунка линейная зависимость видна для первого импульса, что и предполагалось для коротких импульсов возбуждения. Некоторое отклонение заметно для второго импульса, однако характер отклонения для этого случая не позволяет говорить об эффекте просветления.

На рисунке 41 показаны зависимости прохождения для первого и второго пучков для параллельных поляризаций. Так же, как и в первом случае, зависимость для первого импульса близка к линейной, однако для второго пучка данные указывают на явное насыщение прохождения. Так как оба импульса обладают одной и той же поляризацией, то атомы, возбужденные первым пучком могут взаимодействовать со вторым, при этом такое взаимодействие, может приводить, в общем случае, к различным эффектам, в зависимости от взаимной мощности, времени поперечной и продольной релаксации и направления распространения пучков. В данном случае мы имеем дело с акцептором галлия в германии, и, следовательно, необходимо учесть процессы возбуждения в валентную зону и межподзональные l-h переходы. Количество выброшенных в валентную зону дырок зависит от падающей мощности, причем для дырки на возбужденном уровне существует как веро-

ятность вернуться на основное состояние с излучением фонона, так и вероятность перейти в свободное состояние. Второй процесс зависит от величины падающей мощности. Если сечение перехода между подзонами легких и тяжелых дырок для данной длины волны выше, чем сечение в линии, а такое возможно в случае небольшой отстройки, тогда переброс дырок в зону должен увеличить поглощение в среде. Точка перегиба вблизи 20 мВт соответствует скорости возбуждения порядка 10^{10} с^{-1} , что неплохо согласуется с данными, полученными методом pump-probe. При этом следует отметить, что в случае перпендикулярных поляризаций в пучках света такой процесс затруднен, так как излучение второго пучка слабо взаимодействует с возбужденными атомами.

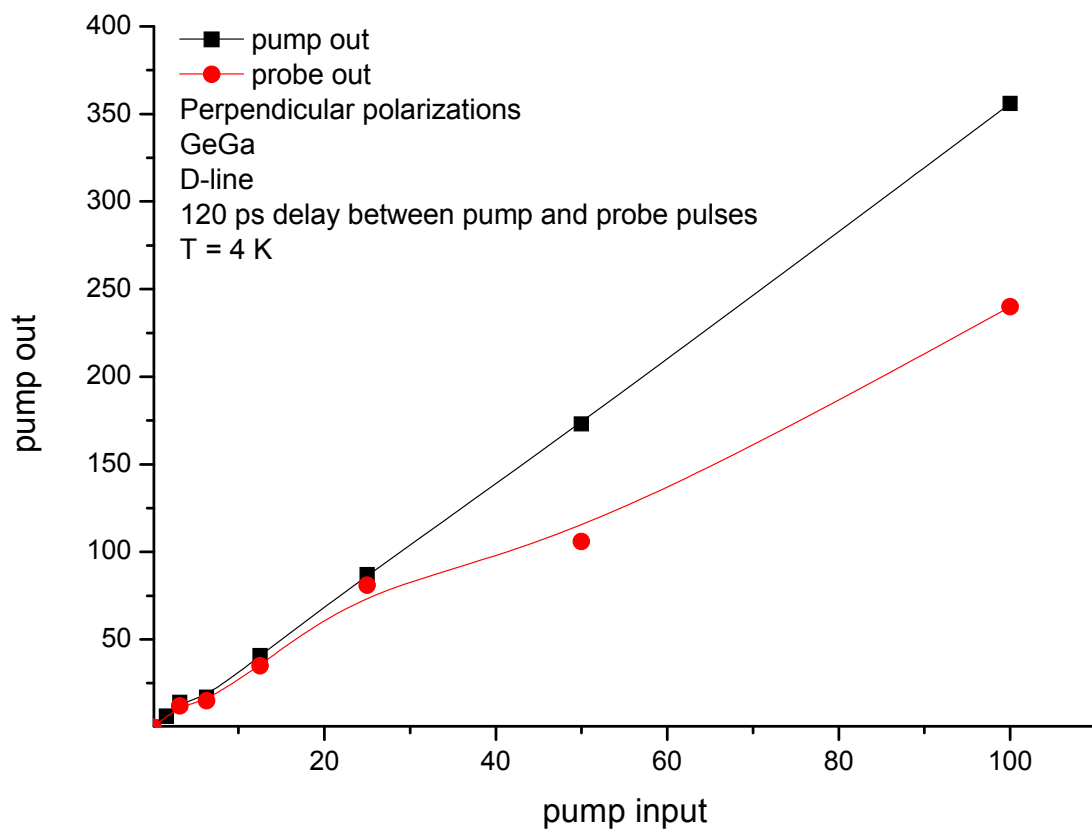


Рисунок 40 – зависимости мощности прошедшего сигнала для первого и второго пучков для перпендикулярных поляризаций от падающей мощности

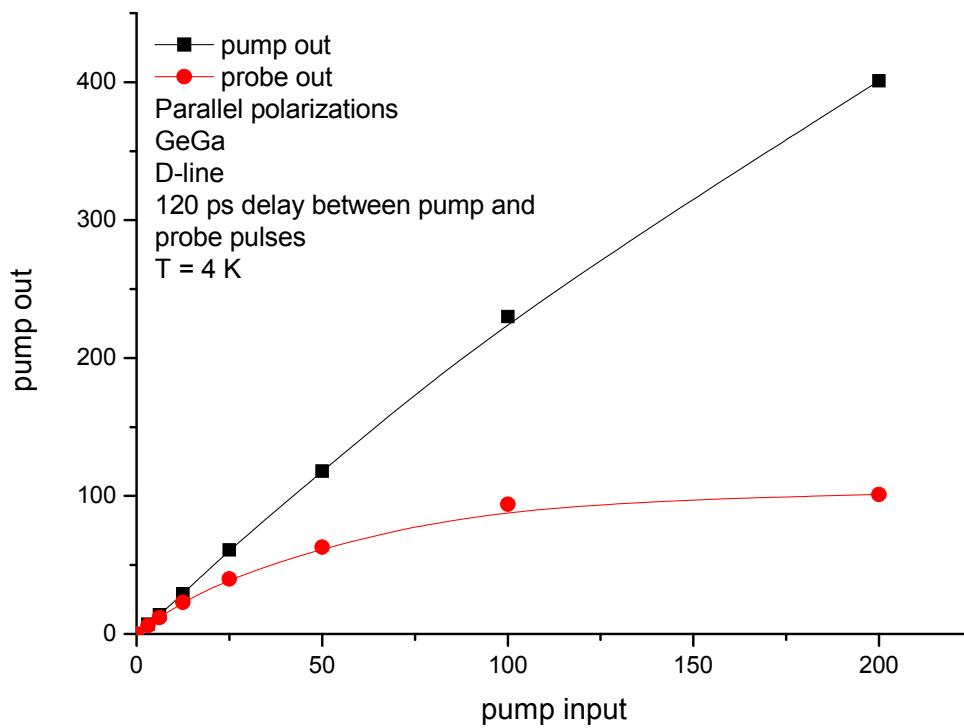


Рисунок 41 – зависимости мощности прошедшего сигнала от падающей мощности для первого и второго пучков для параллельных поляризаций

6. Проведение патентных исследований

Российская академия наук

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МИКРОСТРУКТУР РАН – ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ 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

« ____ » _____ г.

ОТЧЕТ
О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В рамках федеральной целевой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

Соглашение от 17.09.2014 г. № 14.616.21.0008

по теме:

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВАРИАТИВНОЙ ОДНОЦВЕТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ «НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ» В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

(промежуточный, этап № 5)

Руководитель проекта, д.ф.-м.н.

подпись, дата

В.Н. Шасти́н

Нижний Новгород 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта:

доктор физико-
математических наук, ведущий
научный сотрудник

подпись, дата

Шастин В. Н. (приложение А, заклю-
чение)

Исполнители :

кандидат физико-
математических наук, без уче-
ного звания

подпись, дата

Цыпленков В. В. (основная часть, за-
ключение)

кандидат физико-
математических наук, без уче-
ного звания

подпись, дата

Орлов М. Л. (отчет о патентных ис-
следованиях)

кандидат физико-
математических наук, без уче-
ного звания

подпись, дата

Жукавин Р. Х. (общие данные об объ-
екте исследования)

Главный специалист Государ-
ственного бюджетного учреж-
дения дополнительного про-
фессионального образования
«Нижегородский научно-
информационный центр»

подпись, дата

Покровская Т.Н. (отчет о патентных
исследованиях)

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц, терминов	4
Общие данные об объекте исследования	5
Аналитическая часть отчета о патентных исследованиях	7
Заключение	17
Список использованных источников	19
Приложение А Задание на проведение патентных исследований	20
Приложение Б Регламент поиска	22
Приложение В Отчет о поиске	25
Приложение Г Рефераты к патентам, отобранным в процессе поиска	29

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ

В данном отчете о патентных исследованиях используются следующие сокращения, условные обозначения, символы, единицы и термины:

ТГц – терагерц

мкм – микрометр

см. – смотри

мэВ – миллиэлектронвольт

кбар – килобар

мм – миллиметр

rimpr probe – метод исследования «накачка-зондирование», заключающийся в использовании двух сигналов, разделенных во времени. Первый, мощный импульс осуществляет накачку изучаемого объекта, а второй, слабый используется для его исследования.

US – Соединенные штаты Америки.

RU – Российская федерация.

МПК (МКИ) – международная патентная классификация (международная классификация изобретений);

НКИ – национальная классификация изобретений;

НТИ – научно-техническая информация;

ГС – гармонизированная система (гармонизированная товарная номенклатура);

СМТК – стандартная международная торговая классификация ООН;

БТН – Брюссельская таможенная номенклатура;

УДК – универсальная десятичная классификация;

ПИ – патентные исследования;

ТУ – технические условия;

ПФ – патентный формуляр.

ЕПО – Европейская патентная организация

WO – Международный патент.

WIPO, ВОИС – Всемирная организация интеллектуальной собственности

ВИНИТИ – Всероссийский институт научной и технической информации

МЦНТИ – Международный центр научной и технической информации

ЦИТиС – Федеральное государственное научное учреждение «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти»

ПМ – полезные модели.

АС – авторское свидетельство.

ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне

Освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот – одно из наиболее стремительно развивающихся направлений современной прикладной физики. Интерес к данному направлению обусловлен перспективами широких практических приложений ТГц излучения. Электромагнитные волны терагерцового диапазона отражаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ($\propto 1/\lambda^4$). В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод ДНК и белков, а также фононные резонансы кристаллических решеток, что позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур. Отраженные, поглощенные в среде или прошедшие сквозь нее терагерцовые волны несут в себе богатейшую информацию об объекте. Все это определяет потенциально широкий спектр применения этого излучения. С помощью терагерцового излучения можно управлять химическими реакциями и манипулировать электронными состояниями в квантовых ямах. В отличие от рентгена ТГц излучение не опасно, поскольку не производит ионизацию среды и повреждение биомолекул, что позволяет проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов. Перспективны такие применения ТГц излучения, как беспроводная коммуникация компьютеров и периферийных устройств внутри зданий, разработка систем безопасности на основе терагерцового видения и др. В целом ряде случаев, таких как создание инвертированных сред и различных типов электронных ключей, необходимо знание временной динамики релаксации отклика на внешнее воздействие. В тех случаях, когда исследования требуют временного разрешения в пико- и фемтосекундном диапазоне, обычные электронные средства регистрации не могут обеспечить столь быстрого отклика. Для этих задач была разработана техника (pump-probe), использующая быструю накачку (или опустошение) исследуемого состояния импульсами фемто-пикосекундных лазеров и зондирование этого состояния синхронизованным во времени лазерным импульсом с контролируемой задержкой. Задержка с фемто–пикосекундной точностью производится изменением путей распространения накачивающего и зондирующего импульсов. Существуют различные варианты этой техники – абсорбционные, флуоресцентные, фотоионизационные, их комбинации. Применение методики «накачка-зондирование» особенно эффективно при изучении динамики населенностей энергетических уровней. Интенсивность излучения, необходимая в экс-

периментах, в зависимости от задачи может изменяться от малых мощностей, исключающих нагрев образца, до очень больших при изучении насыщения переходов. Например, для изучения методом спектроскопии «накачка-зондирование» колебательных и вращательных мод, относящихся к терагерцовому диапазону, интенсивность должна достигать значений порядка $10^{11} \div 10^{12}$ Вт/см².

Несмотря на достаточно большую историю развития и широкий вариативный ряд, в каждом конкретном случае исследователь должен решать задачу создания конфигурации измерительной установки и подбора ее элементов, в первую очередь, источника излучения. Наиболее подходящим с этой точки зрения является лазер на свободных электронах (ЛСЭ), обладающий уникальными возможностями, включающими высокие интенсивности, перестройку частоты в широком спектре, короткие импульсы излучения. Однако в силу своей дороговизны и энергоемкости эксплуатации, данный вид источников предполагает высокий уровень эффективности использования, что часто означает временное ограничение на проведение конкретного эксперимента при доступе на конкурсной основе. В последнее время большинство ЛСЭ в мире оснащено установками для измерения динамики релаксации различных сред методом «накачка-зондирование». Но, как было указано, необходимо их эффективное использование.

Объектом исследования является устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне, включающее ЛСЭ, линию задержки, детектор, модулятор (прерыватель светового потока), зеркала, делитель пучка, зеркала, фокусирующий объектив и апертуру.

Область применения данного вида устройств: исследование динамики релаксации различных сред, включая биологические, при воздействии терагерцового излучения.

Предлагается использовать в качестве делителя пучка пропускающие дифракционные решетки, стоящие друг за другом, что позволит избежать перенастройки оптической схемы установки при смене длины волны и поляризации излучения, что позволит значительно сэкономить рабочее время.

Таким образом, в настоящее время перед исследователями поставлена проблема выбора нужных элементов устройства «накачка-зондирование» и установить оптические связи между ними, исходя из необходимости минимизации времени измерения при необходимости перестройки длины волны и поляризации. В результате должно быть реализовано устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ОТЧЕТА О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (Технический уровень и тенденции развития)

Проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения» по теме «Источник терагерцового лазерного излучения на основе кремния», целью которых на третьем этапе было проведение дополнительного патентного исследования с целью определения уровня техники в данной области, результаты которого будут использованы при подготовке заявки для патентования технического решения в качестве изобретения и выявления возможных препятствий для патентования.

Содержание патентных исследований определено регламентом поиска. Наиболее близкие по назначению, конструктивному исполнению и достигаемому результату, отобранные для последующего более глубокого анализа патенты приведены в таблице В.6 в Приложении В «Отчета о патентных исследованиях», а их рефераты – в приложении Г.

Анализ патентов показал следующие результаты.

Проанализированные патенты можно разделить на несколько групп. В первую группу входят патенты и научные публикации, описывающие принцип действия отдельных элементов, которые могут быть использованы в устройствах «накачка-зондирование», в первую очередь речь идет об источниках излучения, способах формирования и разделения оптических пучков, и детектирования.

В патенте на изобретение № 2117322 устройство для формирования световых пучков, содержащее источник когерентного оптического излучения и вогнутое главное зеркало, а также оптически связанные с ними устройство обращения волнового фронта со светоделителем на входе и две вспомогательные оптические системы, обеспечивающие самопроецирование главного зеркала самого на себя, отличающееся тем, что главное зеркало и элементы обеих вспомогательных систем расположены соосно, а светоделитель выполнен в виде полупрозрачного зеркала, нанесенного на поверхность линзового элемента одной из вспомогательных систем.

В патенте на изобретение № 2523735 многоходовая фокусирующая система, содержащая линзы для фокусировки лазерного пучка и зеркала для его возврата в измерительный объем, отличающаяся тем, что система включает размещенные на общем основании одну и более способных перемещаться в направлении к точке фокуса сборок оптических элементов, каждая из которых содержит два плоских поворотных зеркала в юстировочной головке, обеспечивающей независимый наклон каждого зеркала в двух направлениях, и перефокусирующую линзу между ними, установленную соосно с отраженным лазерным пучком на двойном фокусном расстоянии по ходу пучка от измерительного объема, установленных в положениях, обеспечивающих фокусировку отра-

женного пучка в той же точке, и одну сборку, содержащую линзу и плоское зеркало или только вогнутое зеркало, направляющую лазерный пучок так, что он проходит весь свой путь в обратном направлении, при этом число проходов равно от 4 и более в зависимости от числа установленныхборок оптических элементов.

В патенте на изобретение № 2532649 панкратическая фокусирующая система, включающая первый объектив, состоящий из трех линзовых компонентов, установленных последовательно вдоль оптической оси объектива, причем первый линзовый компонент содержит последовательно расположенные отрицательную и положительную линзы и установлен с возможностью перемещения вдоль оптической оси объектива, второй линзовый компонент выполнен в виде отрицательной линзы и установлен с возможностью перемещения вдоль оптической оси объектива, а третий линзовый компонент выполнен в виде положительной линзы и установлен неподвижно, отличающаяся тем, что панкратическая фокусирующая система включает дополнительный лазер и, по меньшей мере, один дополнительный идентичный первому объектив, расположенные таким образом, что оптические оси лазера и всех объективов пересекаются в одной точке, расстояния от оптической оси лазера до оптических осей объективов одинаковы, каждый объектив дополнительно включает плоскопараллельную пластину, установленную перед первым компонентом с возможностью поворота вокруг оси, перпендикулярной меридиональной плоскости панкратической фокусирующей системы, причем все оптические компоненты объективов выполнены из кварцевого стекла, а плоскопараллельные пластины, первые и вторые компоненты объективов кинематически синхронизированы друг с другом.

В патенте на изобретение № 2411620 модулятор лазерного излучения, содержащий платформу на оси поворота с закрепленной на платформе подложкой, на поверхности которой сформирована рельефная дифракционная решетка с прямоугольным профилем, глубина рельефа которой превышает четверть длины волны модулируемого лазерного излучения, поверхность дифракционной решетки нанесено зеркальное отражающее покрытие, платформа опирается на электромеханический вибратор, установленный на расстоянии $L = \Delta x / \Delta \Theta$ от оси поворота платформы, где Δx - амплитуда смещения электромеханического вибратора, а $\Delta \Theta$ - амплитуда угловых колебаний платформы с решеткой, между электромеханическим вибратором и осью поворота установлена возвратная пружина, на выходе отраженного пучка лазерного излучения установлен пространственный фильтр в нулевом порядке дифракции.

В патенте на изобретение № 2477914 модулятор лазерного излучения, содержащий лазер, рельефную дифракционную решетку с прямоугольным профилем, зеркально отражающую пучок модулируемого лазерного излучения, глубина которой превышает четверть длины волны модулируемого лазерного излучения, платформу, связанную с электромеханическим вибратором, установленным на неподвижном основании, отличающийся тем, что рельефная дифракционная решет-

ка выполнена из пластин, сформированных в стационарные группы и группы подвижных пластин с возможностью их возвратно-поступательного движения, размещенных в промежутках пластин стационарной группы, торцы которых смещены относительно торцов стационарной группы в направлении, перпендикулярном к поверхностям, обращенным к лазеру, стационарная группа связана с основанием посредством прецизионного регулировочного механизма, а группа подвижных пластин установлена на платформе, связанной упругим подвесом с основанием и электромеханическим вибратором, причем торцы пластин, обращенных к лазерному пучку, имеют плоскую поверхность, зеркально отражающую лазерное излучение.

В патенте на изобретение № 2517823 Устройство для модуляции монохроматического оптического излучения, содержащее оптически прозрачную среду, в которой по ходу монохроматического оптического излучения установлены разделитель монохроматического оптического излучения на первый и второй каналы распространения, отражающий элемент во втором канале распространения, участок когерентного суммирования для формирования модулированного монохроматического оптического излучения, отличающееся тем, что в качестве разделителя монохроматического оптического излучения на первый и второй каналы распространения использован делительный куб, состоящий из двух одинаковых треугольных призм, совмещенных своими большими гранями, первый канал распространения снабжен своим отражающим элементом, при этом каждый отражающий элемент нанесен на соответствующую грань делительного куба по ходу монохроматического оптического излучения в первом и втором каналах распространения, делительный куб установлен с возможностью возвратно-поступательного перемещения вне плоскости сопряжения призм делительного куба, а угол α между вектором скорости возвратно-поступательного движения и плоскостью сопряжения призм делительного куба выбран из соотношения $v = f_m \lambda_0 / (\sqrt{2} \cos(\alpha))$,

где f_m - необходимая частота модуляции монохроматического оптического излучения,
 λ_0 - длина волны монохроматического оптического излучения на входе в делительный куб,
 v - скорость движения делительного куба.

В патенте на изобретение № 2539678 в 1-ом варианте устройство для получения электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне, содержащее лазер накачки, оптически связанный через волновую пластинку с образцом, выполненным из материала активной среды, отличающееся тем, что образец выполнен из материала топологического изолятора с соединением Bi_2Se_3 или Bi_2Te_3 , при этом указанный образец оптически связан через последовательно расположенные оптический фильтр и поляризатор с оптоакустическим преобразователем, выполненным в виде ячейки Голея, и подключенным к синхронному детектору, причем плоскость образца с активной средой ориентирована по отношению к оптической оси лазера накачки под углом $\alpha_c \neq 90^\circ$. В 2-ом варианте устройство для получения электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне, содер-

жащее лазер накачки, оптически связанный с одной стороны через делительную пластинку с образцом, выполненным из материала активной среды, отличающееся тем, что образец выполнен из материала топологического изолятора с соединением Bi_2Se_3 или Bi_2Te_3 , который связан через последовательно расположенные на оптической оси фокусирующую линзу, полупрозрачное зеркало, кристаллический детектирующий элемент, четвертьволновую пластинку и призму Волластона с балансным фотодетектором, подключенным к регистратору, причем лазер накачки оптически связан с другой стороны через указанную делительную пластинку, линию задержки и отражательное зеркало с упомянутым полупрозрачным зеркалом, плоскость которого ориентирована под углом 45° к оси оптического канала.

В патенте на изобретение № 2545336 устройство для управления параметрами оптического излучения, включающее в себя источник лазерного излучения, поляризатор, вращающийся оптический элемент и датчик, измеряющий угол поворота плоскости поляризации, отличающееся тем, что в схему введена цепочка обратной связи, состоящая из светоделительной пластины, поворотного блока, на котором установлены указанный датчик угла поворота плоскости поляризации и дополнительный поляризатор, также из фотодетектора, усилителя, персонального компьютера и центрального блока управления скоростью вращения оптического элемента.

В заявке на изобретение № 2004138689 устройство для осуществления описанного способа концентрирования лучистого потока, содержащее источник монохроматического когерентного излучения, делитель лучистого потока для разделения потока на два луча, на пути одного из которых установлено устройство задержки, а на пути второго поворотная зеркальная система с фазовращающей пластинкой, ячейки Керра на пути обоих лучей и вторая поворотная зеркальная система с фазовращающей пластинкой перед делителем лучистого потока, отличающееся тем, что во вторую поворотную зеркальную систему введена еще одна ячейка Керра с фазовращающей пластинкой, а на пути выходящего луча установлено аналогичное первому второе устройство, оптический путь которого в n_1 раз более короткий, с дополнительной поворотной зеркальной системой и фазовращающей пластинкой.

Вторую группу представляют патенты и публикации, описывающие собственно устройства «накачка-зондирование», использующие различные источники излучения и оптические элементы.

В патенте EP 2157420A1 содержится описание устройства для исследования образца, причем устройство содержит излучатель, который выполнен с возможностью генерации терагерцового луча, излучающий, по меньшей мере на одной частоте в диапазоне от 0,01 до 100 ТГц при воздействии электромагнитного луча накачки, имеющего по меньшей мере одну частоту в оптическом диапазоне; детектор, который выполнен с возможностью измерить изменения в электромагнитном пробном луче, по меньшей мере, на одной частоте в оптическом диапазоне, когда модификация индуцирована терагерцовым лучом; путь (траектория) терагерцового луча для направления

терагерцового луча, генерируемого излучателем до образца, и для направления терагерцового луча, отраженного от образца или от терагерцового отражателя расположенного позади образца, до детектора; оптически нелинейный элемент, который функционирует как в качестве активной части излучателя, так и в качестве активной части детектора; дополнительно содержащий: оптический отражатель, расположенный позади оптически нелинейного элемента, если смотреть в направлении распространения луча накачки, и второй отражатель выполненный с возможностью отражения луча накачки обратно на оптически нелинейный элемент таким образом, что отраженный пучок накачки может выступать в качестве зондирующего луча.

В патенте DE 102008026484 A1 описан способ генерации двух оптических импульсов с переменной, интервал временной импульса. Способ генерации двух задержанных импульсов, в частности, в экспериментах по терагерцовой спектроскопии или методик пробного импульса (pump-probe), содержащий следующие этапы: генерация импульсного пучка с использованием источника излучения, в частности импульсного лазера; части импульсного пучка, в котором первый луч содержит первый импульс, а второй луч второй импульс; направленные два импульса на конкретную целевую область, первый импульс приходит непосредственно к первой целевой области, и второй импульс после прохождения линии задержки приходит на вторую целевую область, и две целевые области могут совпадать; использование двух импульсов, в частности, для способа измерения, отличающегося тем, что задержка по времени двух импульсов в соответствующей целевой области устанавливается с помощью частоты повторения импульсов импульсного пучка.

В международной заявке на изобретение WO2007121598A1 описан способ широкополосной генерации терагерцового излучения и системы обнаружения и метод

1. Система генерации широкополосного терагерцового излучения и обнаружения содержит: источник света для генерации пучка (луча) накачки и пучка (луча) зондирования каждый из которых содержит световые импульсы в оптическом диапазоне, имеющих длительность импульса в пикосекундном или суб-пикосекундном диапазоне, в котором указанный пучок накачки имеет первую длину волны (λ_1) и указанный пробный луч имеет вторую длину волны (λ_2); первый нелинейный оптический кристалл, расположенный на траектории луча накачки, в котором Терагерцовый пучок формируется при воздействии на первый нелинейный оптический кристалл пучка накачки; второй нелинейный оптический кристалл, расположенный в тракте пробного пучка, и в тракте терагерцового пучка, в котором оптические свойства зондирующего луча изменяется, когда второй нелинейный оптический кристалл подвергают воздействию пробного луча, и терагерцового пучка; средство обнаружения для обнаружения заранее определенных оптических параметров зондирующего пучка, в котором выполняется, по меньшей мере, одно из следующих условий: первая

длина волны (λ_1) отличается от второй длины волны (λ_2); материал первого нелинейного оптического кристалла отличается от материала второго нелинейного оптического кристалла.

В патенте US 6844552 B2 Терагерцевые приемопередатчики и методы излучения и детектирования терагерцевых импульсов с использованием таких приемопередатчиков описана система для излучения и детектирования одного или более терагерцевых электромагнитных импульсов, при этом система содержит: одно устройство приемопередатчика для обоих излучающих и детектируемого импульсов; оптический источник и связанная оптика для обеспечения: (А) набор импульсов накачки для возбуждения передатчика, испускающего соответствующий набор выходных импульсов терагерцевого диапазона, и (Б) набор зондирующих импульсов, для освещения приемопередатчик одновременно с соответствующим набором отраженных терагерцевых импульсов; модулятор выходных терагерцевых импульсов для поочередной передачи и отражения импульсов на первой частоте, модулятор, имеющий тактовый выход и расположенный между приемопередатчиком и объектом таким образом, что выходные терагерцевые импульсы, отраженные от модулятора имеют выходные импульсы противоположной полярности отраженные объектом; и усилитель синхронный, имеющий опорный вход, подключенный к выходу модулятора часов и синхронизированный на на первой частоте, для приема и снижения уровня шума во множестве электрических сигналов, каждый сигнал, несущий информацию, пропорциональную соответствующей отраженному терагерцевому импульсу, обнаруженному приемопередатчиком.

В патенте Измерительное устройство «накачка-зондирование» US 8982451 B2 описано измерительное устройство «Измерительное устройство «накачка-зондирование», содержащее генератор лазерный оптических сверхкоротких импульсов, который сначала генерирует последовательность сверхкоротких оптические импульсы, которые являются накачкой, вторую последовательность сверхкоротких оптических импульсов, которые имеют запаздывание по отношению к световым импульсам накачки, и третья последовательность ультракоротких оптических импульсов, которая имеет задержку другую величину задержки относительно светового пучка накачки, вторая и третья оптические последовательности импульсов сверхкоротких представляют собой пробное излучение; оптический затвор, управляющий второй и третьей оптическими последовательностями импульсов сверхкоротких введены, блок оптического затвора пропускает вторую и третью оптическую последовательности попеременно; блок оптического управления затвором, который управляет оптическим блоком затвора; оптическая система облучения, которая облучает образец световым пучком накачки и пробного излучения; датчик, который обнаруживает пробный сигнал из образца; и детектор фазочувствительный подключенный к датчику, в котором оптическая система облучения облучает образец первой последовательностью сверхкоротких оптических импульсов светового пучка накачки; вторая и третья оптические последовательности импульсов

вводятся в блок оптического затвора, блок оптического затвора облучает образец второй и третьей последовательностями оптических импульсов попеременно в качестве зондирующего света таким образом, что время задержки зондирующего света относительно светового пучка накачки модулируется периодически; и пробный сигнал от образца определяется чувствительным фазовым детектором, синхронизованным с периодической модуляцией времени задержки.

В международной заявке на изобретение WO 2001065238 A1 описано устройство «Устройство и способ для исследования образца», при этом устройство содержит: средство для облучения образца первым пучком электромагнитного излучения, так что существует возможность возбуждения нелинейного процесса второго порядка в образце; средство для облучения образца вторым пучком электромагнитного излучения; и детектор для обнаружения изменения поляризации второго луча после того, как второй луч был отражен от объекта или прошедший через образец.

В международной заявке на изобретение WO 2009146671 A1 описан способ ТГц спектроскопии накачка-зондирование с задержкой, которая может быть установлена частотой повторения способ генерации двух задержанных импульсов, в частности, в ТГц-спектроскопии и / или в экспериментах накачка-зондирование, включающий в себя следующие стадии: импульсный пучок с использованием источника излучения, в частности импульсного лазера; пучки импульсов, в которых, первый суб-луч содержит первый импульс, а второй суб-луч - второй импульс; два импульса подходящие к соответствующей целевой области, в которой первый импульс проходит непосредственно через первую целевую область и второго импульса, который после прохождения линии задержки достигает второй целевой области, а две целевые области могут совпадать; использование двух импульсов, в частности, для способа измерения; отличающийся тем, что задержка по времени между двумя импульсами в соответствующей целевой области регулируется частотой следования импульсов импульсного пучка.

В патенте US 5734470 Устройство и способ для оптических измерений с временным разрешением. Способ определения свойств образца, причем указанный способ включает: (А) обеспечение возбуждения пучка излучения с последующим пропусканием пучка через участок на дифракционной маске с образованием по меньшей мере двух возбуждающих суб-лучей; (Б) перекрытия по меньшей мере, двух возбуждающих суб-лучи на участке образца при помощи системы формирования изображения для генерации пространственно изменяющегося оптического поля, которое является изображением участка маски и который возбуждает переходную решетку в части образца; (С) облучая переходную решетку пробным пучком излучения ориентированным таким образом, что по меньшей мере часть зондирующего луча преломляется переходной решеткой; (D) обнаружение дифрагированной части зондирующего пучка оптическим детектором, для генерации

генерировать светоиндуцированный сигнал; а также (Е) анализ указанного светоиндуцированного сигнала от оптического детектора, чтобы определить свойства образца.

В международной заявке на изобретение WO 1999013318 A1 Оптический метод для характеристики электрических свойств полупроводников и изолирующих пленок описан способ определения характеристик образца, содержащий этапы, на которых: подготовка полупроводникового материала; приложения электрического поля к полупроводниковому материалу; поглощение светового импульса в части полупроводникового материала и измерение изменения оптических констант, с помощью зондирующего светового импульса, подаваемого в некоторый момент времени при поглощении света накачки импульса; а также связывая измеренное изменение оптических констант, по меньшей мере, одной из: поверхностного заряда, концентрации легирующей примеси, плотности ловушек или времени жизни неосновных носителей.

Известна заявка на изобретение US 20150268200 A1 Неинвазивный метод измерения для зондирования интерфейса описан неинвазивный метод измерения для зондирования интерфейса, включающий в себя: подготовку датчика, толщина которого составляет от 1 нм до 10 нм и покрытым буферной пленкой, выполненного с возможностью генерировать акустическую волну, частота которой больше, чем примерно 300 ГГц; калибровку с измерением отражения акустической волны, отражающейся на границе между буферной пленкой и измеряемым объектом; измерение отражения акустической волны, отражающейся от поверхности объекта, подлежащего измерению свободным от интерфейса между буферной пленкой и измеряемым объектом; и сравнение двух измеренных отражений для анализа, по меньшей мере, одного физического свойства интерфейса.

В патенте US 8400639 B2 методы и приборы для измерения с использованием спектроскопии "накачка-зондирование" в добротных микрорезонаторах описано оптическое устройство, содержащее: высоко-добротную резонансную структуру; один из интерфейсов, поверхность и объем моды доступной для взаимодействия с образцом; а также средство для одновременного возбуждения резонансных мод в упомянутой высоко добротной структуре на одной или нескольких длинах волн накачки и одной или нескольких длинах волн зондирования; в котором упомянутое средство для возбуждения содержит лазер накачки и зондирующий лазер, соединенный с высокодобротной резонансной структурой, в которой указанный лазер накачки вызывает возмущения молекул, адсорбированных в указанной высокодобротной резонансной структуре и упомянутый зондирующий лазер измеряет указанные возмущения.

Из уровня техники известно устройство для интегральной абсорбционной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне, содержащее импульсный источник излучения ближнего инфракрасного диапазона длин волн, оптически связанный с первым светоделителем, который далее оптически параллельно связан с оптической линией задержки светового пучка и вторым светоделителем. Второй светоделитель оптически параллельно связан с оптической лини-

ей задержки светового пучка и дифракционной решеткой. Дифракционная решетка оптически последовательно связана с фазовращающей пластинкой, линзой, нелинейным кристаллом, первым и вторым параболическими зеркалами, исследуемым образцом, третьим и четвертым параболическими зеркалами, и детектором излучения. В свою очередь первая оптическая линия задержки светового пучка оптически связана с плоским зеркалом и детектором излучения [1].

Основным недостатком такого устройства является большая продолжительность измерений методом спектроскопии «накачка-зондирование», так как необходимо производить перенастройку (повторную юстировку) элементов устройства. Данный недостаток вызван следующими факторами: а) небольшое соотношение сигнал/шум, что обусловлено низкой интенсивностью пучка накачки (до 3 мкДж); б) интегральный характер измерений, вследствие немонахроматичности излучения как в пучке накачки, так и в зондирующем пучке; в) изменение соотношения интенсивностей пучков при изменении поляризации излучения, что объясняется зависимостью коэффициента отражения светоделителя от типа поляризации и длины волны.

Также известно устройство для одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование», содержащее перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения, оптически связанный со светоделителем, который в свою очередь оптически параллельно связан с оптической линией задержки светового пучка и прерывателем светового потока. Оптическая линия задержки светового пучка оптически последовательно связана с плоским зеркалом, фокусирующим объективом, исследуемым образцом и детектором излучения. Прерыватель светового потока оптически последовательно связан с фокусирующим объективом и исследуемым образцом [2].

Основным недостатком такого устройства является большая продолжительность измерений при смене поляризации и/или длины волны излучения, так как необходимо осуществлять перенастройку (повторную юстировку) элементов оптической системы. Данный недостаток обусловлен изменением соотношения интенсивностей пучков при изменении поляризации или длины волны излучения, что объясняется зависимостью коэффициента отражения светоделителя от типа поляризации.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому устройству является устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне, содержащее перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения, который оптически связан со светоделителем, расщепляющим световой поток на две части и выполненным в виде тонкой пленки, изготовленной из прозрачного в данном диапазоне материала. Светоделитель оптически параллельно связан с плоским зеркалом и оптической линией задержки светового пучка. Плоское зеркало оптически последовательно связано с прерывателем светового потока, системой из двух зеркал, которая направляет световой поток на фокусирующий объектив, фокусирующим объективом, исследуемым образцом и закрытой частью апертуры. Оптическая линия задерж-

ки светового пучка оптически последовательно связана с системой из двух зеркал, фокусирующим объективом, исследуемым образцом, открытой частью апертуры и детектором излучения [3].

Основным недостатком указанного устройства является большая продолжительность измерений методом спектроскопии «накачка-зондирование», так как необходимо производить перенастройку (повторную юстировку) элементов устройства. Данный недостаток обусловлен различным изменением интенсивностей пучков при изменении поляризации и длины волны излучения, что объясняется зависимостью коэффициента отражения светоделителей, используемых в терагерцовом диапазоне, от названных характеристик излучения. Данное устройство позволяет анализировать только изотропные вещества, при этом исключен анализ анизотропных веществ.

Задача, на решение которой направлено предложенное изобретение, заключается в создании такой конструкции устройства для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне, которая исключала бы указанные выше недостатки.

Техническая проблема, решаемая созданием заявленного изобретения, состоит в создании устройства для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне позволяющей сократить продолжительность измерений и расширить функциональные возможности устройства.

Техническим результатом, на достижение которого направлено заявленное изобретение, является сокращение продолжительности измерений за счет исключения необходимости перенастройки (повторной юстировки) элементов устройства. Указанный технический результат обусловлен тем, что при изменении поляризации и/или длины волны излучения перестраиваемого по частоте источника монохроматического излучения относительная интенсивность излучения в каналах накачки и зондирования не изменяется. Также достигается расширение функциональных возможностей заявленного устройства, так как расширяется класс исследуемых веществ за счёт включения в него не только изотропных, но и анизотропных веществ.

Технический результат достигается в устройстве для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне, содержащем перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения, который оптически последовательно связан с первой пропускающей дифракционной решеткой и второй пропускающей дифракционной решеткой. Вторая пропускающая дифракционная решетка оптически параллельно связана с прерывателем светового потока и первым плоским зеркалом. Первое плоское зеркало оптически последовательно связано с оптической линией задержки светового пучка, вторым плоским зеркалом, фокусирующим объективом, исследуемым образцом, открытой частью апертуры и детектором излучения. Прерыватель светового потока оптически последовательно связан с третьим и четвертым плоскими зеркалами, фокусирующим объективом, исследуемым образцом и закрытой частью апертуры.

Анализ выявленных технических решений показывает, что предлагаемое для патентования техническое решение обладает новизной и изобретательским уровнем. Препятствия для патентования не обнаружены. Следовательно, можно подавать заявку для патентования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ патентных и научно технических источников показал, что предлагаемое для патентования техническое решение обладает новизной и изобретательским уровнем. Препятствия для патентования не обнаружены. Следовательно, можно подавать заявку для патентования.

Патентный поиск проводился по ключевым словам и рубрикам МПК по странам: США, Россия, страны Европейского Сообщества.

При проведении патентного поиска использовались Web-сайты патентных ведомств стран поиска, а также патентный фонд Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ.

Просмотрено всего более 100 патентных документов, детально проанализировано 13 патентных документов. Изучено более 50 научно-технических документов, детально проанализирован 1 документ.

В результате проведенного исследования патентной ситуации по тематике «Устройство для вариативной и одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне установлено:

Известные патенты на лазеры (квантовые генераторы) терагерцового диапазона частот можно разбить на две группы:

1. патенты описывающие принципы работы элементов устройств. Таких как источники излучения, делители и формирователи пучка и импульсов излучения, способы детектирования;
2. патенты описывающие собственно устройства для исследования свойств сред в оптическом, терагерцовом или других диапазонах.
3. Наиболее близко к предложенному изобретению находятся устройства, использующие стандартный метод «накачка-зондирование» с делителем в виде тонкой пленки, что приводит к зависимости от длины волны и поляризации и влечет к необходимости перенастройки оптической схемы, то есть ведет к временным затратам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Hoffmann M.C., Hebling J., Hwang H.Y., Yeh Ka-Lo, and Nelson K.A. / Impact ionization in InSb probed by terahertz pump—terahertz probe spectroscopy // Physical Review (B) – 2009 – v.79, p. 161201(R).
- [2] Abramczyk Halina. / Introduction to Laser Spectroscopy. // Amsterdam: Elsevier – 2005 – Ch.8, p.175-217.
- [3] E. Malic, A. Knorr. / Graphene and carbon nanotubes. Ultrafast relaxation dynamics and optics. // Издательство WCH Verlag GmbH and Co, KGaA – 2013 – с. 51-58, (прототип).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель ПНИ, д.ф.-м.н.,
профессор

_____/ В.Н. Шастин/
" 31 " августа 2016 г.

ЗАДАНИЕ на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы): «УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВАРИАТИВНОЙ ОДНОЦВЕТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ «НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ» В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

»

Шифр работы № 14.616.21.0008

Этап работы 5, сроки выполнения: 01.09.2016 – 14.09.2016

Задачи патентных исследований: исследование уровня техники с целью подготовки и подачи заявки для патентования изобретения и выявления возможных препятствий для патентования.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. (начало, окончание).	Отчетные документы
1	2	3	3	4
I – поиск патентной информации; II – анализ отобранных патентных документов; III - составление отчета о патентных исследованиях.	1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) 2) Государственное бюджетное учреждение до-	1) Жукавин Р.Х. 2) Покровская Т.Н.	01.09.2016 – 14.09.2016	Отчет о патентных исследованиях Рефераты к патентам

	полнительного профессионально- го образования «Нижегородский научно- информационный центр»			
--	--	--	--	--

Снс отдела 110 ИФМ РАН _____ Жукавин Р.Х. _____
 личная подпись дата

Главный специалист ГБУ ДПО ННИЦ _____ Покровская Т.Н. _____
 личная подпись дата

ПРИЛОЖЕНИЕ № Б

РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА

31 августа 2016г.

дата составления регламента

Наименование работы (темы): УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВАРИАТИВНОЙ ОДНОЦВЕТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ «НАКАЧКА-ЗОНДИРОВАНИЕ»
В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Шифр работы (темы): 14.616.21.0008

Номер и дата утверждения задания: 31 августа 2016 г.

Цель поиска информации: Исследование уровня техники для определения возможности патентования

Обоснование регламента поиска: патентный поиск проводится с использованием полнотекстовой базы данных «Патентные документы РФ» ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» (ФИПС) и Базы Европейского патентного ведомства espacenet.com, патентно-информационной базы данных United States Patent and Trademark Office (USPTO) по классам международной патентной классификации изобретений (МПК), а также с использованием источников информации, указанных в таблице. Ретроспектива поиска – 20 лет. Глубина поиска в 20 лет определена исходя из максимального срока действия патентов.

Начало поиска 01.09.2016 г.

окончание поиска 14.09.2016г.

Предмет поиска (объект исследования, его составные части).	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск						Ретро-спективность	Наименование информационной базы (фонда)	
		Патентные		НТИ		конъюнк-турные	другие			
		Наименование	Классификационные рубрики: МПК (МКИ), МКПО, НКИ и др.	Наименование	Рубрики УДК и другие	Наименование Код товара: ГС, СМТК, БТН	Наименование Классификацион-ные индексы			
1	2	3	4	5	6			7	8	
Устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне; перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения;	Россия, страны Европы-ского Сообщества, США	WEB-сайты Патентных Ведомств стран поиска	Действующая версия МПК-2016.01: G02B5/18; G02B17/00; G02B26/00; G02B26/04; G02B26/06; G02B26/08; G02B26/10; G02B27/10; G02B27/12; G02B27/14; G02B27/16; G02B27/18; G02B27/40; G02B27/42;	Российские журналы: «ЖЭТФ», «ЖТФ», «Письма в ЖТФ», «Письма в ЖЭТФ»; международные: «Physical Review», «Physical Review Letters», «Journal of Applied Physics», «Applied	535.8; 535.421; 53.06, 53.08, 608.3				20 лет	Полнотекстовая база данных «Патентные документы РФ» ФГБУ ФИПС. База Европейского патентного ведомства ESP@CENET. Патентно-информационная база данных United States Patent and Trademark Office USPTO.

пропускающая дифракционная решетка; прерыватель светового потока; система плоских зеркал, оптическая линия задержки светового пучка; фокусирующий объектив, диафрагма; детектор излучения.			G02B27/44; G02B27/48; G02F1/00; G02F1/29 НКИ США: <u>250/338.1</u> , <u>250/341.8</u> , <u>324/639</u> , <u>359/331</u> , <u>850/6</u> , <u>356/502</u> , <u>356/432</u> , <u>356/480</u> , <u>356/454</u>	Physics Letters», «Journal of Electronic Materials»						
--	--	--	---	---	--	--	--	--	--	--

Руководитель ПНИ,
д.ф.-м.н, проф
Руководитель подразделения -
исполнителя работы
д.ф.-м.н, проф

_____ Шастин В.Н.

_____ Гавриленко В.И.

Главный специалист ГБУ ДПО НИИЦ

_____ Покровская Т.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

В.1 Поиск проведен в соответствии с Заданием, утвержденным директор Института физики микроструктур РАН, профессором З.Ф. Красильником от 31.08.2016 и Регламентом поиска от 31.08.2016 г.

В.2 Этап работы третий

В.3 Начало поиска 01.09.2016 г. Окончание поиска 14.09.2016 г.

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска: поиск проведен в полном соответствии с Регламентом.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.6. Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна Номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет, дата публикации	Название изобретения, полезной модели	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования (только для анализа патентной чистоты)
1	2	3	4	5
Устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диа-	РФ, патент на изобретение № 2117322 G02B27/48	Научно-исследовательский институт лазерной физики Всероссийского научного центра "ГОИ им.С.И.Вавилова" РФ, заявка № 96102299/28 Дата подачи заявки 07.02.1996 Дата публикации 10.08.1998	УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ	

пазоне; перестраиваемый по частоте источник монохроматического излучения; пропускающая дифракционная решетка; прерыватель светового потока; система плоских зеркал, оптическая линия задержки светового пучка; фокусирующий объектив, диафрагма; детектор излучения.	РФ, патент на изобретение № 2523735 G02B17/08 G01J3/44 G01N21/65	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) РФ, заявка № 2012132799/28 Дата подачи заявки 31.07.2012 Дата публикации 20.07.2014	МНОГОХОДОВАЯ ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА И СПОСОБ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ МНОГОКРАТНОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ	
	РФ, патент на изобретение № 2532649 G02B27/16 H01S3/23 B23K26/067	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" РФ, заявка № 2012158372/28 Дата подачи заявки 29.12.2012 Дата публикации 10.11.2014	ПАНКРАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА	
	РФ, патент на изобретение № 2411620 H01S3/10 G02B26/02	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) РФ, заявка № 2009130867/28 Дата подачи заявки 13.08.2009 Дата публикации 10.02.2011	МОДУЛЯТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	

	<p>РФ, патент на изобретение № 2477914 H01S3/10 G02B26/02</p>	<p>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов" (РУДН) РФ, заявка № 2011111100/28 Дата подачи заявки 24.03.2011 Дата публикации 20.03.2013</p>	<p>МОДУЛЯТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</p>	
	<p>РФ, патент на изобретение № 2517823 G02F1/00 G02B26/00</p>	<p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" РФ, заявка № 2012132383/28 Дата подачи заявки 27.07.2012 Дата публикации 27.05.2014</p>	<p>УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</p>	
	<p>РФ, патент на изобретение № 2539678 G02F1/00 H01S3/094</p>	<p>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук РФ, заявка № 2013117078/28 Дата подачи заявки 16.04.2013 Дата публикации 20.01.2015</p>	<p>СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ</p>	

	<p>РФ, патент на изобретение № 2545336 G02F1/01 G02F1/35 G02B26/00</p>	<p>федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана" РФ, заявка № 2013153125/28 Дата подачи заявки 29.11.2013 Дата публикации 27.03.2015</p>	<p>УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</p>	
	<p>РФ, заявка на изобретение № 2004138689 G02B27/10</p>	<p>Милованов Николай Сергеевич Дата подачи заявки 29.12.2004 Дата публикации заявки 10.06.2006</p>	<p>СПОСОБ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ</p>	
	<p>Патент на изобретение EP 2157420A1 <u>G01N21/35</u></p>	<p><u>ETH Zurich</u> Заявка № EP20080014882 Дата подачи заявки 22 авг 2008 Дата публикации заявки 24 фев 2010</p>	<p>Apparatus and method for investigating a sample using an electro-optic THz-transceiver with the reflected pump beam being used as the probe beam</p>	
	<p>Германия, патент на изобретение DE 102008026484 A1 <u>G02B26/06</u></p>	<p><u>Skz - Kfe Ggmbh Kunststoff-Forschung Und - Entwicklung</u> Германия, заявка № DE200810026484 Дата подачи заявки 3 июн 2008 Дата публикации заявки 10 дек 2009</p>	<p>A method for generating two optical pulses with variable, temporal pulse interval</p>	

Международная заявка на изобретение WO 2007121598 A1 <u>G01N21/35, H01S1/02</u>	<u>Eth Zurich</u> Заявка № PCT/CH2007/000184 Дата подачи заявки 18 апр 2007 Дата приоритета 21 апр 2006 Дата публикации заявки 1 ноя 2007	Broadband terahertz radiation generation and detection system and method	
США, патент на изобретение № US 6844552 B2 <u>G01N21/35, G01J11/00, G01N21/17</u>	<u>Rensselaer Polytechnic Institute</u> США, заявка № US 09/826,458 Дата подачи заявки 5 апр 2001 Дата приоритета 6 апр 2000 Дата публикации заявки 18 янв 2005	Terahertz transceivers and methods for emission and detection of terahertz pulses using such transceivers	
США, патент на изобретение № US8982451 B2 <u>G01Q60/12, G01N21/17, G01N21/55, B82Y35/00</u>	<u>Japan Science And Technology Agency</u> США, заявка № US 14/236,771 Номер PCT PCT/JP2012/069517 Дата подачи заявки 31 июл 2012 Дата приоритета 2 авг 2011 Дата публикации заявки 17 мар 2015	Pump probe measuring device	
Международная заявка на изобретение № WO2001065238 A1 <u>G01N21/63, G01N21/35</u>	<u>Teraview Limited</u> PCT/GB2001/000859 Дата подачи заявки 28 фев 2001 Дата приоритета 28 фев 2000 Дата публикации заявки 7 сен 2001	An apparatus and method for investigating a sample	
Международная заявка на изобретение № WO2009146671 A1 <u>H01S1/00, G01N21/63, G01N21/35</u>	<u>Skz - Kfe Ggmbh Kunststoff-Forschung Und-Entwicklung</u> PCT/DE2009/000662 Дата подачи заявки 14 май 2009 Дата приоритета 3 июн 2008 Дата публикации заявки 10 дек 2009	Thz pump-probe spectroscopy with a delay which can be set by the repetition rate	

	США, патент на изобретение № US5734470 А <u>G01N21/17</u> , <u>G01L1/00</u> , <u>G01N21/63</u> , <u>G01N21/64</u> , <u>G01N21/27</u>	<u>Massachusetts Institute Of Technology</u> США, заявка № US 08/844,850 Дата подачи заявки 22 апр 1997 Дата приоритета 24 янв 1995 Дата публикации заявки 31 мар 1998	Device and method for time-resolved optical measurements	
	Международная заявка на изобретение № WO1999013318 А1 <u>G01N21/17</u>	<u>Brown University Research Foundation</u> PCT/US1998/014180 Дата подачи заявки 13 июл 1998 Дата приоритета 5 сен 1997 Дата публикации заявки 18 мар 1999	Optical method for the characterization of the electrical properties of semi-conductors and insulating films	
	США, заявка на изобретение № US20150268200 А1 <u>G01N29/44</u> , <u>G01N29/30</u> , <u>G01N29/24</u>	<u>National Taiwan University</u> США, заявка № US 14/729,832 Дата подачи заявки 3 июн 2015 Дата приоритета 31 июл 2012 Дата публикации заявки 24 сен 2015	Noninvasive measuring method for probing an interface	
	США, патент на изобретение № US8400639 В2 <u>G01B9/02</u> , <u>G01J3/45</u>	<u>President And Fellows Of Harvard College</u> США, заявка № US 12/441,159 PCT/US2007/078586 Дата подачи заявки 15 сен 2007 Дата приоритета 15 сен 2006 Дата публикации заявки 19 мар 2013	Methods and devices for measurements using pump-probe spectroscopy in high-Q microcavities	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РЕФЕРАТЫ К ПАТЕНТАМ, ОТОБРАННЫМ В ПРОЦЕССЕ ПОИСКА

1) Патент на изобретение №2117322

Устройство для формирования световых пучков может быть использовано в оптическом приборостроении и лазерной технике. Устройство содержит источник когерентного оптического излучения и вогнутое главное зеркало, устройство обращения волнового фронта со светоделителем на входе и две вспомогательные оптические системы, обеспечивающие самопроецирование главного зеркала самого на себя. Главное зеркало и элементы обеих вспомогательных систем расположены соосно. Светоделитель выполнен в виде полупрозрачного зеркала, нанесенного на поверхность линзового элемента одной из вспомогательных систем. Первая вспомогательная система может быть выполнена в виде вогнутого зеркала, линзового компонента и мениска, обращенного выпуклой поверхностью к главному зеркалу. Вторая вспомогательная оптическая система может быть выполнена в виде полупрозрачного зеркала, нанесенного на выпуклую поверхность мениска.

2) Патент на изобретение 2523735

Система может быть использована при исследовании свойств газовых сред, в том числе, с химическими реакциями, в малых объемах, методами спектроскопии рассеяния или поглощения света. Система включает способные перемещаться в направлении к точке фокуса сборки оптических элементов, каждая из которых содержит два плоских поворотных зеркала в юстировочной головке, обеспечивающей независимый наклон каждого зеркала в двух направлениях, и линзу между ними, установленную на двойном фокусном расстоянии по ходу пучка от измерительного объема. Сборки обеспечивают фокусировку отраженного пучка в той же точке. Одна сборка, содержащая линзу и плоское зеркало или только вогнутое зеркало, направляет лазерный пучок так, что он проходит весь свой путь в обратном направлении, при этом число проходов равно от 4 и более в зависимости от числа установленных сборок оптических элементов. Технический результат - повышение интенсивности полезного сигнала и уменьшение оптических искажений лазерного пучка за счет многократного прохождения лазерного пучка через измерительный объем.

3) Патент на изобретение 2532649

Изобретение может быть использовано при создании мощных лазерных систем для фокусировки излучения на удаленные мишени. Система включает первый объектив, первый и второй линзовые компоненты которого установлены с возможностью перемещения вдоль оптической оси объектива. Третий линзовый компонент установлен неподвижно. Система включает дополнительный лазер и, по меньшей мере, один дополнительный, идентичный первому, объектив, расположенные таким образом, что оптические оси лазера и всех объективов пересекаются в одной точке. Рас-

стояния от оптической оси лазера до оптических осей объективов одинаковы. Каждый объектив дополнительно включает плоскопараллельную пластину, установленную перед первым компонентом с возможностью поворота вокруг оси, перпендикулярной меридиональной плоскости системы. Все оптические компоненты объективов выполнены из кварцевого стекла. Плоскопараллельные пластины, первые и вторые компоненты объективов кинематически синхронизированы друг с другом. Технический результат - повышение точности настройки параметров лазерного излучения на мишени при одновременном увеличении передаваемой мощности излучения, повышение надежности и расширение его технологических возможностей.

4) Патент на изобретение 2411620

Модулятор содержит платформу на оси поворота с закрепленной на платформе подложкой, на поверхности которой сформирована рельефная дифракционная решетка с прямоугольным профилем. Глубина рельефа дифракционной решетки превышает четверть длины волны модулируемого лазерного излучения. Поверх дифракционной решетки нанесено зеркальное отражающее покрытие. Платформа опирается на электромеханический вибратор, установленный на расстоянии

$L = \frac{\Delta x}{\Delta \Theta}$ от оси поворота платформы, где Δx - амплитуда смещения электромеханического вибратора, а $\Delta \Theta$ - амплитуда угловых колебаний платформы с решеткой. Между электромеханическим вибратором и осью поворота установлена возвратная пружина, на выходе отраженного пучка лазерного излучения установлен пространственный фильтр в нулевом порядке дифракции. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей модулятора.

5) Патент на изобретение 2477914

Изобретение относится к оптоэлектронике и приборостроению. Заявленный модулятор лазерного излучения содержит лазер, рельефную дифракционную решетку с прямоугольным профилем, зеркально отражающую пучок модулируемого лазерного излучения, глубина которой превышает четверть длины волны модулируемого лазерного излучения, и платформу, связанную с электромеханическим вибратором, установленным на неподвижном основании. Причем рельефная дифракционная решетка выполнена из пластин, сформированных в стационарные группы и группы подвижных пластин с возможностью их возвратно-поступательного движения, размещенных в промежутках пластин стационарной группы, торцы которых смещены относительно торцов стационарной группы в направлении, перпендикулярном к поверхностям, обращенным к лазеру. Стационарная группа связана с основанием посредством прецизионного регулировочного механизма, а группа подвижных пластин установлена на платформе, связанной упругим подвесом с основанием и электромеханическим вибратором. Причем торцы пластин, обращенных к лазерному пучку,

имеют плоскую поверхность, зеркально отражающую лазерное излучение. Технический результат - повышение точности позиционирования лазерного пучка.

6) Патент на изобретение 2517823

Изобретение относится к оптической технике. Устройство для модуляции монохроматического оптического излучения содержит оптически прозрачную среду, в которой установлены разделитель монохроматического оптического излучения на первый и второй каналы распространения, отражающий элемент во втором канале, участок когерентного суммирования для формирования модулированного монохроматического оптического излучения. В качестве разделителя монохроматического оптического излучения на первый и второй каналы использован делительный куб, состоящий из двух одинаковых треугольных призм, совмещенных своими большими гранями. Первый канал снабжен своим отражающим элементом. Каждый отражающий элемент нанесен на соответствующую грань делительного куба по ходу монохроматического оптического излучения в первом и втором каналах. Делительный куб установлен с возможностью возвратно-поступательного перемещения вне плоскости сопряжения призм делительного куба, а угол α между вектором скорости возвратно-поступательного движения и плоскостью сопряжения призм делительного куба выбран из соотношения

$$v = \frac{f_m \lambda_0}{\sqrt{2} \cos(\alpha)}$$

где f_m - необходимая частота модуляции монохроматического оптического излучения, λ_0 - длина волны монохроматического оптического излучения на входе в делительный куб, v - скорость движения делительного куба. Технический результат: устойчивость к вибрациям и толчкам, работоспособность во всех пространственных ориентациях.

7) Патент на изобретение 2539678

Изобретение относится к оптоэлектронике. Способ генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне заключается во взаимодействии направленного возбуждающего излучения с активной средой образца и получении вторичного электромагнитного излучения. В качестве активной среды образца используют материал со свойствами топологического изолятора, при этом возбуждение осуществляют импульсным излучением с длительностью возбуждающих импульсов $\tau = 10^{-12} - 10^{-14}$ с, энергией в импульсе $E_{\text{имп}} = 10^{-5} - 10^{-2}$ Дж и длиной волны $\lambda_{\text{возб}} = 350 - 5000$ нм, причем возбуждающее излучение направляют на плоскость образца с активной средой под уг-

лом $\alpha \neq 90^\circ$. В качестве активной среды может быть использована тонкая пленка или кристалл селенида висмута (Bi_2Se_3) или теллурида висмута (Bi_2Te_3). В качестве детектирующего элемента может быть использован теллурид цинка (ZnTe). Технический результат заключается в обеспечении возможности контроля и управления параметрами генерации при возбуждении материалов, обладающих свойствами топологического изолятора.

8) Патент на изобретение 2545336

Изобретение относится к области оптики и касается устройства управления параметрами лазерного излучения. Устройство включает в себя источник лазерного излучения, поляризатор, вращающийся оптический элемент и цепь обратной связи. Цепь обратной связи состоит из светоделительной пластины, дополнительного поляризатора, фотодетектора, усилителя, блока управления скоростью вращения оптического элемента и поворотного блока, на котором установлен датчик угла поворота плоскости поляризации. Технический результат заключается в обеспечении возможности управления степенью и углом поворота поляризации.

9) Заявка на изобретение 2004138689

Изобретение относится к области оптики и касается способа увеличения концентрации лучистых потоков, содержащий операции улавливания потока, его накопление и испускание, отличающийся тем, что для достижения технического результата перед операцией испускания вводится операция сжатия лучистого потока по направлению его распространения. Устройство для осуществления описанного способа концентрирования лучистого потока, содержащее источник монохроматического когерентного излучения, делитель лучистого потока для разделения потока на два луча, на пути одного из которых установлено устройство задержки, а на пути второго поворотная зеркальная система с фазовращающей пластинкой, ячейки Керра на пути обоих лучей и вторая поворотная зеркальная система с фазовращающей пластинкой перед делителем лучистого потока, отличающееся тем, что во вторую поворотную зеркальную систему введена еще одна ячейка Керра с фазовращающей пластинкой, а на пути выходящего луча установлено аналогичное первому второе устройство, оптический путь которого в n_1 раз более короткий, с дополнительной поворотной зеркальной системой и фазовращающей пластинкой.

10) Патент на изобретение EP2157420 A1

The invention relates to an apparatus and a method for investigating a sample by means of THz radiation. The same optical non-linear member is used as an active part of the emitter and as an active part of the detector. The optical non-linear member is irradiated with a pulsed optical beam under conditions that allow THz generation. The THz beam is split off the optical beam, directed onto the sample, and reflected back onto the non-linear member. The optical beam is also, after recombination with the THz beam, reflected back onto the non-linear member. According to the invention, optical properties of the reflected

optical beam, which are influenced by the co-propagating THz beam, are measured and evaluated. The reflected optical beam thus acts as probe beam. The invention has the advantage that more intensity is available for each of the processes THz generation and THz detection, as pump beam and probe beam are generally the same.

11) Патент на изобретение DE 102008026484 A1

The invention relates to a method for generating two delayed pulses, particularly in the terahertz-spectroscopy and / or in pump-probe experiments, comprising the following steps: - Generating a pulsed beam using a radiation source, in particular a pulsed laser; - Parts of the pulsed beam, wherein the first sub-beam comprises a first pulse and the second partial beam a second pulse; - Directing the two pulses to a particular target area, the first pulse leads directly to a first target area and the second pulse after traveling a delay line enters a second target area and can the two target areas coincide; - Use of the two pulses, in particular for a measuring method, whereby the time delay of the two pulses in the respective target area is set via the pulse repetition rate of the pulsed beam.

12) Международная заявка на изобретение WO2007121598A1

The invention relates to a broadband Terahertz (THz) radiation generation and detection System and method. THz radiation is generated by optical rectification of an ultrashort pump pulse of a first wavelength having a duration in the picosecond- or sub-picosecond range in a first nonlinear optical crystal. The THz radiation is detected by electro-optic sampling or another appropriate method of a probe beam having a second wavelength in a second nonlinear optical crystal. According to the invention, at least one of the following conditions is fulfilled: a) the first wavelength is different from the second wavelength; b) the material of the first nonlinear optical crystal is different from the material of the second nonlinear optical crystal. This makes it possible to chose for the generation and for the detection process - independent of one another - the combination of wavelengths and nonlinear material and possibly other features of the pump/probe pulses like polarization with the highest efficiency for generation and detection of Terahertz pulses, respectively. In a preferred embodiment, lasers emitting in the infrared range are used to generate THz radiation in DAST crystals, and the frequency doubled beam is used to coherently detect the THz radiation in a Standard material like ZnTe. This makes it possible to provide efficient, stable, compact and cost effective THz Systems.

13) Патент на изобретение US 6844552 B2

A tracking system includes a call handler and a database containing information relating to items to be tracked. The database contains customer identification criteria that guide the call handler to determine whether to track a tracked item for a customer. Communication nodes communicate with the customer, send a signal to a tracking device, receive a signal from the tracking device, and involve a law enforcement official in the communicating with the customer when appropriate.

14) Патент на изобретение US 8982451 B2

A pump probe measuring device (1) comprises: an ultrashort optical pulse laser generator (2) for generating a first ultrashort optical pulse train which is a pump light (3 a), second and third ultrashort optical pulse trains (3 b), (3 c) which are probe lights; an optical shutter unit (6) to which the second and the third ultrashort pulse trains (3 b), (3 c) are introduced; and a detecting unit (20) including an irradiation optical system (8) for directing the pump light (3 a), the first probe light (3 b) and the second probe light (3 c) to a sample (7), a sensor (11) for detecting a probe signal from the sample (7), and a phase-sensitive detecting means (12) connected to the sensor (11). An optical shutter control unit (10) periodically modulates the delay time of the first probe light (3 b) and that of the second probe light (3 c) with respect to the pump light (3 a), and the modulated first and second probe lights (3 a), (3 b) illuminate the sample (7) alternately to detect the probe signals from the sample (7) by the phase-sensitive detecting means (12) in synchronization with the periodic modulation signal of the delay time.

15) Международная заявка на изобретение WO 2001065238 A1

An apparatus and method for investigating a sample, the apparatus comprising: means (61) for irradiating the sample (21) with a first beam of electromagnetic radiation configured to excite an optically non-linear process within the sample; means (61) for irradiating the sample with a second beam of electromagnetic radiation; and a detector (41) for detecting a change the second beam after it has been reflected from or transmitted through the sample. If the optically non-linear process is a second order process, the detector could be used to detect a change in the polarisation of the second beam. Apparatus and method find application of samples with terahertz (THZ) radiation locally generated and detected within the sample.

16) Международная заявка на изобретение WO 2009146671 A1

The invention relates to a method for generating two delayed pulses, in particular in terahertz spectroscopy and/or in pump-probe experiments, with the following method steps: - generating a pulsed beam using a beam source (1), in particular a pulsed laser; - dividing the pulsed beam (2), wherein the first partial beam (4) comprises a first pulse and the second partial beam (5) comprises a second pulse; - directing the two pulses onto a respective target area (9, 10), wherein the first pulse directly reaches a first target area (9) and the second pulse reaches a second target area (10) after passing through a delay path, and wherein the two target areas can be coincident; - using the two pulses, particularly for a measurement method; wherein the time delay of the two pulses in the respective target area can be set by the pulse repetition rate of the pulsed beam (2).

17) Патент на изобретение US 5734470

An optical modulating system which allows modulation of a single light beam with a spatially filtering mask to form a spatially periodic, time-dependent excitation field. Once generated, the field can be used to induce a transient grating in a sample. The optical modulating system is additionally confi-

gured to automatically orient a probe beam at the Bragg angle, thereby allowing the intensity of the probe beam diffracted off the induced grating to be maximized. Measurement of the diffracted probe beam allows, for example, determination of mechanical, thermal, electrical, and optical properties of the sample.

18) Международная заявка на изобретение WO 1999013318 A1

A method for characterizing a sample (30) includes the steps of (a) providing a semiconductor material; (b) applying at least one of an electric field, a pulsed or cw light source (12), a change in temperature and/or a change in pump pulse intensity to the semiconductor material; (c) absorbing pump light pulses in a portion of the semiconductor material and measuring changes in optical constants as indicated by probe light pulses (14) applied at some time t following the absorption of the pump light pulses; and (e) associating a measured change in the optical constants with at least one of a surface charge, dopant concentration, trap density, or minority carrier lifetime.

19) Заявка на изобретение US 20150268200 A1

The present disclosure provides solutions to probing an interface. With a noninvasive measuring device provided in one embodiment of the disclosure, an acoustic wave whose frequency is higher than approximately 300 GHz is generated to propagate in a buffering film. With measuring the reflection from the interface of an object to be measured interfacing with the buffering film, it is possible in one embodiment of the disclosure that at least one physical property of the interface may be analyzed, preferably with approximately 0.3 nm resolution.

20) Патент на изобретение US 8400639 B2

The use of optical microcavities, high-Q resonators and slow-light structures as tools for detecting molecules and probing conformations and measuring polarizability and anisotropy of molecules and molecular assemblies using a pump-probe approach is described. Resonances are excited simultaneously or sequentially with pump and probe beams coupled to the same microcavity, so that a pump beam wavelength can be chosen to interact with molecules adsorbed to the microcavity surface, whereas a probe beam wavelength can be chosen to non-invasively measure pump-induced perturbations. The induced perturbations are manifest due to changes of resonance conditions and measured from changes in transfer characteristics or from changes of the scattering spectra of a microcavity-waveguide system. The perturbations induced by the pump beam may be due to polarizability changes, changes in molecular conformation, breakage or formation of chemical bonds, triggering of excited states, and formation of new chemical species.

7. Аннотационный отчет иностранного партнера

7.1 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 доноров мышьяка. С помощью Фурье спектрометра будет измерен спектр поглощения на внутрицентровых переходах с основного состояния центра (серия Лаймана) в зависимости от интенсивности излучения ЛСЭ.

Экспериментальное исследование влияния сильного поля на локализованные состояния доноров мышьяка в кремнии проведены на ранее построенной и протестированной установке на базе ЛСЭ FELBE (HZDR): образцы Si:As помещались в специальный медный держатель, прикрепленный к охлаждаемому пальцу проточного криостата Janis ST-100-RTIR. Образец охлаждался приблизительно до 6 К. Излучение ЛСЭ FELBE имело резонансную длину волны, соответствующую либо резонансу между основным состоянием и возбужденным, либо нерезонансную, соответствующую переходу в энергетический диапазон между состояниями $2p_0$ и $3p_0$. Излучение накачки выходило через переднее алмазное окно криостата. Излучение из образца регистрировалась в ортогональном направлении через специальные волноводные холодные сапфировые (Al_2O_3) и теплые полиэтиленовые (HDPE) окна. Детектирование излучения происходило с помощью Ge:Ga фотодетектора, охлаждаемого жидким гелием. Спектр излучения измерялся с помощью интерферометра Michelson Grubb Parson.

Для исследования влияния сильного поля на локализованные состояния доноров мышьяка легированные образцы были изготовлены в форме параллелепипеда и отполированы для уменьшения рассеяния излучения ЛСЭ и обеспечения высокой добротности резонатора.

При таких условиях влияние поля излучения лазера на свободных электронах на связанные состояния доноров не приводит к сдвигу линии стимулированного излучения на внутрицентровых переходах донора мышьяка. Одна из возможных причин этого – слишком маленький выходной сигнал при максимуме плотности фотонов доступной на ЛСЭ «FELBE».

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

Рамановская спектроскопия состояний доноров мышьяка в кремнии была проведена на пользовательской станции на базе ЛСЭ FELBE в Центре Гельмгольца (HZDR). Было детектировано рамановское резонансное стимулированное излучение при возбуждении излучением лазера на свободных электронах донорных центров мышьяка в кремнии при низкой решеточной температуре и при плотности фотонов свыше $10^{25} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Излучение происходит, когда энергия фотонов накачки имеет значения в диапазоне, соответствующем переходам $1s(A_1)-2p_0$ и $1s(A_1)-3p_0$ в доноре мышьяка. Частота излучения сдвигается относительно частоты накачки на величину разницы между энергией основного состояния $1s(A_1)$ и состояния $1s(E)$, которое Рамановски активно. Таким образом, было детектировано стимулированное Стоксово излучение.

Спонтанное излучение Стокса не было детектировано, предположительно из-за малой величины и узкой направленности рассеянного излучения. Стимулированное Стоксово излучение наблюдалось в образцах с концентрацией доноров мышьяка $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При увеличении температуры выше 10 К стимулированное Рамановское излучение пропадает. Относительно низкий порог стимулированного излучения в окрестности переходов в состояния $2p_0$ и $2p_{\pm}$ объясняется электронным участием: волновая функция электрона имеет «хвост» в этом энергетическом диапазоне, который резонансно усиливает Рамановское стимулированное рассеяние. Измерено, что полоса Стоксового излучения 4,8 – 5,1 ЕГц и 5,9 – 6,5 ТГц (рисунок 42).

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

В течение октября и ноября 2016 г. было семь смен по 12 часов каждая на ЛСЭ, посвященных проекту «ТГц спектроскопия и ультрабыстрая электронная динамика в трехуровневой системе в широкой квантовой яме». Эти смены требовали всеобъемлющей подготовки, включая рост квантовых структур GaAs/AlGaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии, III-V процессинг в чистых комнатах в институте HZDR и предварительная характеристика структур: Фурье спектроскопия в ИК диапазоне, фотолюминесценция, рентгеновская дифракция высокого разрешения, электрический транспорт и вольт-фарадные измерения. Эксперименты при возбуждении излучением ЛСЭ в ТГц диапазоне и широкополосном зондирующем импульсе были успешно проведены, используя измерительную станцию, которая была подготовлена на предыдущих этапах проекта.

Нелинейная ТГц спектроскопия дала большое количество высококачественных данных по III-V квантовым структурам. В настоящий момент проводится детальный анализ полученных данных.

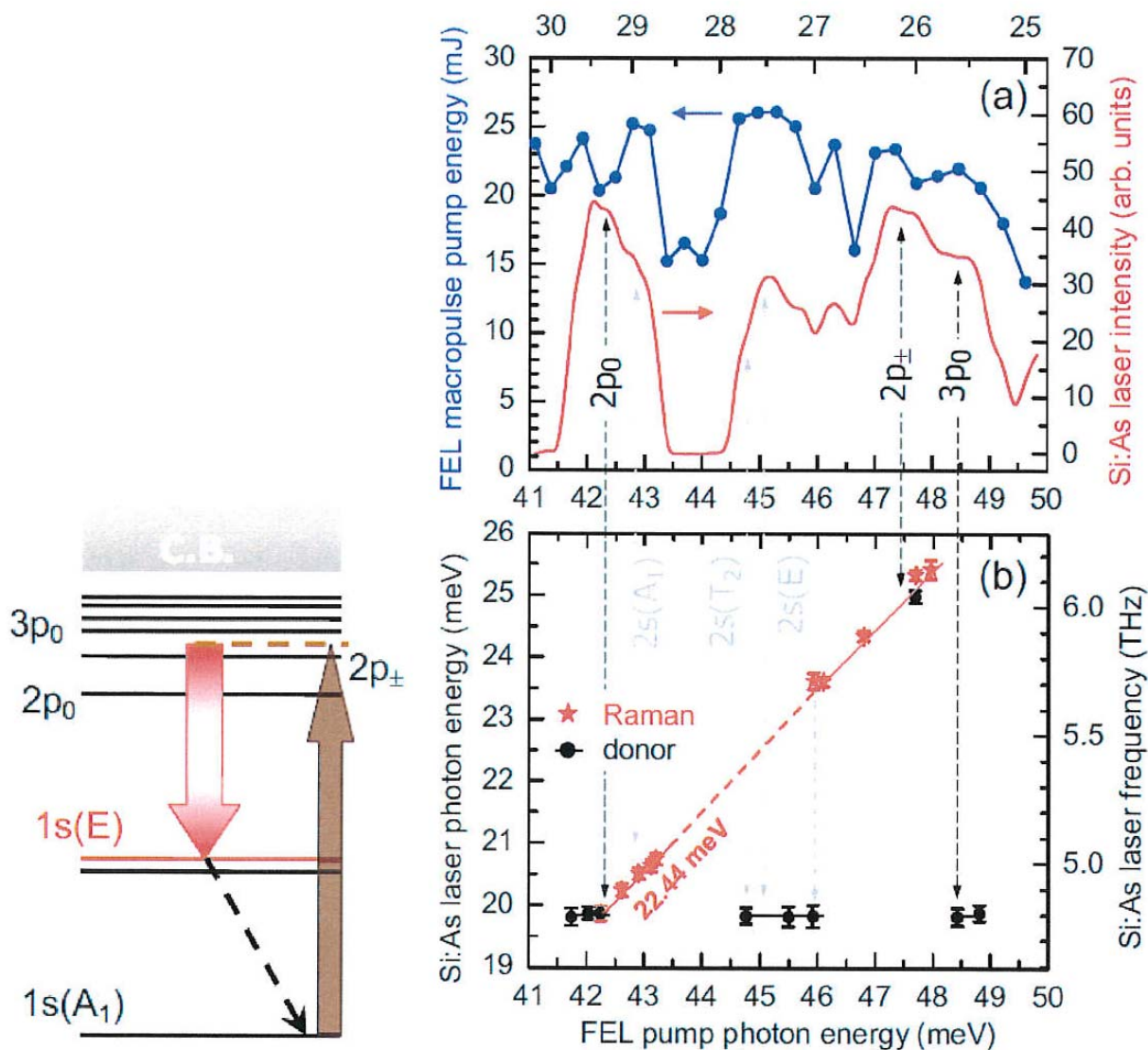


Рисунок 42 – (Слева) Схема Рамановского Стоксового лазерного механизма для Si:As. Символы C.B. обозначают зону проводимости. (Справа) Схема полосы частот, генерируемой оптически возбуждаемым Si:As. (a) – Спектр накачки (излучения ЛСЭ) при максимальной мощности сверхху (красным) и частотная зависимость интенсивности излучения ЛСЭ (фиолетовым). Провал между 43.5 и 44.5 мэВ связан с сильным поглощением парами воды. (b) Полоса частот работы Рамановского и обычного лазера на основе Si:As. Стоксов сдвиг при Рамановском излучении – 22.44 мэВ.

Немецкий координатор

проф. др. Н.-W. Hübers

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе пятого этапа по проекту Российскими участниками проекта выполнены следующие работы:

1. Выполнены измерения спектров пропускания образцов кремния и германия после нейтронного легирования донорами и акцепторами. В результате идентифицированы линии примесного поглощения, измерены ширины этих линий, дана оценка концентраций легирования. Показано, что качество образцов после нейтронного легирования соответствует требуемому.
2. Произведены измерения временной динамики релаксации состояний акцепторов галлия в одноосно-деформированном кристалле германия с использованием излучения Новосибирского ЛСЭ и оборудования ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения. Показано влияние деформации на релаксационные темпы состояний. Работы проведены на построенной в рамках настоящего проекта установке по измерению времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса.
3. Произведены измерения временной динамики релаксации состояний доноров сурьмы и мышьяка в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса с использованием излучения ЛСЭ FELBE в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорфе (HZDR).
4. Произведены расчеты скоростей релаксации возбужденных состояний доноров в кристаллах кремния и германия в зависимости от одноосной деформации сжатия. Рассчитанные зависимости объясняют эффекты, наблюдаемые в экспериментальных работах.
5. Проведены работы по спектроскопии насыщения на примесных переходах в кристалле германия с использованием излучения Новосибирского ЛСЭ и оборудования ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения. Полученные результаты дают дополнительную информацию о временах релаксации возбужденных состояний примесей.
6. Проведены патентные исследования и подана патентная заявка на изобретение по теме "Устройство для вариативной одноцветной спектроскопии «накачка-зондирование» в терагерцовом диапазоне".

Иностраным партнером:

7. Проведены работы по обнаружению и исследованию эффекта сильного поля, т.е. влияние излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) на локализованные состояния доноров мышьяка в кремнии с использованием лазера на свободных электронах в г. Дрезден. Измерение спектра показало, что частота стимулированного излучения на внутрицентровых переходах донора мышьяка в условиях проводимого эксперимента не претерпевает сдвига при увеличении мощности резонансного возбуждения излучением ЛСЭ.

8. Проведено исследование эффектов комбинационного рассеяния света на состояниях доноров мышьяка в кремнии (Рамановская спектроскопия).

9. Проведены работы по нелинейная терагерцовой спектроскопия экситонных состояний в структурах на основе полупроводников III-V групп с применением широкополосного пробного излучения. Работы включали в себя рост и подготовка структур GaAs/AlGaAs, их спектроскопию, измерение фотолюминесценции, проведение рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, измерений электротранспортных и вольт-фарадных характеристик структур.

Научная составляющая совместных с иностранным партнером работ направлена на исследование физики неравновесных состояний в легированных мелкими примесями полупроводниках кремния и германия, а так же структур на основе их. Важным аспектов этих работ является использование излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ), что позволяет проводить измерения релаксационной динамики неравновесных состояний методом пробного импульса, исследовать эффекты сильного поля, эффекты комбинационного рассеяния света на состояниях мелких примесных центров и пр. Вся совокупность совместных исследований нацелена на развитие источников стимулированного излучения на основе кремния в ТГц диапазоне, а так же детекторов электромагнитного излучения в инфракрасной и дальней инфракрасной области спектра.

Возможны различные механизмы генерации стимулированного излучения на внутрицентровых переходах донорных центров в кремнии: первый – это классический механизм, когда в силу специфики маршрутов и скоростей релаксационных процессов появляется инверсия населенностей на рабочем переходе при возбуждении среды, второй – это Рамановский механизм, в котором энергия генерируемых фотонов зависит от энергии кванта возбуждения. Исследованием различных физических эффектов, связанных с первым механизмом генерации, это, главным образом, исследование влияния различных факторов на темпы релаксации состояний доноров, относится большей частью к Российской части совместных научных исследований, исследование Рамановских эффектов (эффекты комбинационного рассеяния) – главным образом немецкой, включая изучение влияния сильного поля накачки на состояния примесей. Немецкий коллектив проводит такие работы с использованием ЛСЭ FELBE в центре Гельмгольца в Дрездене-Россендорфе (HZDR). Кроме того немецкими участниками совместного проекта отчасти проводится Рост и легирование исследуемых образцов кремния и германия в Институте роста кристаллов Берлина (IKZ, Berlin).

Российскими участниками с использованием излучения ЛСЭ поведятся измерения релаксационной динамики методом пробного импульса (соответствует работам 2 и 5 пятого этапа). Измерения динамики в кремнии проводится с использованием ЛСЭ FELBE в центре Гельмгольца, исследования в кристалле германия проводятся на построенной в рамках настоящего проекта установке на базе Новосибирского ЛСЭ. Прямые измерения времени релаксации состояний доноров в деформированном кремнии методом пробного импульса проводятся впервые. Впервые с исполь-

зованием ЛСЭ FELBE показано влияние деформации на скорость релаксации возбужденных состояний мелких доноров в кремнии. До этого это влияние демонстрировалось косвенно через улучшение пороговых характеристик и увеличение интенсивности стимулированного излучения на внутрицентровых переходах доноров при оптическом возбуждении. Полученные результаты будут опубликованы в рейтинговых научных изданиях. Построение установок по измерению времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса в Новосибирске, а так же станций по Рамановской и нелинейной спектроскопии в Дрездене-Россендорф определяет прикладную составляющую настоящего международного проекта. Установка на базе Новосибирского ЛСЭ является единственной в России, при ее построении был использован опыт иностранного партнера построения подобной установок в центре Гельмгольца на базе ЛСЭ FELBE.

Работы Российского коллектива и иностранного партнера дополняют друг друга в плане исследования неравновесных состояний мелких примесных центров в кристаллах кремния и германия.

Задачи пятого 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Marcus D Hanwell, Donald E Curtis, David C Lonie, Tim Vandermeersch, Eva Zurek and Geoffrey R Hutchison "Avogadro: An advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform» // *Journal of Cheminformatics*, V.4, P. 17 (2012)
2. M.W.Schmidt, K.K.Baldrige, J.A.Boatz, S.T.Elbert, M.S.Gordon, J.H.Jensen, S.Koseki, N.Matsunaga, K.A.Nguyen, S.Su, T.L.Windus, M.Dupuis, J.A.Montgomery "General Atomic and Molecular Electronic Structure System» // *J. Comput. Chem.*, 14, 1347-1363 (1993).
3. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. «Generalized Gradient Approximation Made Simple» // *Phys. Rev. Lett.*, V. 77., P. 3865–3868 (1996)
4. Castro, Alberto; Heiko Appel; Micael Oliveira; Carlo A. Rozzi; Xavier Andrade; Florian Lorenzen; M. A. L. Marques; E. K. U. Gross; Angel Rubio "octopus: a tool for the application of time-dependent density functional theory" // *Physica status solidi (b)*, 243 (11), P. 2465 (2006)
5. Kohn W., Sham L.J. «Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects» // *Phys. Rev.*, V. 140., P. A1133–A1138 (1965)
6. Delerue C., Lannoo M. «Nanostructures: Theory & modeling» // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 304 p., ISBN 81-8128-200-0 (2004)
7. Belyakov V.A., Burdov V.A. «Valley-orbit splitting in doped nanocrystalline silicon: k·p calculations» // *Phys. Rev. B.*, V. 76, P. 045335-1–045335-12 (2007)
8. Walter J.P., Cohen M.L. «Wave-Vector-Dependent Dielectric Function for Si, Ge, GaAs, and ZnSe» // *Phys. Rev. B.* V. 2, P. 1821–1826 (1970)

Приложение А

Акт и протокол измерения спектров пропускания образцов кремния и германия после нейтронного легирования донорами и акцепторами для уточнения спектра электронных состояний

ПРОТОКОЛ
ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

№1 19.11.2016

1. Объект: Образцы кремния и германия после нейтронного легирования.

1 – Образец кремния, легированный фосфором до концентрации $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$

2 – Образец германия, легированный галлием до концентрации $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$

3 – Образец германия, легированный галлием до концентрации $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$

2. Цель: Измерение спектров пропускания для уточнения спектра электронных состояний

3. Дата начала испытания: 04.11.2016

4. Дата окончания испытания: 19.11.2016

5. Место проведения испытания

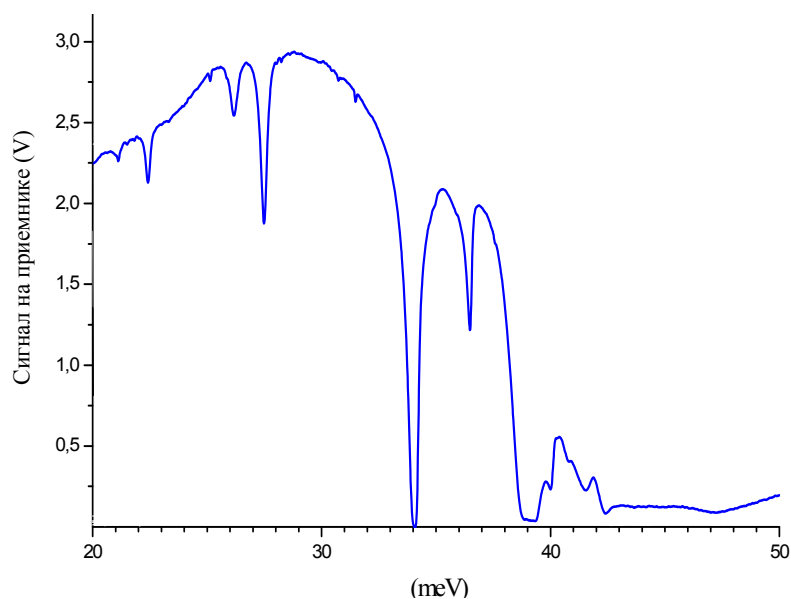
ИФМ РАН

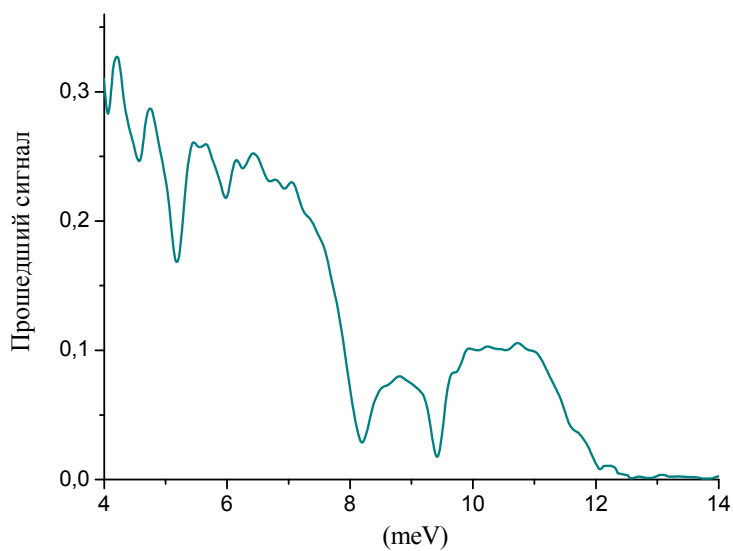
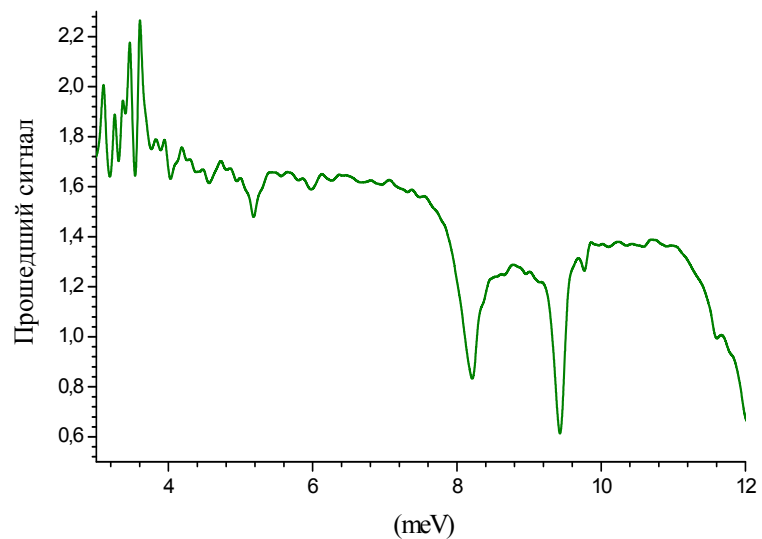
7. Средства проведения испытаний

вакуумный Фурье-спектрометр BRUKER Vertex 80V, относящийся к оборудованию центра коллективного пользования ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур»

8. Результаты

Измерены спектры поглощения образцов кремния и германия после легирования их донорами акцепторами методом ядерной трансмутации.





8. Выводы

В результате измерений показано, что концентрации примесей в образцах соответствует заданному и легированные образцы отвечают требуемому качеству.

Ответственный исполнитель
нс ИФМ РАН

Д.В. Юрасов

Приложение Б

Методика измерения спектров пропускания образцов кремния и германия после нейтронного легирования донорами и акцепторами для уточнения спектра электронных состояний

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

З.Ф. Красильник

«27» декабря 2016 г.

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ И
ГЕРМАНИЯ ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДОНОРАМИ И АКЦЕПТО-
РАМИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ**

ИФМ.2.2016.ПМ1

От Получателя субсидии:

Руководитель проекта _____ В.Н. Шастин

Исполнитель _____ Н.А. Бекин

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний):

Образцы кристаллического кремния и германия, легированные мелкими примесными центрами методом ядерной трансмутации при облучении потоком тепловых нейтронов.

1.2.Цель испытаний:

- исследование спектра поглощения в нейтронно-легированных образцах кремния и германия в ТГц диапазоне частот;
- предварительная оценка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ;

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания:

1.3.1 Испытания проводятся на образцах кристаллического кремния и германия, легированных методом ядерной трансмутации нейтронов мелкими донорами и акцепторами в НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в сопровождении следующих документов: настоящая методика.

1.3.3 Объект испытаний охлаждается до температур, близких к температуре жидкого гелия, для исключения термической заселенности возбужденных примесных состояний и обеспечения максимального поглощения в среде в ТГц диапазоне частот.

2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

Испытания проводятся в Институте физики микроструктур РАН с использованием оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Измерения произведены с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker Vertex 80 V

2.2.2 Средства измерений, может быть заменено другим, обеспечивающим требуемую точность измерений.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний (предварительной обработке исследуемых образцов)

2.3.1 Измерения проводятся на достаточно тонких образцах, чтобы обеспечить возможность регистрации прошедшего через образец излучения источника Фурье-спектрометра;

2.3.2 Образцы должны иметь не плоскопараллельные грани (клиновидную форму), чтобы исключить влияние эффектов переотражения излучения источника спектрометра на спектр поглощения.

3. Требования безопасности

При подготовке и проведении испытаний необходимо выполнять правила по работе с электроустановками и сжиженными газами в соответствии с действующими внутренними инструкциями и стандартами ГОСТ 12.1.019-79 (переиздан в 1996 г.) по электробезопасности, ГОСТ 17518-79 по транспортировке жидких газов.

4. Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Пределные отклонения	Пункт методики
4.1	Проверка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ	3.6				6.1
4.2	Откачка оптического криостата и охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия (4.2 °К)		К	4.2 К	0.5 К	6.3.2
4.3	Откачка оптического криостата и охлаждение детектора (болометра), принимающего прошедший через образец сигнал, до температуры жидкого гелия (4.2 °К)		К	4.2 К	0.5 К	6.3.2
4.4	Измерение спектра поглощения образца		Вт, 1/см	1 нВт ÷ 1мкВт, 10 ÷ 5000 (1/см)	1 %, 0.2/см	6.2

5. Режимы испытаний

5.1 Порядок испытаний

Для проведения испытаний руководителем работ по проекту назначаются исполняющие измерительных работ.

Измерения проводятся в соответствии с планом-графиком работ.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдель-

ных режимах исследований.

Измерения прекращаются в случаях:

несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;

возникновения аварийных ситуаций;

5.3 Измерение сигнала в пустом канале;

5.4 Измерение мощности прошедшего через образец сигнала в зависимости от частоты

6. Методы измерений

6.1 Проверка по п. 4.1. Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие параметров образцов требованиям ТЗ.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если он соответствует ТЗ.

6.2 Работы по пункту 4.4 производятся с использованием Фурье спектрометра с разрешением не более 0.2 1/см.

6.3 Охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия в соответствии с пунктом программы происходит с использованием проточного оптического криостата.

6.4 Охлаждение детектора до температуры жидкого гелия в соответствии с пунктом программы происходит с заливного оптического криостата.

7. Отчетность

По завершению измерений составляется акт о проведенных работах, а так же протокол измерений, включающий в себя все первичные данные измерений. Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение ТЗ.А	Перечень ссылочных документов
Приложение ТЗ.Б	Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний
Приложение ТЗ.В	Типовая форма протокола испытаний
Приложение ТЗ.Г	«Программа и методики обязательного вида испытаний»

Перечень ссылочных документов

Спектрометр Bruker Vertex 80V, <https://www.bruker.com/products/infrared-near-infrared-and-raman-spectroscopy/ft-ir-research-spectrometers/vertex-series/vertex-8080v/overview.html>

Ландсберг Г.С, Оптика, М.: ФИЗМАТЛИТ, 848 с., ISBN: ISBN 5-9221-0314-8

Кремниевый болометр, <http://www.infraredlaboratories.com/uploads/IRLabs-Bolometers-WEB.pdf>

Проточный криостат, [https://www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments/optical-cryostats-for-spectroscopy/liquid-helium-cryostats-\(4k\)/helium-cryostats-optistatcfv2](https://www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments/optical-cryostats-for-spectroscopy/liquid-helium-cryostats-(4k)/helium-cryostats-optistatcfv2)

Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Персональный компьютер	1		Операционная система Windows XP или выше, наличие USB/RS-232 порта
Проточный гелиевый оптический криостат	1	Helium cryostat 4 K, sample in vacuum OxfordInstruments	Температура 4,2 К
Заливной гелиевый оптический криостат для болометра	1	Infrared laboratories	Температура 4,2 К
Фурье-спектрометр	1	Bruker Vertex 80V	Дальний ИК/ТГц: 5-680 см ⁻¹ ; Средний и ближний ИК: 380-15000 см ⁻¹ ; Видимый: до 25000 см ⁻¹ . Разрешение: до 0.07 см-1

ПРОТОКОЛ

название

№ _____

дата.

1. Объект испытания:
2. Цель испытания:
3. Дата начала испытания:
4. Дата окончания испытания:
5. Место проведения испытания:
6. Средства проведения испытаний
7. Результаты
8. Выводы

Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ и руководителем проекта.

Метод проведения спектроскопических измерений

Получение спектров с использованием фурье-спектрометра происходит в 2 стадии: сначала регистрируется интерферограмма исследуемого излучения, а затем путём её Фурье преобразования вычисляется спектр.

В фурье-спектроскопии интерферограммы получают с помощью интерферометра Майкельсона, который настраивается на получение в плоскости выходной диафрагмы (см. рисунок 43) интерференционных колец равного наклона. При поступательном перемещении одного из зеркал интерферометра изменяется разность хода Δ лучей в плечах интерферометра. В процессе изменения Δ исследуемое излучение модулируется, причём частота модуляции f зависит от скорости v изменения Δ и длины волны излучения λ (волнового числа $\nu = 1/\lambda$). При $\Delta = k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) имеют место максимумы интенсивности излучения, при $\Delta = k\lambda/2$ — её минимумы. Если $v = \text{const}$, то $f = v/\lambda = \nu v$, т. е. каждая длина волны исследуемого излучения кодируется определённой f .

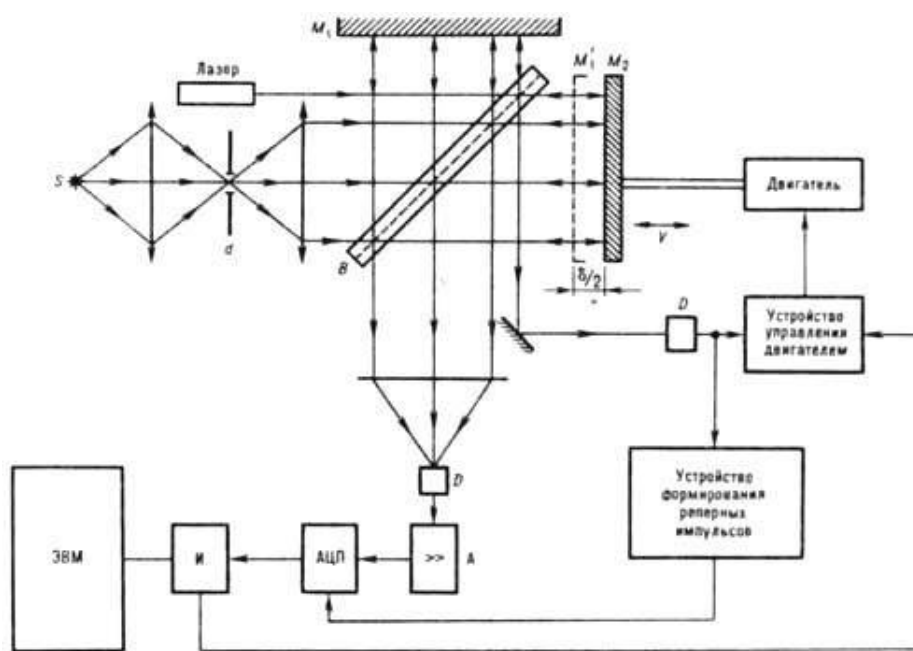


Рисунок 43 – Принципиальная схема фурье-спектрометра: S - источник сплошного ИК-спектра; M_1 - фиксированное зеркало интерферометра; M_2 - подвижное зеркало интерферометра; d - входное отверстие фурье-спектрометра; B - светоделитель; D - фотоприёмник; A - усилитель; И - интерфейс связи ЭВМ с регистрирующей и управляющей электроникой фурье-спектрометра.

Сигнал на приёмнике (интерферограмма) представляет собой совокупность синусоидальных цугов (см. рисунок 44). Каждому спектру соответствует своя интерферограмма. В некоторых случаях спектр может быть определён по ней непосредственно, однако в большинстве случаев для преобразования интерферограммы в спектр необходимо произвести её гармонический анализ. Для этого она записывается в виде ряда (массива) цифр, соответствующих дискретным значениям интенсивности излучения при изменении разности хода от 0 до $\Delta_{\text{макс}}$ через равные интервалы. Такой массив данных вводится в память компьютера, который путём преобразования Фурье вычисляет спектр в течение времени от нескольких секунд до нескольких часов в зависимости от сложности спектра и числа значений в массиве.

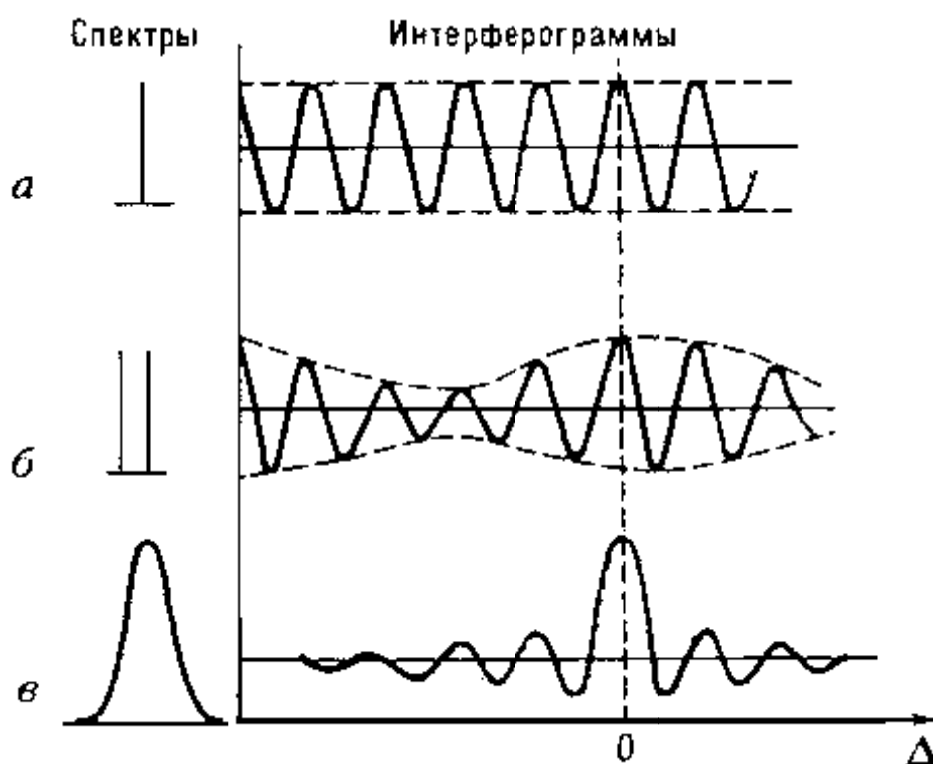


Рисунок 44 – Интерферограммы, соответствующие: а — спектральной линии, б — спектральному дублету, в — спектральной полосе.

В фурье-спектрометр, как правило, кроме двухлучевого интерферометра, входят осветитель, приёмник излучения, система отсчёта Δ , усилитель, аналогово-цифровой преобразователь и компьютер. Сложность получения спектров на фурье-спектрометре перекрывается его преимуществами над другими спектральными приборами. Так, с помощью фурье-спектрометра можно регистрировать одновременно весь спектр. Благодаря тому, что в интерферометре допустимо входное отверстие больших размеров, чем щель спектральных приборов с диспергирующим элементом такого же разрешения, фурье-спектрометры по сравнению с ними имеют выигрыш в светосиле. Это позволяет уменьшить время регистрации спектров, увеличить отношение сигнал/шум и повысить

разрешение, уменьшить габариты прибора. Наличие компьютера в приборе позволяет, кроме вычисления спектра, производить другие операции по обработке полученного экспериментального материала, осуществлять управление и контроль над работой самого прибора.

Наибольшее применение Фурье-спектроскопия нашла в тех исследованиях, где другие методы малоэффективны или вовсе неприменимы. Речь, прежде всего, идет об инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне, в частности, о дальнем ИК-диапазоне, в котором происходит исследование примесных центров в кремнии и германии в рамках данного контракта.

Приложение В

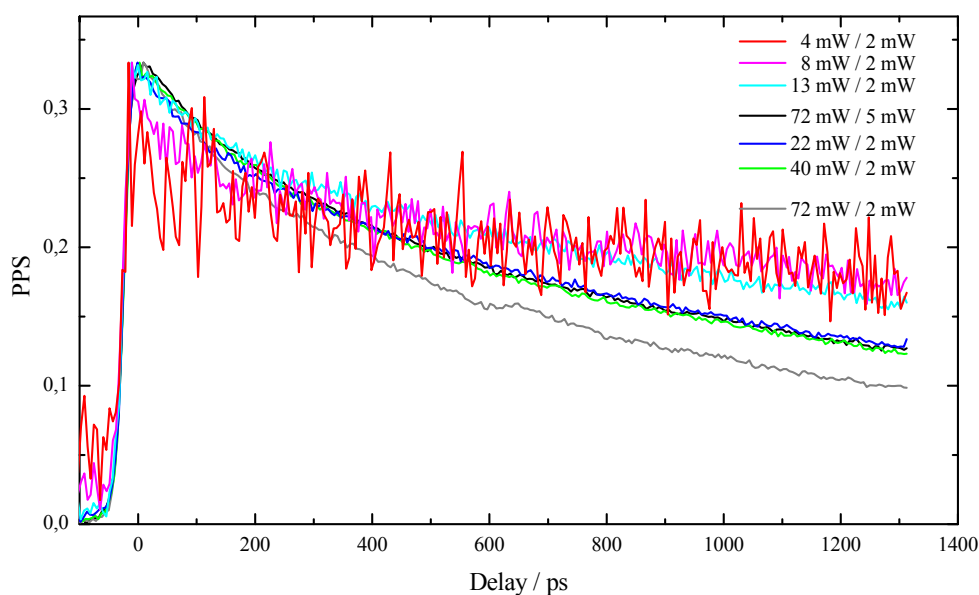
Акт и протокол измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний доноров и акцепторов в одноосно-деформированном германии на собранной в рамках настоящего проекта установке на базе ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения

ПРОТОКОЛ

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА СОБРАННОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

№ 2 02.12.2016

1. Объект: Образец одноосно-деформированного германия, легированный акцепторами галлия
2. Цель: Измерение времени релаксации неравновесных состояний мелких примесей в кристалле германия в условиях одноосного сжатия образца.
3. Дата начала испытания: 28.11.2016
4. Дата окончания испытания: 02.12.2016
5. Место проведения испытания:
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
9. Средства проведения испытаний:
Новосибирский лазер на свободных электронах и оборудование ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения
10. Результаты
Измерено время захвата фотоионизованных носителей заряда акцепторным центром методом пробного импульса в одноосно-деформированном кристалле германия.



8. Выводы

В результате измерений показано, что существует небольшое влияние одноосной деформации на время захвата носителей ионизованными акцепторами галлия в кристалле германия. Результаты работ соответствуют план-графику и требованиям технического задания и достигают поставленных целей.

Ответственный исполнитель
снс ИФМ РАН

Р.Х. Жукавин

Приложение Г

Методика измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний доноров и акцепторов в одноосно-деформированном германии на собранной в рамках настоящего проекта установке на базе ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

З.Ф. Красильник

«27» декабря 2016 г.

МЕТОДИКА

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ НА СОБРАННОЙ В РАМКАХ НАСТОЯЩЕГО ПРОЕКТА УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ЦКП СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО И ТРЕАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ИФМ.2.2016.ПМ2

От Получателя субсидии:

Руководитель проекта _____ В.Н. Шасти́н

Исполнитель _____ Р.Х. Жука́вин

_____ С.М. Серге́ев

Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

Pump импульс – импульс возбуждения;

Probe импульс – зондирующий импульс

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний):

Образцы кристаллического германия, легированные мелкими примесными центрами.

1.2.Цель испытаний:

- исследование временной динамики релаксации неравновесных состояний доноров и акцепторов при одноосной деформации кристаллов при оптическом возбуждении;

предварительная оценка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ;

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания:

1.3.1 Испытания проводятся на образцах кристаллического германия, легированных мелкими донорами и акцепторами.

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в сопровождении следующих документов: настоящая методика.

1.4 *Получатель субсидии* взаимодействует в процессе проведения работ с представителями Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

2.1.1. Испытания при внутрицентровом возбуждении проводятся на базе Новосибирского ЛСЭ и с использованием оборудования ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения»

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Измерения при внутрицентровом возбуждении производятся с помощью установки пробного импульса (pump-probe).

2.2.2 Средства измерений, может быть заменено другим, обеспечивающим требуемую точность измерений.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний (предварительной обработке исследуемых образцов)

2.3.1 Измерения проводятся на достаточно тонких образцах, чтобы обеспечить возможность регистрации прошедшего через образец излучения источника

2.3.2 Образцы должны иметь не плоскопараллельные грани (клиновидную форму), чтобы исключить влияние эффектов переотражения излучения источника.

2.3.3 Объект испытаний охлаждается до температур, близких к температуре жидкого гелия.

3. Требования безопасности

При подготовке и проведении испытаний необходимо выполнять правила по работе с электроустановками, источниками лазерного излучения и сжиженными газами в соответствии с действующими внутренними инструкциями и стандартами ГОСТ 12.1.019-79 (переиздан в 1996 г.) по электробезопасности, ГОСТ 17518-79 по транспортировке жидких газов, ГОСТ 12.1.044-89 по пожаровзрывобезопасности, ГОСТ Р 50723-94 при эксплуатации лазерных изделий.

4. Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Проверка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ	3.6				6.1
4.2	Измерение спектра поглощения деформированного образца		Вт, 1/см	1 нВт ÷ 1 мкВт, 10 ÷ 5000 (1/см)	1 %, 0.2/см	6.2
4.3.1	Юстировка оптической схемы					6.3.1
4.3.2	Откачка оптического криостата и охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия (4.2 °К)		К	4.2 К	0.5 К	6.3.2
4.3.3	Проведение измерений временной динамики релаксации		Вт, пс	0 ÷ 1 Вт, 0 ÷ 1500 пс	1 % по мощности, 10 пс	6.3.3

5. Режимы испытаний

5.1 Порядок испытаний

Для проведения испытаний руководителем работ по проекту назначаются исполняющие измерений.

Измерения проводятся в соответствии с планом-графиком работ.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах исследований.

Измерения прекращаются в случаях:

несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;

возникновения аварийных ситуаций;

5.3. Измерение абсолютной падающей мощности в пучках накачивающего и пробного импульсов.

5.5 Измерение модуляции прохождения в зависимости от задержки пробного импульса.

6. Методы измерений

6.1 Проверка по п. 4.1. Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие параметров образцов требованиям ТЗ.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если он соответствует ТЗ.

6.2 Работы по пункту 4.2 производятся с использованием Фурье спектрометра с разрешением не менее 0.2 1/см.

6.3.1 Юстировка оптической схемы осуществляется с помощью He-Ne лазера, а так же методом поиска максимальной модуляции прошедшего через образец зондирующего импульса.

6.3.2 Охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия в соответствии с пунктом программы происходит с использованием проточного оптического криостата.

6.3.3 Измерения временной динамики релаксации по пункту программы 4.3.3 происходит в соответствии с приложением ТЗ.Г настоящей методики.

7. Отчетность

По завершению измерений составляется акт о проведенных работах, а так же протокол измерений, включающий в себя все первичные данные измерений. Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение ТЗ.А	Перечень ссылочных документов
Приложение ТЗ.Б	Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний
Приложение ТЗ.В	Типовая форма протокола испытаний
Приложение ТЗ.Г	«Программа и методики обязательного вида испытаний»

Перечень ссылочных документов

N. Deßmann, S. G. Pavlov, V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, V. V. Tsyplenkov, S. Winnerl, M. Mitterdorff, N. V. Abrosimov, H. Riemann, and H.-W. Hübers, Time-resolved electronic capture in n-type germanium doped with antimony, Phys. Rev. B 89, 035205 (2014)

Standford Research Systems, Руководство пользователя, MODEL SR830, DSP Lock-In Amplifier, www.thinkSRS.com

Ophyr inc., Руководство пользователя, http://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/3A-P-THz_3A-FS_3A-P-FS-12_0.pdf

Lasnix, 98 Lasers & Applications September 1984, Design Ideas, Infrared Attenuator Uses Diffraction Principle, by F. Keilmann and K.W. Kussmaul]

Tydex, ИК- поляризаторы, http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/IR_polarizers.pdf

Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Лазер на свободных электронах (ЛСЭ)	1	NovoFEL	Длительность импульса 100-150 пс, частота по- вторения 6 МГц, средняя мощность – 10 Вт Длина волны излучения 90-240 мкм
Синхродетектор	2	Standford Research SR-830	Диапазон частот: 1МГц- 102.4 кГц Динамический диапазон >100 dB Стабильность 5 ppm/°C Разрешение по фазе не менее 0.01 градуса Постоянная времени 10 мксек - 30 ксек Встроенный источник Интерфейс GPIB и RS- 232
Поляризатор	1	Tydex	Полоса пропускания 8- 200 мкм Отношение сигналов на перпендикулярных поля- ризациях – не хуже 0.01
Персональный компьютер	1		Операционная система Windows XP или выше, наличие USB/RS-232 порта
Проточный гелиевый оптический криостат	1	Janis ST-100	Прозрачность окон в диапазоне 50-200 мкм
Контроллер температуры	1	LakeShore 310	Диапазон изменения и контроля температуры 4- 300 К
Измеритель мощности	2	Ophyr 3A-P-THz	0.3-10 ТГц, 15 мкВт – 3 Вт
автоматизированная линию за- держки	1	Standa, Модель 8MT195	диапазон перемещения 75 см, точность - 12 мик- рон, шаговый двигатель, контроллер с выходом на РС.

ПРОТОКОЛ

название

№ ____

дата.

1. Объект испытания:
2. Цель испытания:
3. Дата начала испытания:
4. Дата окончания испытания:
5. Место проведения испытания:
6. Средства проведения испытаний
7. Результаты
8. Выводы

Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

Метод проведения измерений

Методика измерения времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса при внутрицентровом возбуждении в кристалле германия сходна с проводимыми измерениями в кремнии, и основана на эффекте модуляции коэффициента поглощения среды, вызванной коротким импульсом (время импульса много меньше характерных релаксационных времен в системе) лазерного излучения. Регистрация динамики восстановления оптических свойств среды измеряется посредством пробного импульса, который имеет те же характеристики (частота, длительность), что и возбуждающий систему импульс, но гораздо меньшей мощности – не способной заметным образом изменить среду. Для реализации эксперимента по измерению методом пробного импульса необходимо осуществить сведение пучком накачивающего (Pump) и пробного (Probe) импульсов в исследуемом образце. Рисунок 34 иллюстрирует выполнение данного требования.

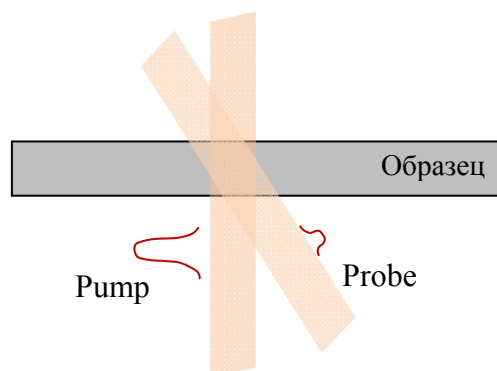


Рисунок 45– Схема сведения пучков пробного и накачивающего пучков

Накачивающий импульс переводит исследуемую среду в возбужденное состояние в области засветки среды лазерным излучением, тем самым изменяя коэффициент поглощения в ней. Пробный импульс на той же частоте следует с некоторой задержкой от накачивающего импульса. Изменяя время задержки между pump и probe импульсами и измеряя мощность прошедшего через образец пробного импульса в зависимости от времени задержки, измеряется время восстановления оптических свойств среды (коэффициент поглощения). Время восстановления коэффициента поглощения в среде отражает времена релаксационных процессов в ней. Зависимость прошедшего через исследуемый образец мощности пробного импульса от времени задержки между pump и probe импульсами называется pump-probe сигналом.

Существуют различные варианты геометрии pump-probe измерений: направления распространения лучей накачивающего и зондирующих импульсов перпендикулярны или почти параллельны (под небольшим углом). При ортогональной геометрии лучей легче исключить попадание на детектор излучения pump импульса, с другой стороны, в случае, когда лучи распространяются под небольшим углом, легче осуществляется условие сведения лучей в исследуемом образце. В последнем варианте для исключения попадания на детектор излучения накачивающего импульса используют перпендикулярные поляризации pump и probe импульсов, и перед детектором ставят поляризатор.

На рисунке 46 представлена оптическая схема измерений на Новосибирском ЛСЭ. Регистрация pump-probe сигнала производится с помощью охлаждаемого до температур жидкого гелия Ge:Ga детектора. В случае исследования динамики возбужденных состояний мелких примесных центров в полупроводниках методом пробного импульса, частоту излучения ЛСЭ подбирают равной частоте перехода из основного состояния примеси в какое-либо возбужденное состояние, время жизни которого исследуется. Эксперимент проводится при температурах близких к температуре жидкого гелия, чтобы все примесные центры в отсутствие оптического возбуждения находились в основном состоянии. Когда часть примесных центров под действием pump импульса переходит в возбужденное состояние, уменьшается коэффициент поглощения, и пробный импульс проходит через среду, поглощаясь слабее.

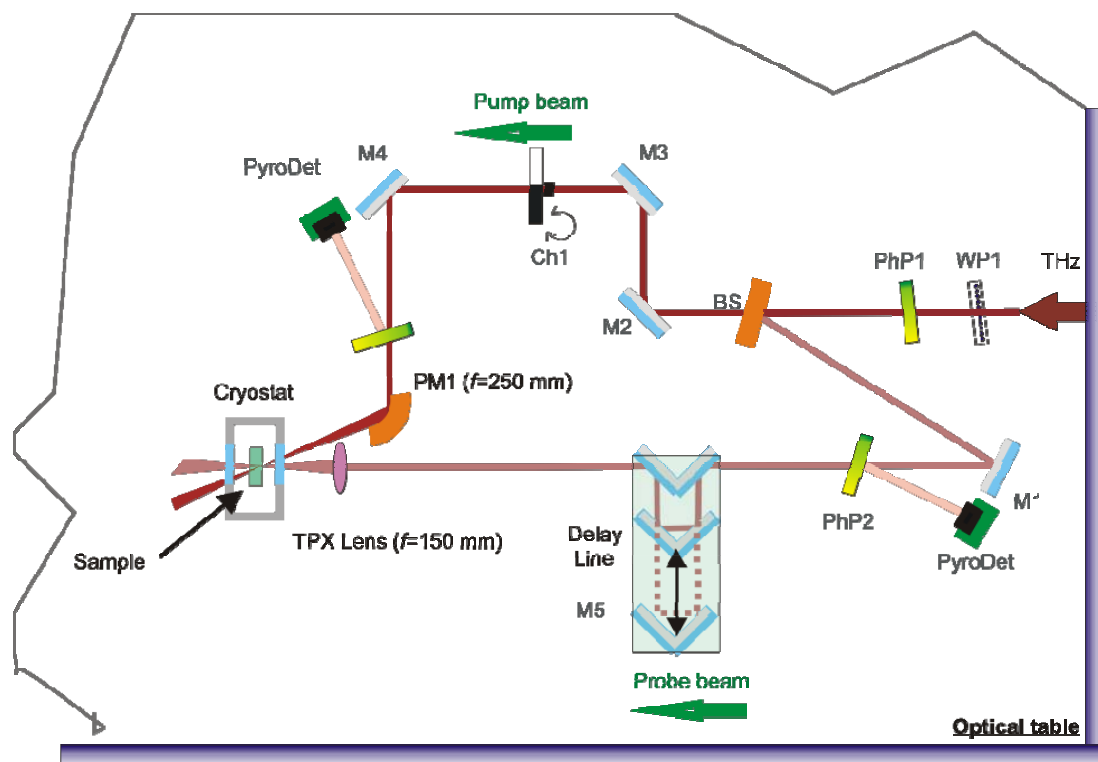


Рисунок 46 – Схема установки по измерениям методом пробного импульса на базе Новосибирского ЛСЭ

По мере возвращения примесных центров в основное состояние за счет различных механизмов релаксации в среде, происходит восстановление поглощения в среде.

Одноосная деформация исследуемого кристалла приводит к изменению энергий и волновых функций состояний примесных центров, и, как следствие, изменяются и их темпы релаксации, что сказывается на форме pump-probe сигнала. В полупроводниках n-типа изменение состояний донорных центров связано со сдвигом долин зоны проводимости, вследствие чего происходит изменение вклада различных долин в волновую функцию примесного состояния. В полупроводниках p-типа деформация приводит к относительному сдвигу подзон валентной зоны, изменяя тем самым структуру и энергию акцепторных состояний.

Для осуществления одноосной деформации образца используется модуль давления, который имеет достаточно компактные размеры и позволяет поместить его в оптический криостат. Модуль обеспечивает возможность осуществлять одноосное сжатие образца и фиксировать это давление на достаточно продолжительное время для проведения эксперимента, так же обеспечивать возможность ввода и вывода излучения.

Приложение Д

Акт и протокол измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров и акцепторов в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса

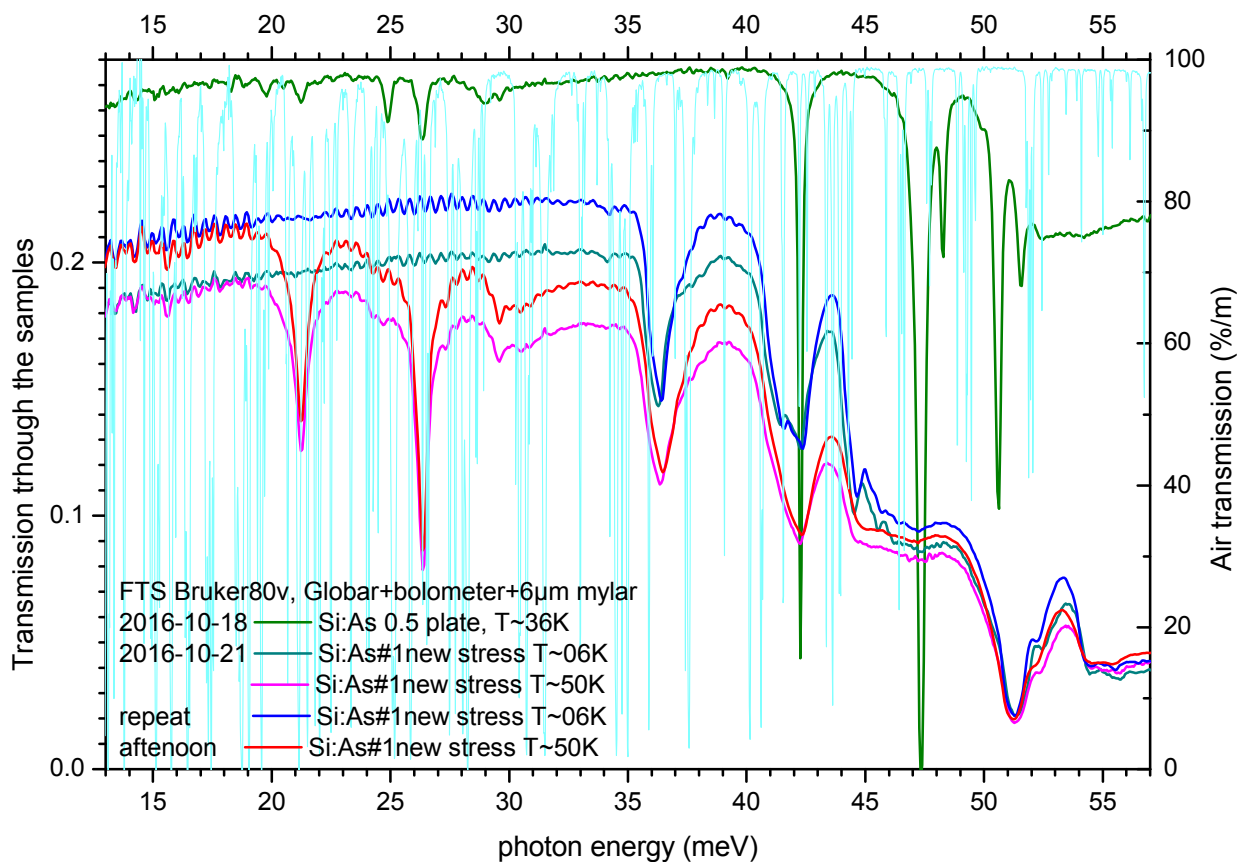
ПРОТОКОЛ

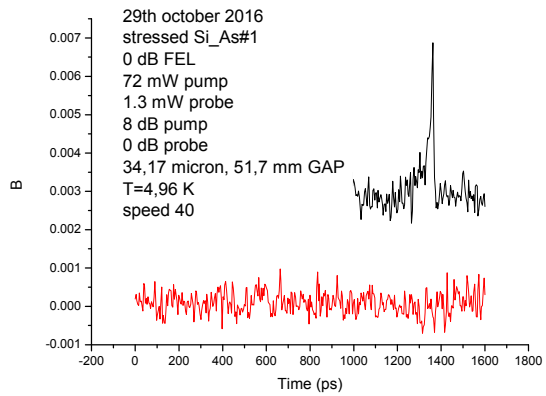
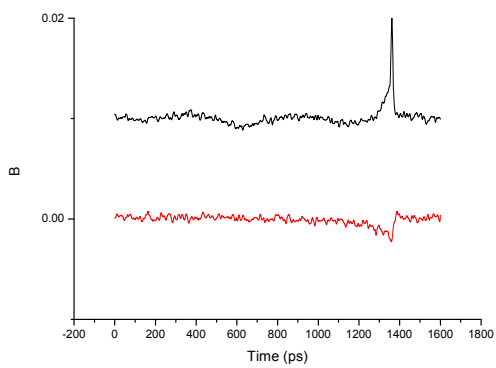
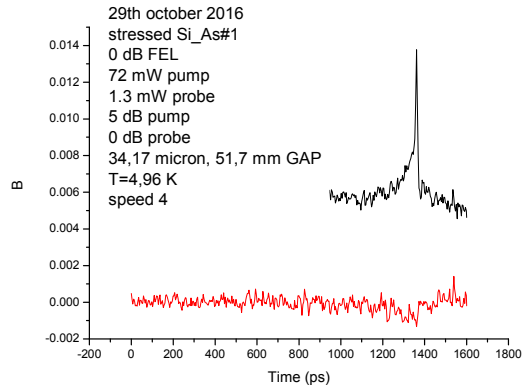
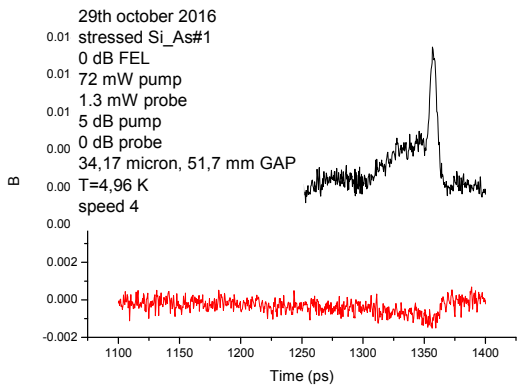
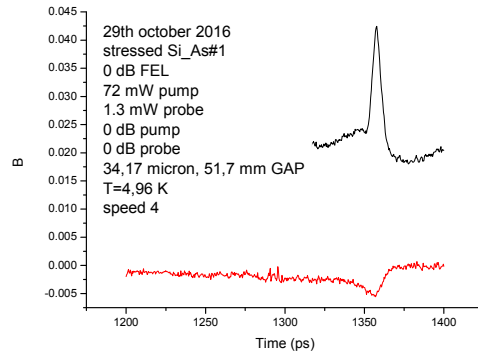
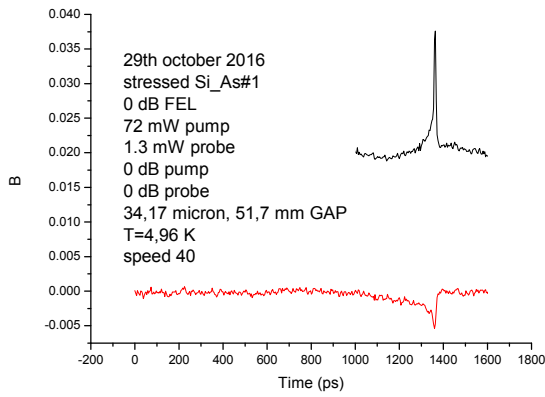
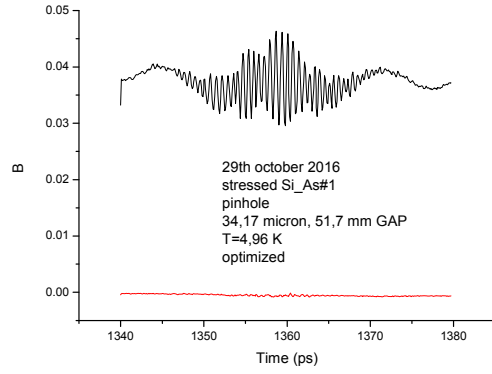
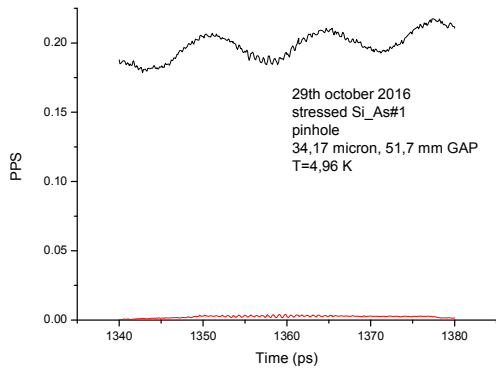
измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров сурьмы и мышьяка в одноосно деформированном кремнии методом пробного импульса

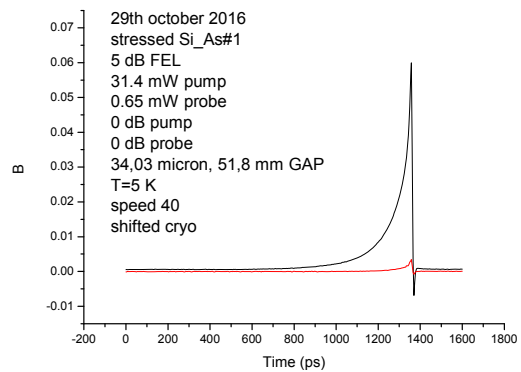
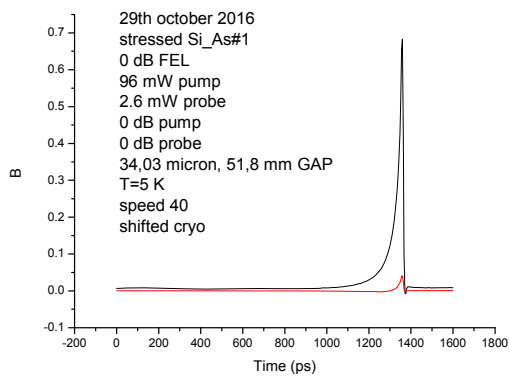
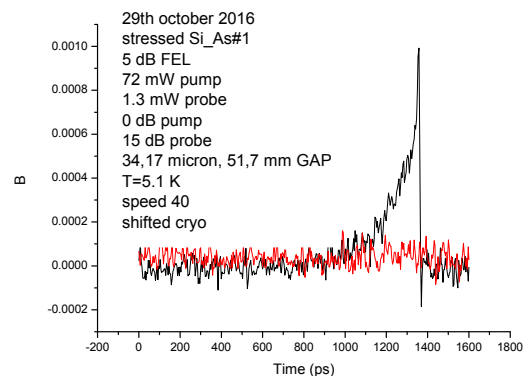
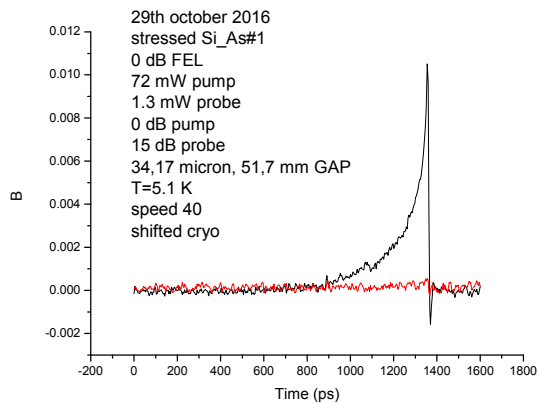
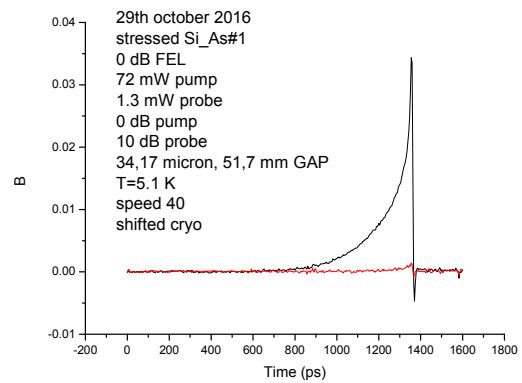
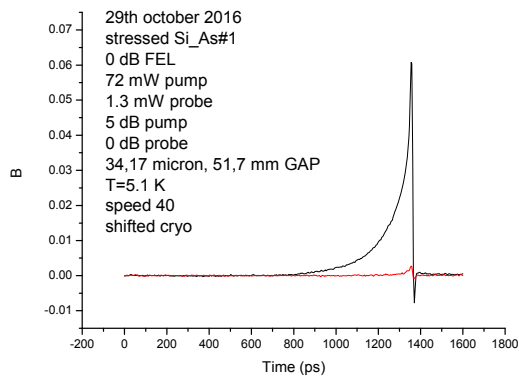
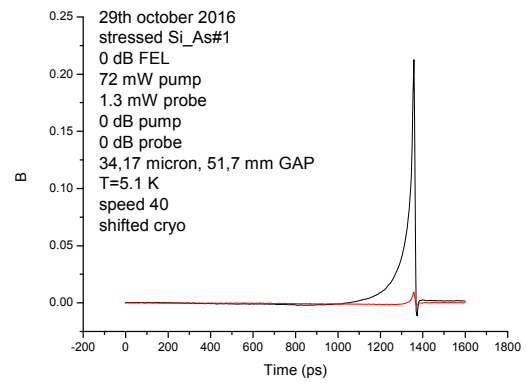
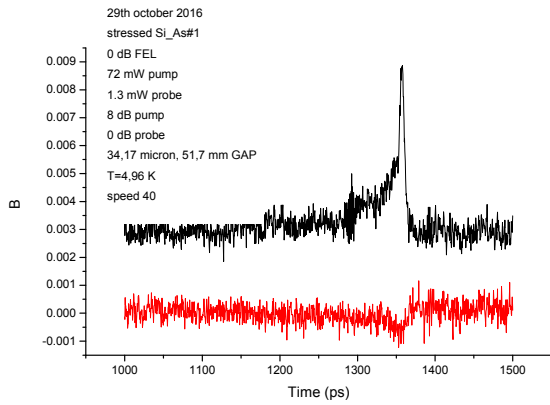
№ 1

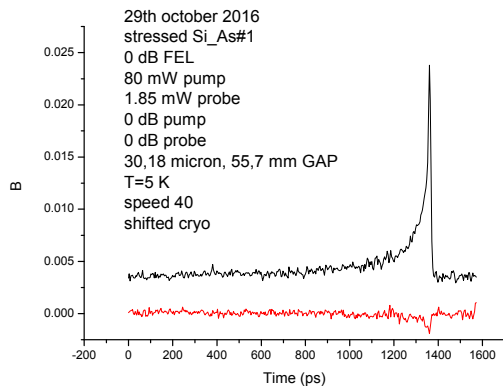
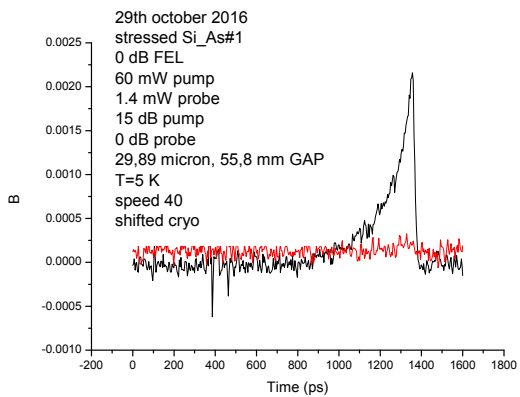
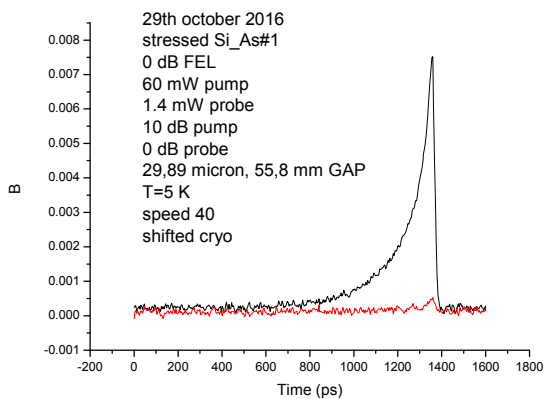
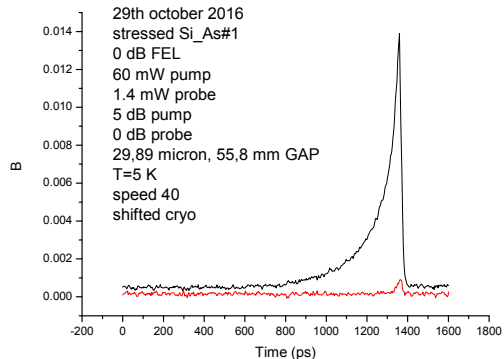
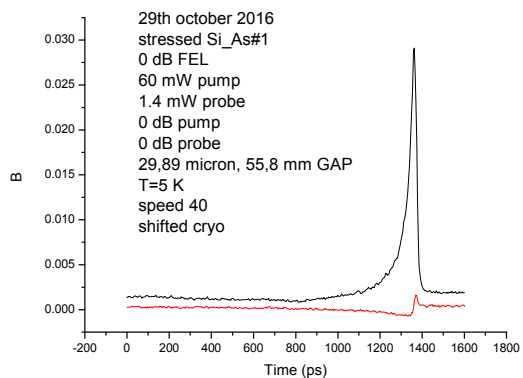
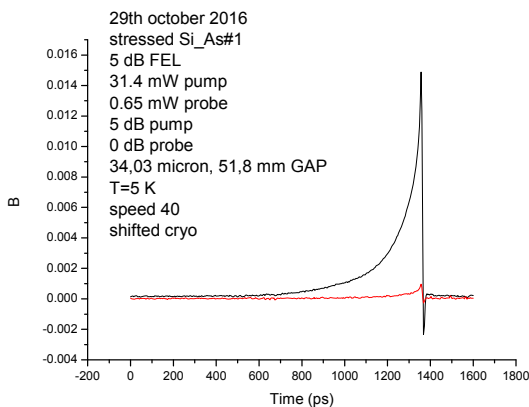
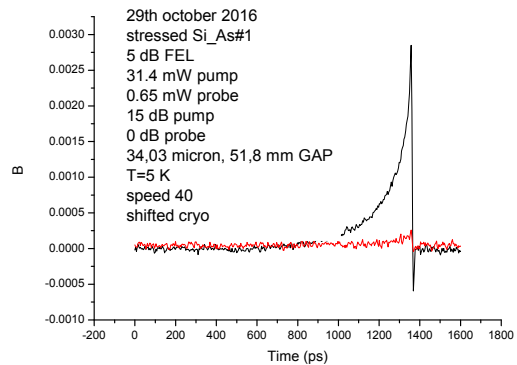
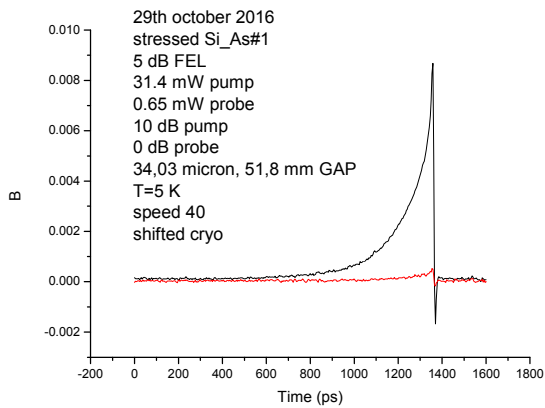
01.11.2016

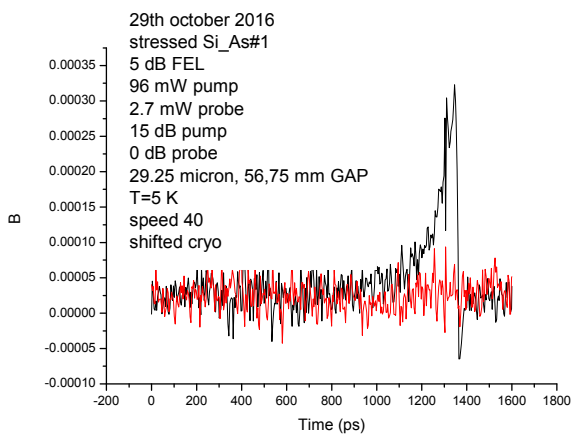
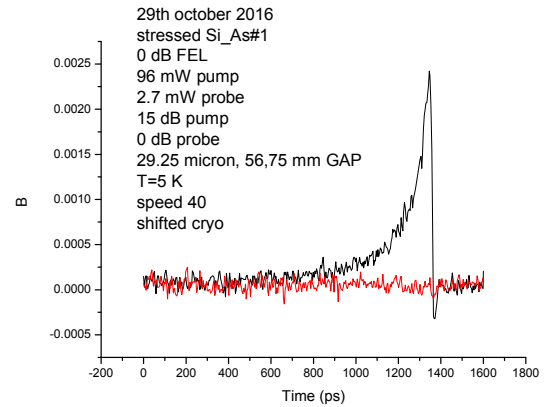
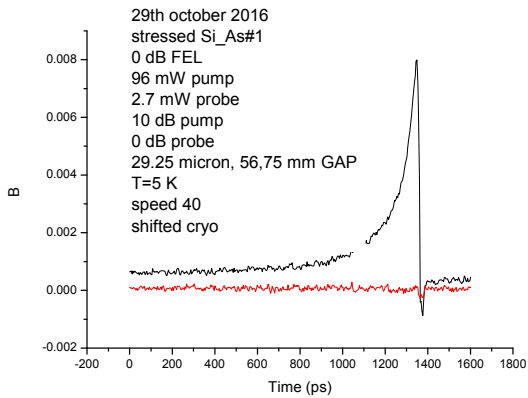
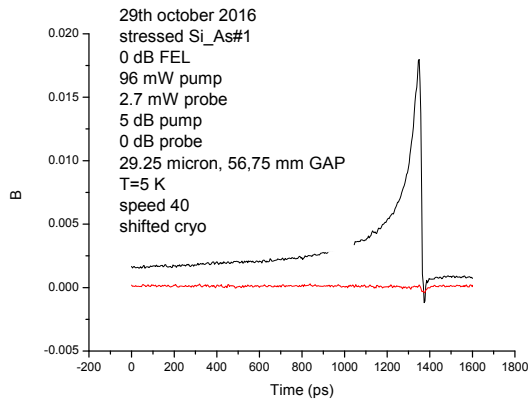
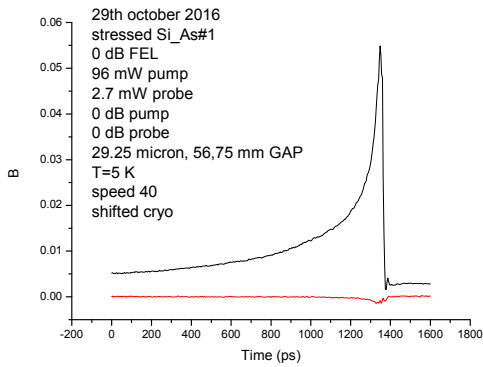
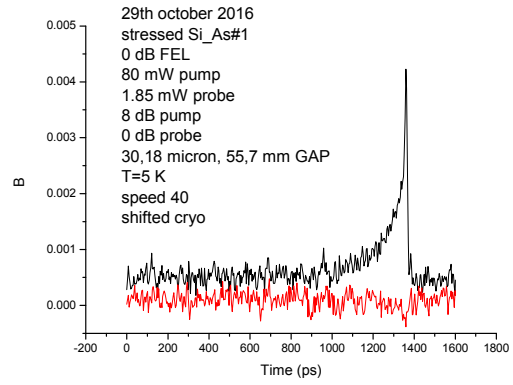
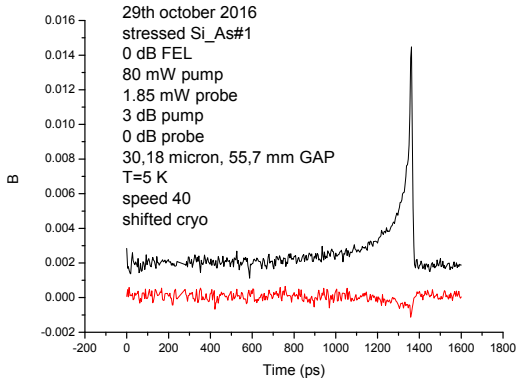
1. *Объект испытания:* Образцы кристаллического кремния, легированными донорами мышьяка и сурьмы.
2. *Цель испытания:* Измерение времен жизни возбужденных состояний мелких доноров в кремнии
3. *Дата начала испытания:* 18.10.2016
4. *Дата окончания испытания:* 01.11.2016
5. *Место проведения испытания:* Центр Гельмгольца в Дрездене-Россендорф
6. *Средства проведения испытаний:* Лазер на свободных электронах (FELBE), установка измерения методом пробного импульса (pump-probe)
7. *Результаты*

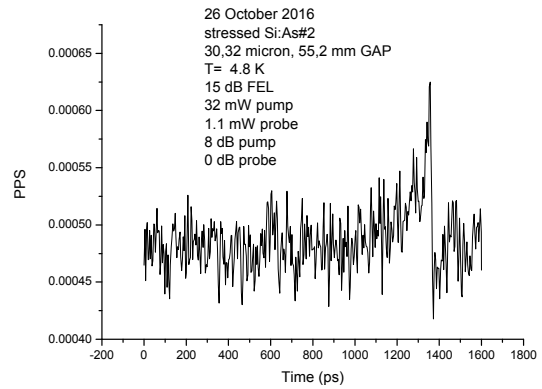
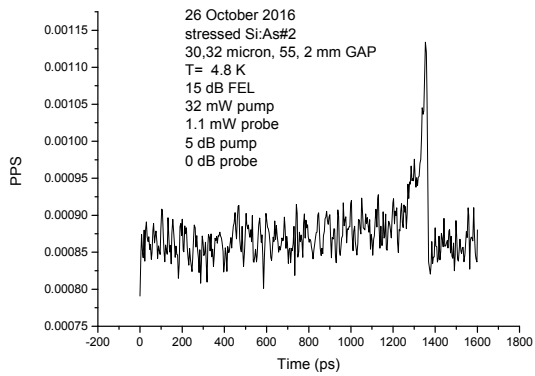
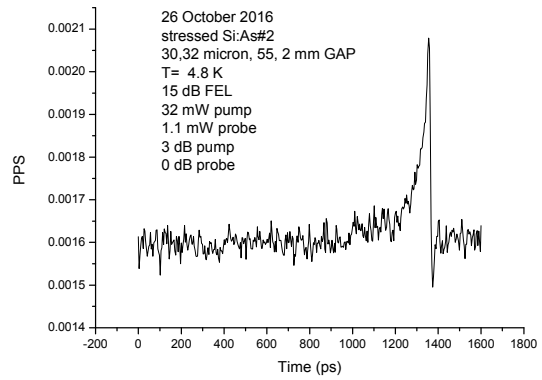
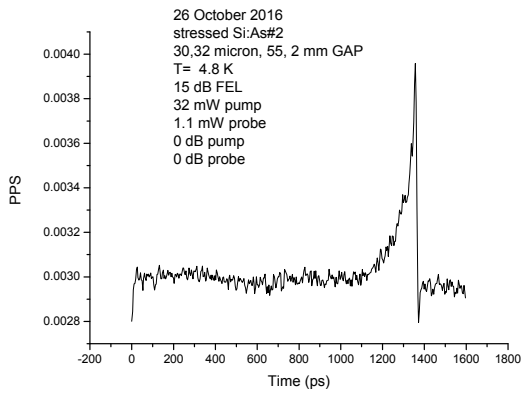
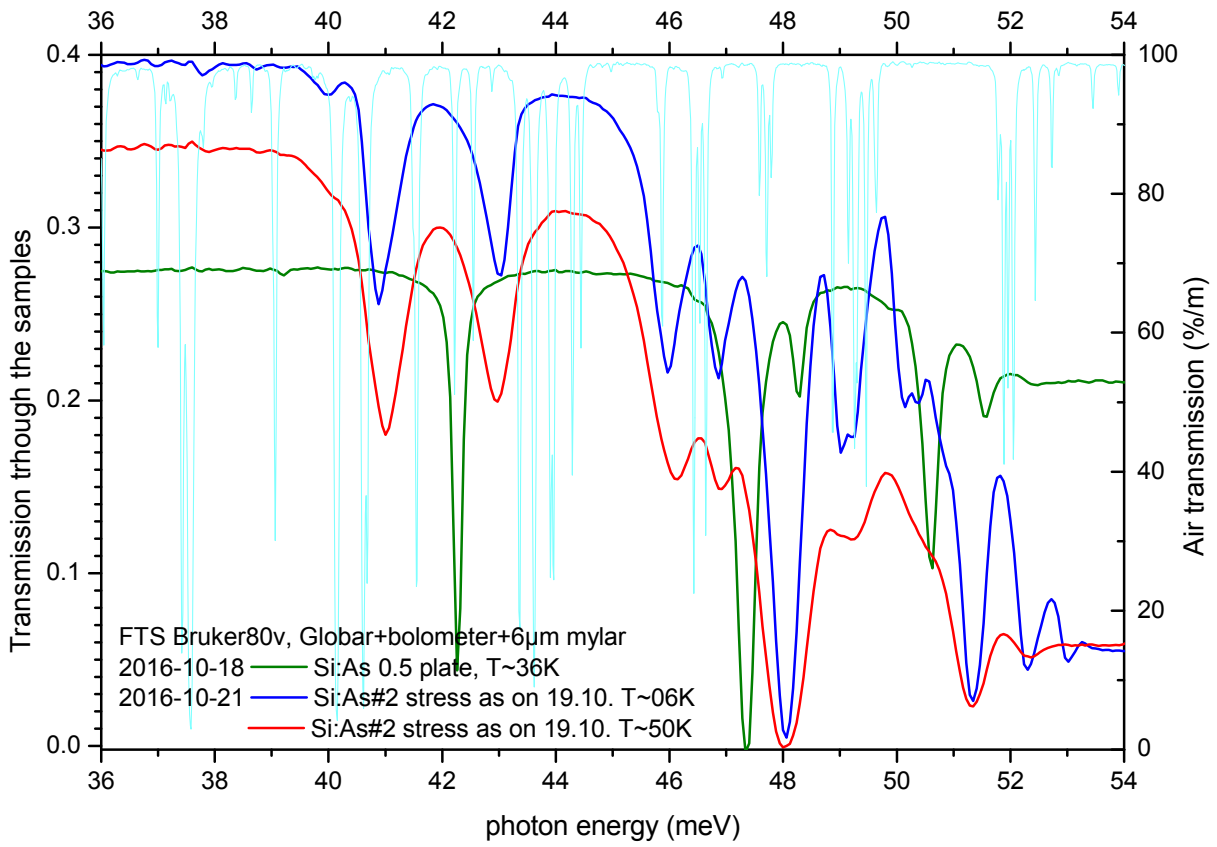


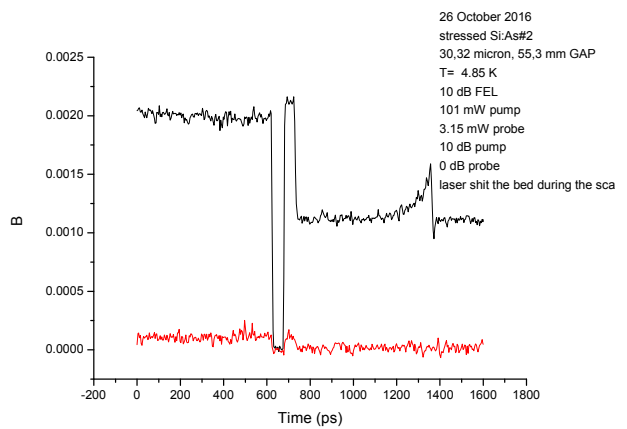
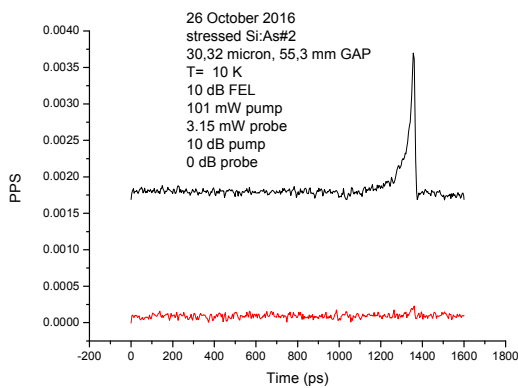
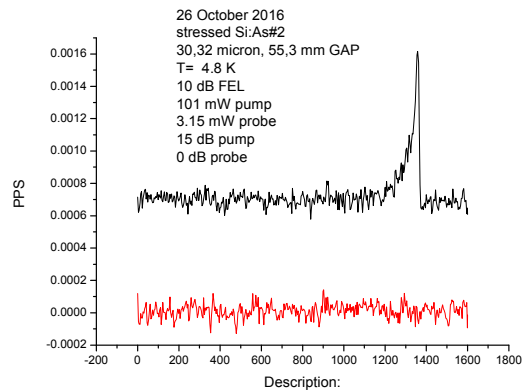
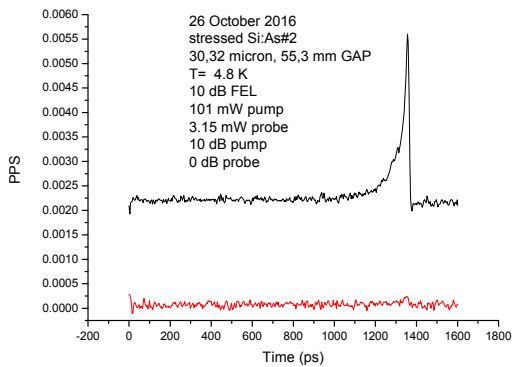
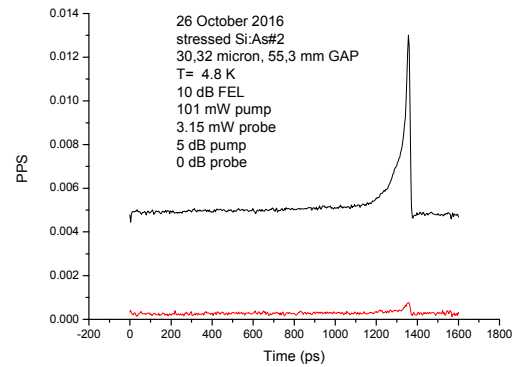
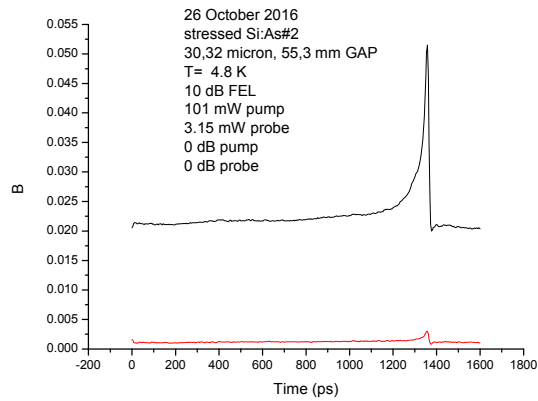
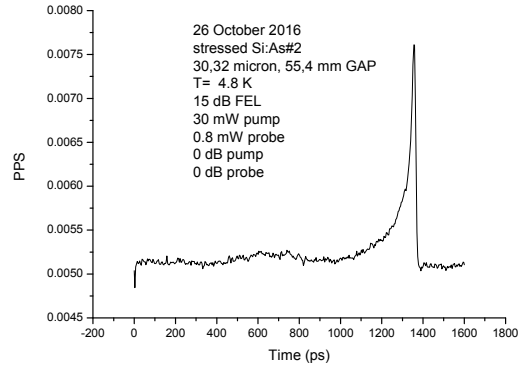
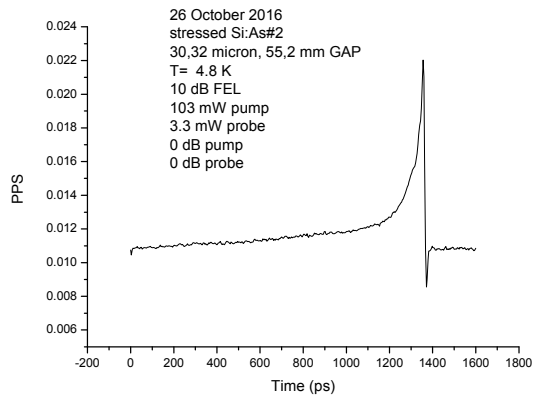


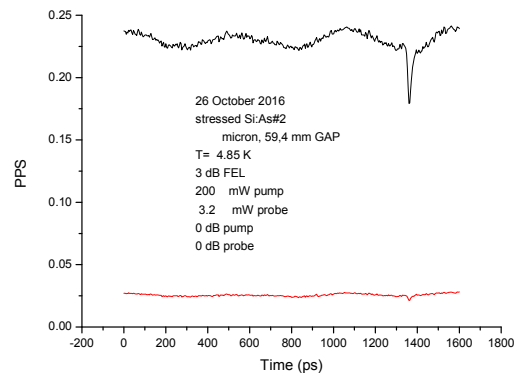
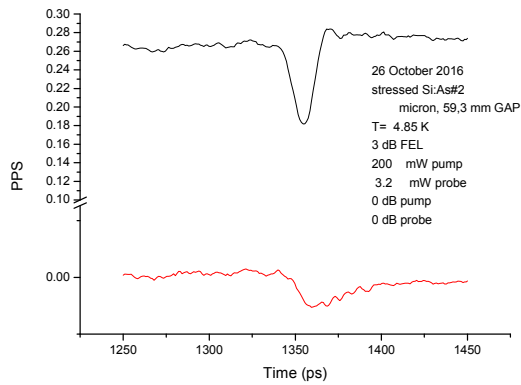
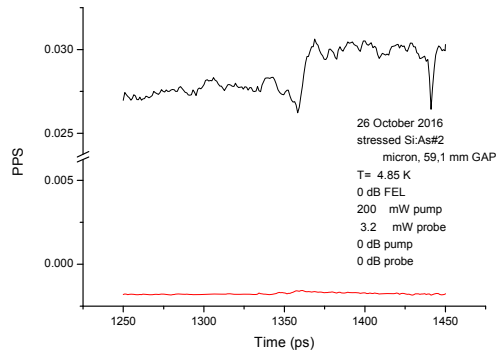
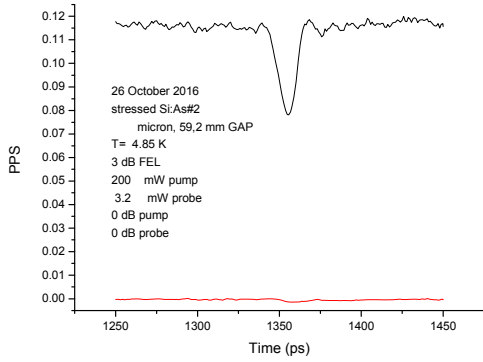
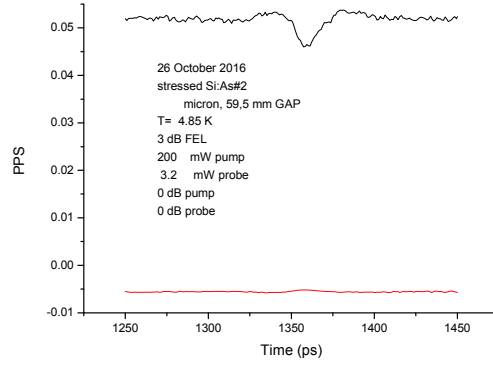
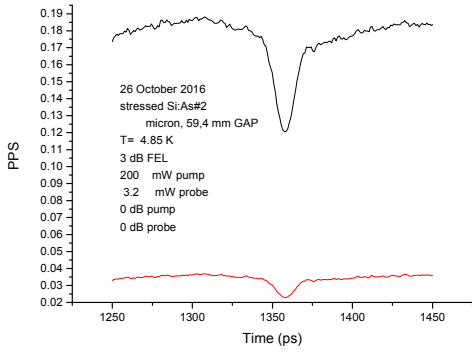
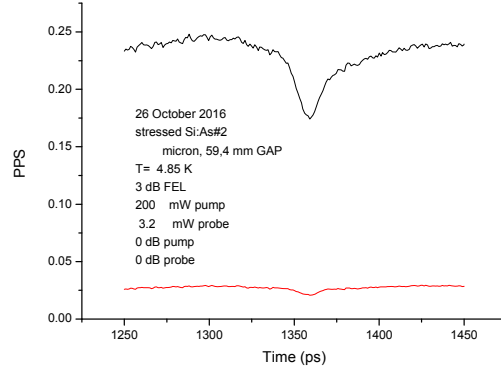
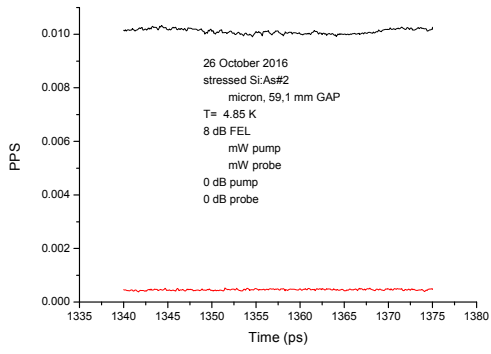


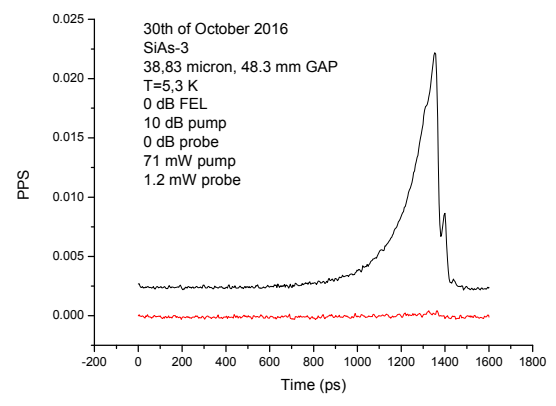
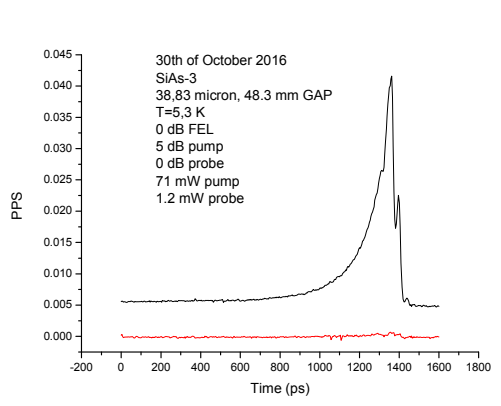
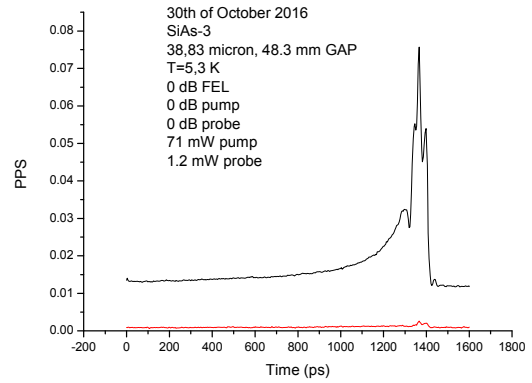
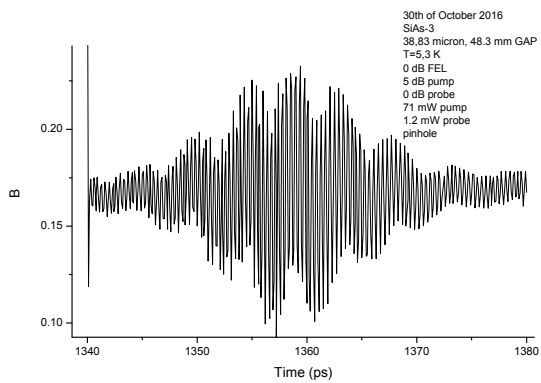
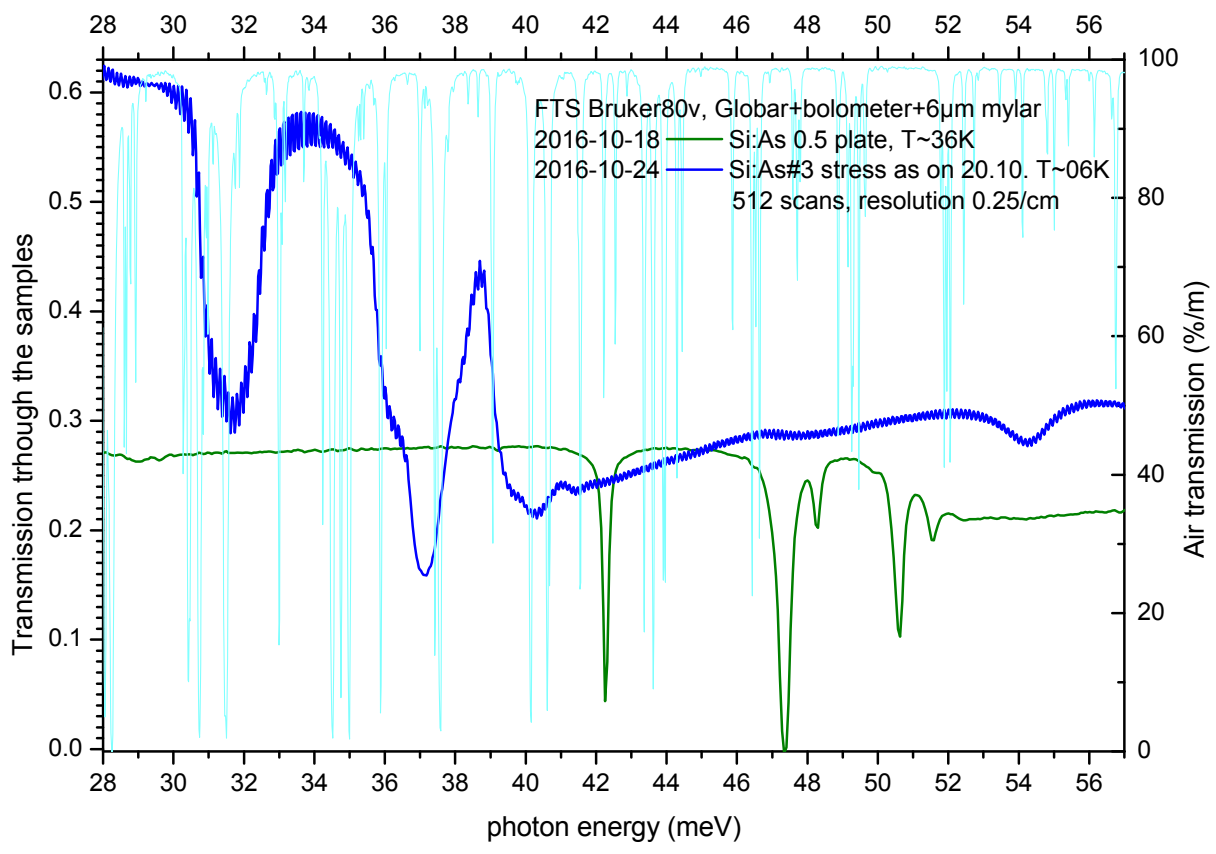


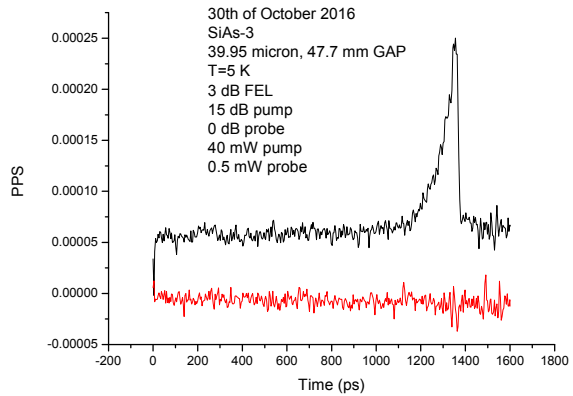
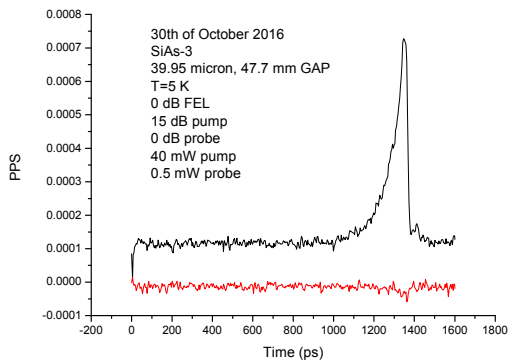
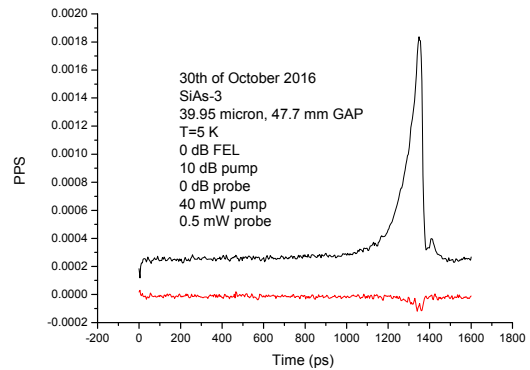
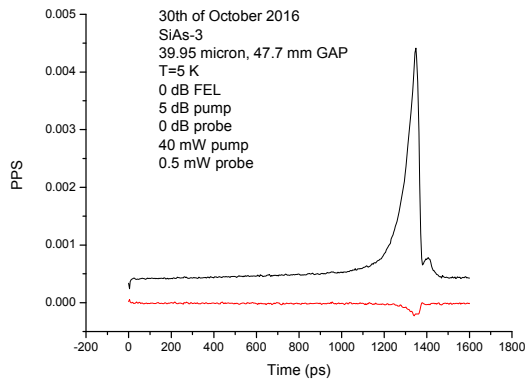
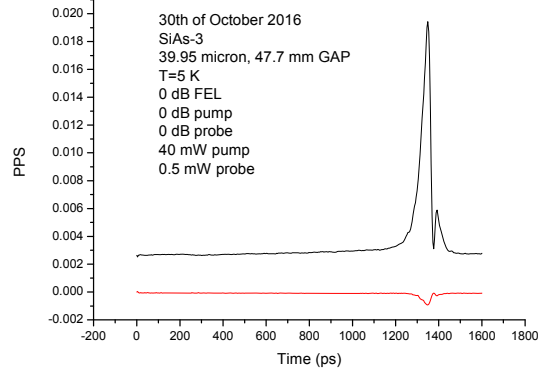
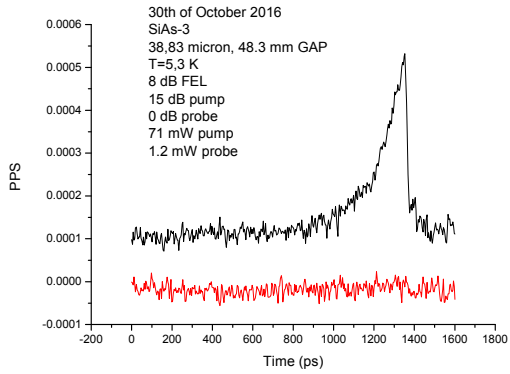
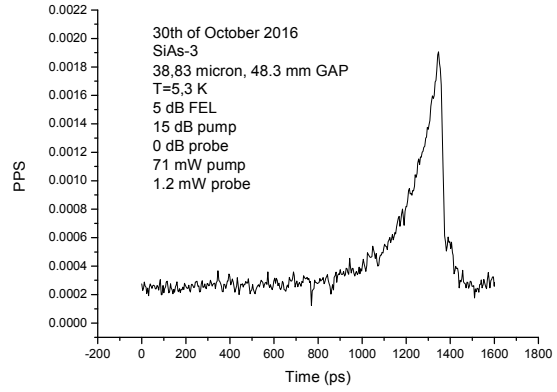
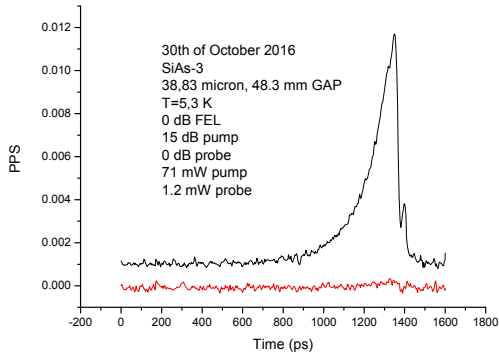


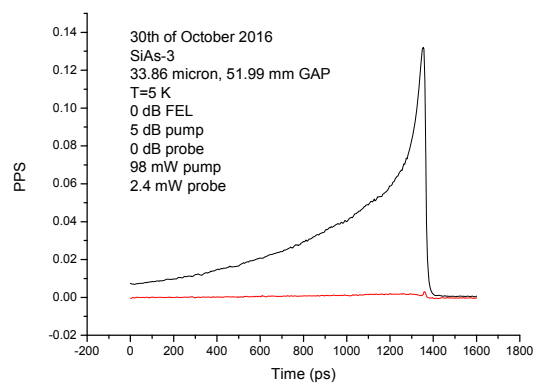
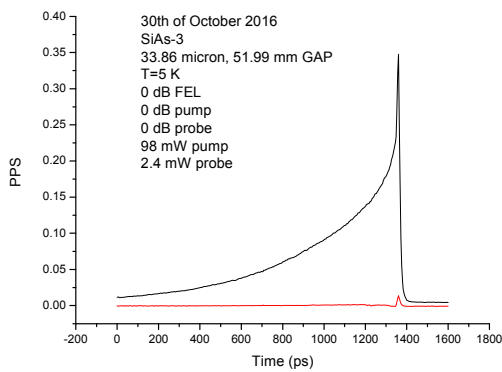
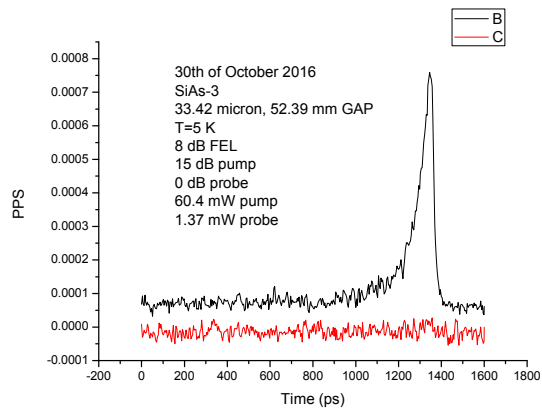
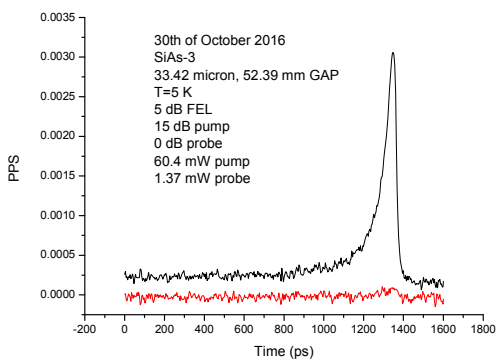
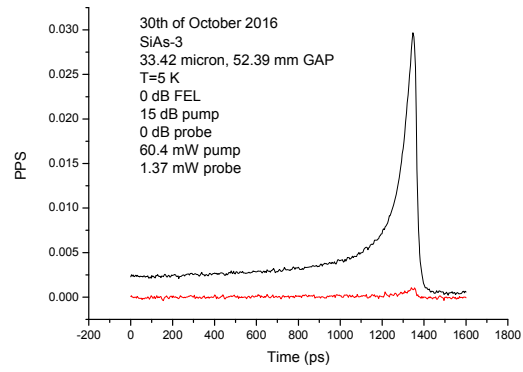
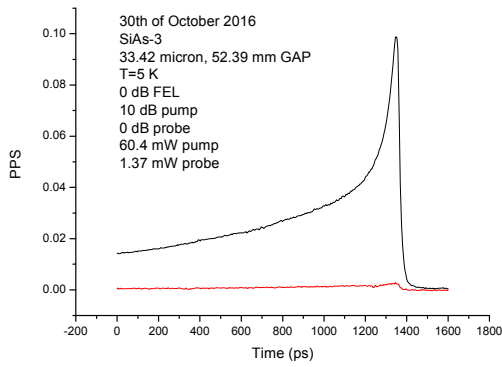
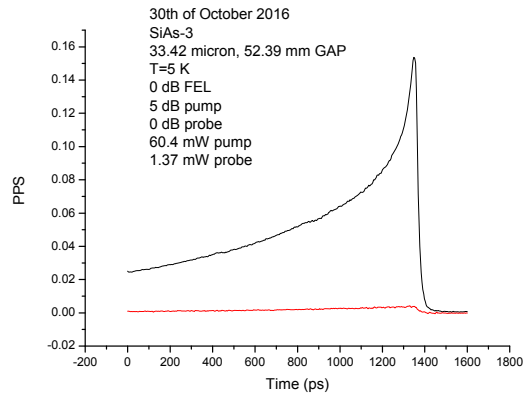
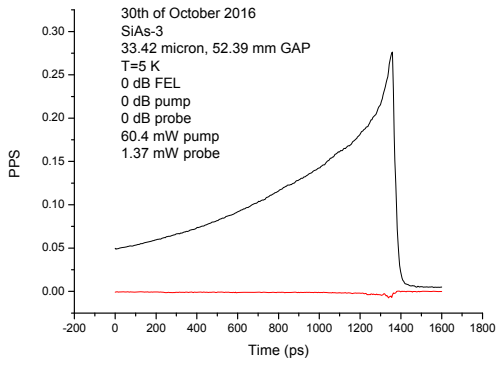


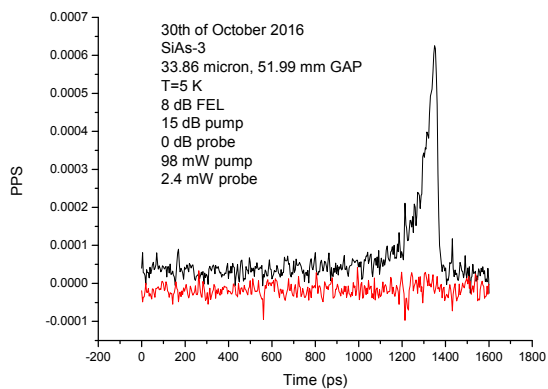
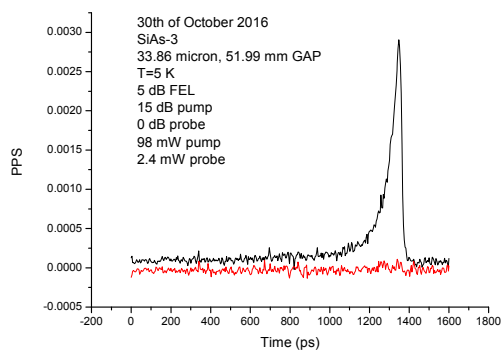
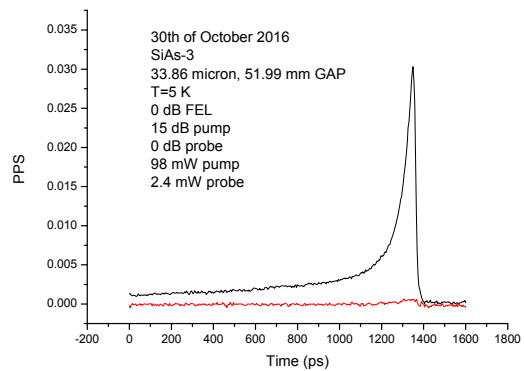
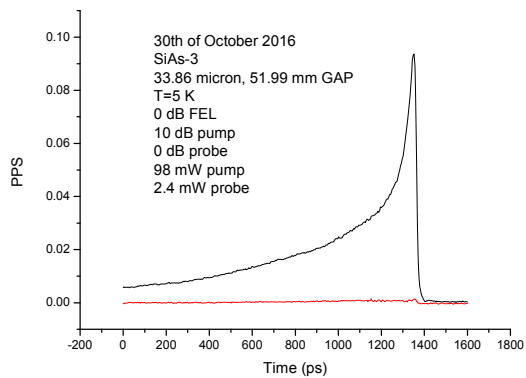












8. Выводы

Результаты работ соответствуют план-графику и требованиям технического задания и достигают поставленных целей.

Исполнитель работ:

Жукавин Р.Х.

Приложение Е

Методика измерения временной динамики релаксации неравновесных состояний мелких доноров и акцепторов в одноосно-деформированном кремнии методом пробного импульса

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

З.Ф. Красильник

«27» декабря 2016 г.

**МЕТОДИКА
ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ РЕЛАКСАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СО-
СТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ И АКЦЕПТОРОВ В ОДНООСНО-
ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ МЕТОДОМ ПРОБНОГО ИМПУЛЬСА**

ИФМ.2.2016.ПМЗ

От Получателя субсидии:

Руководитель проекта _____ В.Н. Шастин

Исполнитель _____ Р.Х. Жукавин

_____ К.А. Ковалевский

Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

Pump импульс – импульс возбуждения;

Probe импульс – зондирующий импульс

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний):

Образцы кристаллического кремния и германия, легированные мелкими примесными центрами.

1.2. Цель испытаний:

- исследование временной динамики релаксации неравновесных состояний доноров и акцепторов при одноосной деформации кристаллов при оптическом возбуждении;
предварительная оценка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ;

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания:

1.3.1 Испытания проводятся на образцах кристаллического кремния, легированных мелкими донорами и акцепторами.

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в сопровождении следующих документов: настоящая методика.

1.4 *Получатель субсидии* взаимодействует в процессе проведения работ по спектроскопии с представителями Института Роста кристаллов, Центра в Дрездене-Россендорф (FELBE).

2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

2.1.1. Испытания при внутрицентровом возбуждении проводятся на базе ЛСЭ ФЭЛБЕ Центра Россендорфа.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Измерения при внутрицентровом возбуждении производятся с помощью установки пробного импульса (pump-probe).

2.2.2 Измерения при межзонном возбуждении производятся на установке, обеспечивающей излучение на длине волны возбуждения 0.5-1.2 микрон и измерительную аппаратуру, обеспечивающую детектирование ближнего, среднего и дальнего ИК диапазона

2.2.2 Средства измерений, может быть заменено другим, обеспечивающим требуемую точность измерений.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний (предварительной обработке исследуе-

мых образцов)

2.3.1 Измерения проводятся на достаточно тонких образцах, чтобы обеспечить возможность регистрации прошедшего через образец излучения источника

2.3.2 Образцы должны иметь не плоскопараллельные грани (клиновидную форму), чтобы исключить влияние эффектов переотражения излучения источника.

2.3.3 Объект испытаний охлаждается до температур, близких к температуре жидкого гелия.

3. Требования безопасности

При подготовке и проведении испытаний необходимо выполнять правила по работе с электроустановками, источниками лазерного излучения и сжиженными газами в соответствии с действующими внутренними инструкциями и стандартами ГОСТ 12.1.019-79 (переиздан в 1996 г.) по электробезопасности, ГОСТ 17518-79 по транспортировке жидких газов, ГОСТ 12.1.044-89 по пожаровзрывобезопасности, ГОСТ Р 50723-94 при эксплуатации лазерных изделий.

4. Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Проверка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ	3.6				6.1
4.2	Измерение спектра поглощения деформированного образца		Вт, 1/см	1 нВт ÷ 1 мкВт, 10 ÷ 5000 (1/см)	1 %, 0.2/см	6.2
4.3.1	Юстировка оптической схемы					6.3.1
4.3.2	Откачка оптического криостата и охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия (4.2 °К)		К	4.2 К	0.5 К	6.3.2
4.3.3	Проведение измерений		Вт, пс	0 ÷ 1 Вт,	1 % по	6.3.3

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
	временной динамики релаксации			0 ÷ 1500 пс	мощности, 10 пс	

5. Режимы испытаний

5.1 Порядок испытаний

Для проведения испытаний руководителем работ по проекту назначаются исполняющие измерительных работ.

Измерения проводятся в соответствии с планом-графиком работ.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах исследований.

Измерения прекращаются в случаях:

несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;

возникновения аварийных ситуаций;

5.3. Измерение абсолютной падающей мощности в пучках накачивающего и пробного импульсов.

5.6 Измерение модуляции прохождения в зависимости от задержки пробного импульса.

6. Методы измерений

6.1 Проверка по п. 4.1. Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие параметров образцов требованиям ТЗ.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если он соответствует ТЗ.

6.2 Работы по пункту 4.2.1 производятся с использованием Фурье спектрометра с разрешением не более 0.2 1/см.

6.3.1 Юстировка оптической схемы осуществляется с помощью He-Ne лазера, а так же методом поиска максимальной модуляции прошедшего через образец зондирующего импульса.

6.3.2 Охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия в соответствии с пунктом программы происходит с использованием проточного оптического криостата.

6.3.3 Измерения временной динамики релаксации по пункту программы 4.3.3 происходит в соответствии с приложением ТЗ.Г настоящей методики.

7. Отчетность

По завершению измерений составляется акт о проведенных работах, а так же протокол измерений, включающий в себя все первичные данные измерений. Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение ТЗ.А	Перечень ссылочных документов
Приложение ТЗ.Б	Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний
Приложение ТЗ.В	Типовая форма протокола испытаний
Приложение ТЗ.Г	«Программа и методики обязательного вида испытаний»

Перечень ссылочных документов

N. Deßmann, S. G. Pavlov, V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, V. V. Tsyplenkov, S. Winnerl, M. Mitterdorff, N. V. Abrosimov, H. Riemann, and H.-W. Hübers, Time-resolved electronic capture in n-type germanium doped with antimony, Phys. Rev. B 89, 035205 (2014)

Standford Research Systems, Руководство пользователя, MODEL SR830, DSP Lock-In Amplifier, www.thinkSRS.com

Ophyr inc., Руководство пользователя, http://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/3A-P-THz_3A-FS_3A-P-FS-12_0.pdf

Lasnix, 98 Lasers & Applications September 1984, Design Ideas, Infrared Attenuator Uses Diffraction Principle, by F. Keilmann and K.W. Kussmaul]

Tydex, ИК- поляризаторы, http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/IR_polarizers.pdf

Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Лазер на свободных электронах (ЛСЭ)	1	FELBE	Длительность импульса 2-10 пс, частота повторе- ния 13 МГц, средняя мощность – 1 Вт Длина волны излучения 4-200 мкм
Синхродетектор	2	Standford Research SR-830	Диапазон частот: 1мГц- 102.4 кГц Динамический диапазон >100 dB Стабильность 5 ppm/°C Разрешение по фазе не менее 0.01 градуса Постоянная времени 10 мксек - 30 ксек Встроенный источник Интерфейс GPIB и RS- 232
Ослабитель пучка	1	Lasnix	Диапазон частот 50-200 мк Величина ослабления: 3- 38 dB
Поляризатор	1	Tydex	Полоса пропускания 8- 200 мкм Отношение сигналов на перпендикулярных поля- ризациях – не хуже 0.01
Персональный компьютер	1		Операционная система Windows XP или выше, наличие USB/RS-232 порта
Проточный гелиевый оптический криостат	1	Janis ST-100	Прозрачность окон в диапазоне 50-200 мкм
Контроллер температуры	1	LakeShore 310	Диапазон изменения и контроля температуры 4- 300 К
Измеритель мощности	2	Ophyr 3A-P-THz	0.3-10 ТГц, 15 мкВт – 3 Вт
автоматизированная линию за- держки	1	Newport, Модель M-ILS250PP	диапазон перемещения 25 см, точность - 1 мик-

			рон, скорость до 50 мм/с, шаговый двигатель, контроллер с выходом на РС.
--	--	--	--

ПРОТОКОЛ

название

№ ____

дата.

1. Объект испытания:
2. Цель испытания:
3. Дата начала испытания:
4. Дата окончания испытания:
5. Место проведения испытания:
6. Средства проведения испытаний
7. Результаты
8. Выводы

Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

Метод проведения измерений

Методика измерения времен быстропротекающих процессов методом пробного импульса при внутрицентровом возбуждении основана на эффекте модуляции коэффициента поглощения среды, вызванной коротким импульсом (время импульса много меньше характерных релаксационных времен в системе) лазерного излучения. Регистрация динамики восстановления оптических свойств среды измеряется посредством пробного импульса, который имеет те же характеристики (частота, длительность), что и возбуждающий систему импульс, но гораздо меньшей мощности – не способной заметным образом изменить среду. Для реализации эксперимента по измерению методом пробного импульса необходимо осуществить сведение пучком накачивающего (Pump) и пробного (Probe) импульсов в исследуемом образце (см. рисунок 45).

Накачивающий импульс переводит исследуемую среду в возбужденное состояние в области засветки среды лазерным излучением, тем самым изменяя коэффициент поглощения в ней. Пробный импульс на той же частоте следует с некоторой задержкой от накачивающего импульса. Изменяя время задержки между pump и probe импульсами и измеряя мощность прошедшего через образец пробного импульса в зависимости от времени задержки, измеряется время восстановления оптических свойств среды (коэффициент поглощения). Время восстановления коэффициента поглощения в среде отражает времена релаксационных процессов в ней. Зависимость прошедшего через исследуемый образец мощности пробного импульса от времени задержки между pump и probe импульсами называется pump-probe сигналом.

На установке по измерениям такого типа в центре Гельмгольца (HZDR, Германия) базе ЛСЭ FELBE для сведения пучков практикуется использование для настройки в качестве образца графена, который имеет очень маленькую толщину, и наличие pump-probe сигнала на графеновом образце гарантирует условие сведения пучков с хорошей точностью.

Существуют различные варианты геометрии pump-probe измерений: направления распространения лучей накачивающего и зондирующих импульсов перпендикулярны или почти параллельны (под небольшим углом). При ортогональной геометрии лучей легче исключить попадание на детектор излучения pump импульса, с другой стороны, в случае, когда лучи распространяются под небольшим углом, легче осуществляется условие сведения лучей в исследуемом образце. В последнем варианте для исключения попадания на детектор излучения накачивающего импульса используют перпендикулярные поляризации pump и probe импульсов, и перед детектором ставят

поляризатор. Именно такая схема используется в установке на базе ЛСЭ FELIX (Наймеген, Нидерланды) (рисунок 47).

На рисунке 47 He-Ne лазер используется для юстировки оптической схемы установки. В данной схеме кроме pump и probe импульсов присутствует reference импульс, который отстроен от probe на 20 нс, что должно превышать времена всех релаксационных процессов в системе. Сигнал на детекторе после прихода на него пробного импульса сравнивается с сигналом от reference импульса – балансная схема регистрации модуляции поглощения в среде. ЛСЭ генерирует последовательность импульсов, которые посредством делителей (beam splitter) разделяется на последовательность probe и reference импульсов, которые сдвинуты друг относительно друга на 20 нс, и последовательность pump импульсов, сдвиг которых относительно пробных импульсов может изменяться посредством линии задержки. Отсчет времени в pump-probe сигнале начинается со времени прихода на образец накачивающего pump импульса. Схема временных сдвигов между последовательностями импульсов проиллюстрирована на рисунке 48. Временные сдвиги между импульсами осуществляются посредством линий задержки. Сдвиг probe импульса относительно импульса накачки регулируется с помощьюдвигающегося зеркала RetroR1 (см. рисунок), сдвиг reference импульса осуществляется с помощью стационарного зеркала M6. Регистрация pump-probe сигнала производится с помощью охлаждаемого до температур жидкого гелия Ge:Ga детектора. Особенность установки на базе ЛСЭ FELIX в том, что микроимпульсы (pump, probe, reference) следуют непрерывно, они объединены в макроимпульсы длительностью $\sim(5-10)$ мкс. Этот факт обуславливает необходимость балансной схемы регистрации модуляции поглощения в среде. Мощность pump-макроимпульса $\sim(150 - 400)$ μJ в зависимости от диапазона, probe-макроимпульса – приблизительно в 20 раз меньше. В случае исследования динамики возбужденных состояний мелких примесных центров в полупроводниках методом пробного импульса, частоту излучения ЛСЭ подбирают равной частоте перехода из основного состояния примеси в какое-либо возбужденное состояние, время жизни которого исследуется. Эксперимент проводится при температурах близких к температуре жидкого гелия, чтобы все примесные центры в отсутствие оптического возбуждения находились в основном состоянии. Когда часть примесных центров под действием pump импульса переходит в возбужденное состояние, уменьшается коэффициент поглощения, и пробный импульс проходит через среду, поглощаясь слабее.

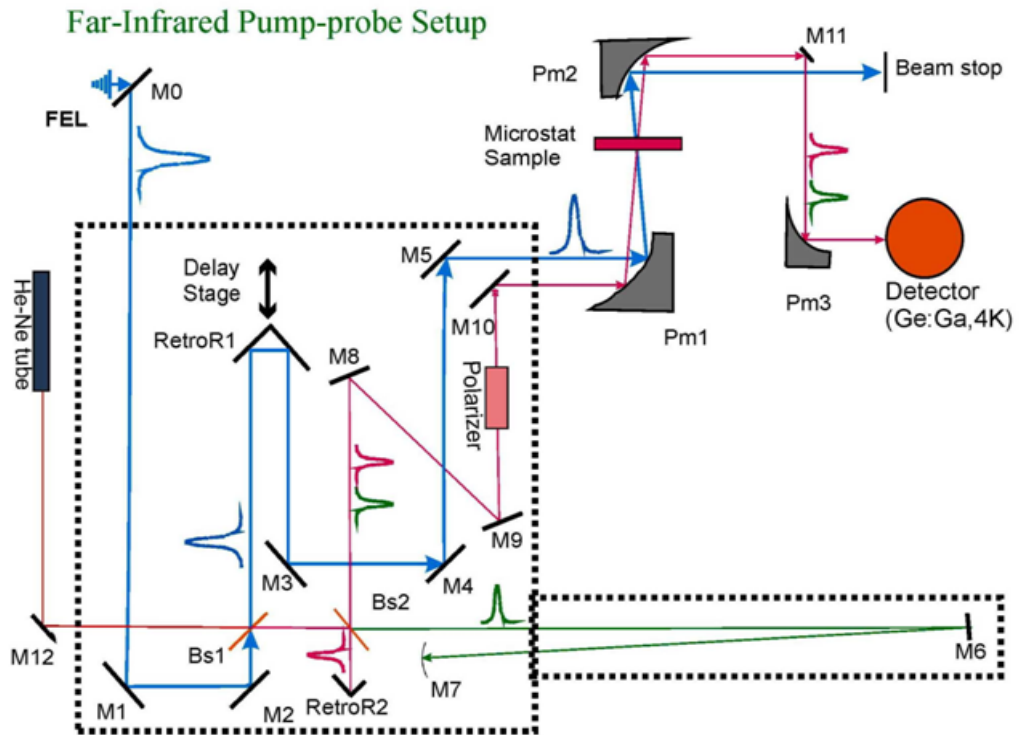


Рисунок 47 – Схема установки по измерениям методом пробного импульса на базе ЛСЭ

По мере возвращения примесных центров в основное состояние за счет различных механизмов релаксации в среде, происходит восстановление поглощения в среде.

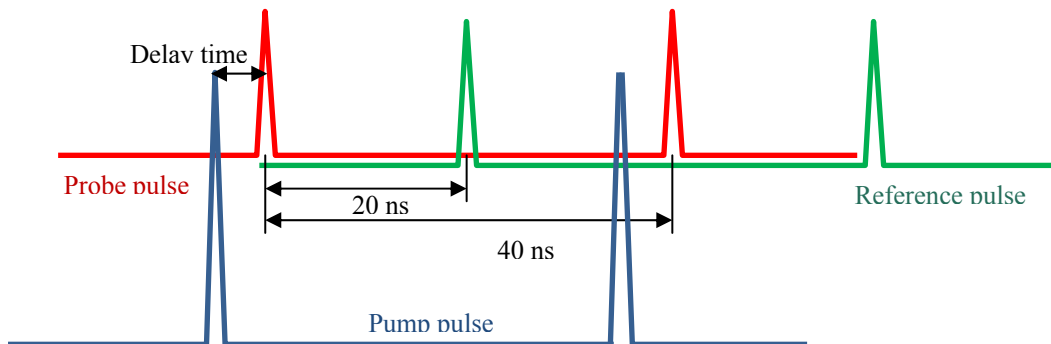


Рисунок 48 – Иллюстрация временных сдвигов между последовательностями импульсов

Одноосная деформация исследуемого кристалла приводит к изменению энергий и волновых функций состояний примесных центров, и, как следствие, изменяются и их темпы релаксации, что сказывается на форме pump-probe сигнала. В полупроводниках n-типа изменение состояний донорных центров связано со сдвигом долин зоны проводимости, вследствие чего происходит изменение вклада различных долин в волновую функцию примесного состояния. В полупроводниках p-типа деформация приводит к относительному сдвигу подзон валентной зоны, изменяя тем самым структуру и энергию акцепторных состояний.

Для осуществления одноосной деформации образца используется модуль давления, который имеет достаточно компактные размеры и позволяет поместить его в оптический криостат. Модуль обеспечивает возможность осуществлять одноосное сжатие образца и фиксировать это давление на достаточно продолжительное время для проведения эксперимента, так же обеспечивать возможность ввода и вывода излучения.

Приложение Ж

Акт работ и с использованием вычислительного Кластера ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Приложение 3

Акт и протокол работ по спектроскопии насыщения на примесных переходах в кристалле германия

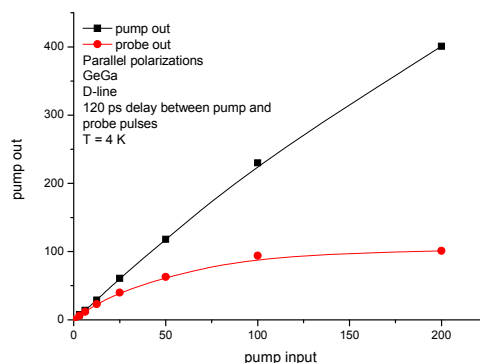
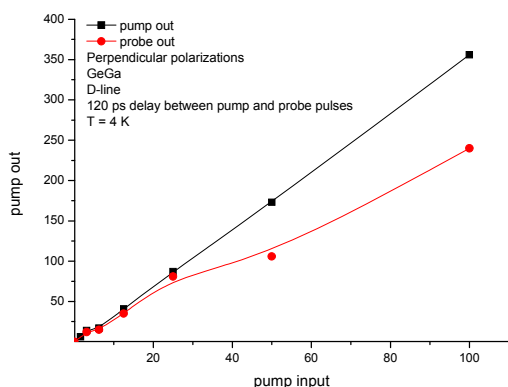
ПРОТОКОЛ
РАБОТ ПО СПЕКТРОСКОПИИ НАСЫЩЕНИЯ НА ПРИМЕСНЫХ ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНИЯ

№ 4 02.12.2016

1. Объект: Образец кристаллического германия, легированный акцепторами галлия
2. Цель: Оценка времени релаксации неравновесных состояний мелких примесей в кристалле германия методом проведения спектроскопии насыщения
3. Дата начала испытания: 28.11.2016
4. Дата окончания испытания: 02.12.2016
5. Место проведения испытания:
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
6. Средства проведения испытаний:
Новосибирский лазер на свободных электронах и оборудование ЦКП Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения

7. Результаты

Проведены работы по спектроскопии насыщения в кристалле германия, легированного акцепторами галлия. В качестве исследуемого перехода была выбрана D линия акцепторного центра. Измерения позволяют провести оценку времени релаксации рассматриваемого состояния.



8. Выводы

Результаты работ соответствуют план-графику и требованиям технического задания и достигают поставленных целей.

Ответственный исполнитель
электроник ИФМ РАН

С.М. Сергеев

Приложение И

Методика спектроскопии насыщения на примесных переходах в кристалле германия

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ РАН

З.Ф. Красильник

«27» декабря 2016 г.

**МЕТОДИКА СПЕКТРОСКОПИИ НАСЫЩЕНИЯ НА ПРИМЕСНЫХ
ПЕРЕХОДАХ В КРИСТАЛЛЕ ГЕРМАНИЯ**

ИФМ.2.2016.ПМ4

От Получателя субсидии:

Руководитель проекта _____ В.Н. Шастин

Исполнитель _____ Д.В. Юрасов

_____ М.Л. Орлов

Условные обозначения и сокращения, принятые в тексте

ЛСЭ – лазер на свободных электронах

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение опытного образца продукции (далее – объект испытаний):

Образцы кристаллического германия, легированные мелкими примесными центрами.

1.2. Цель испытаний:

проведения спектроскопии насыщения в легированном мелкими примесями кристалле германия на резонансной частоте примесного перехода, что дает информацию о временах релаксации в системе;

1.3 Условия предъявления объекта испытаний на испытания:

1.3.1 Испытания проводятся на образцах кристаллического германия, легированных мелкими примесными центрами.

1.3.2 Объект испытаний предъявляется на испытания в сопровождении следующих документов: настоящая методика.

1.4 *Получатель субсидии* взаимодействует в процессе проведения работ по спектроскопии с представителями Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Место проведения испытаний

2.1.1. Испытания при внутрицентровом возбуждении проводятся на базе Новосибирского ЛСЭ в Института ядерной физики им. Г.И. Будкера.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

2.2.1 Измерения при внутрицентровом возбуждении производятся с использованием излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ)

2.2.2 Средства измерений, может быть заменено другим, обеспечивающим требуемую точность измерений.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний (предварительной обработке исследуемых образцов)

2.3.1 Измерения проводятся на достаточно тонких образцах, чтобы обеспечить возможность регистрации прошедшего через образец излучения источника

2.3.2 Образцы должны иметь не плоскопараллельные грани (клиновидную форму), чтобы исключить влияние эффектов переотражения излучения источника.

2.3.3 Объект испытаний охлаждается до температур, близких к температуре жидкого гелия.

3. Требования безопасности

При подготовке и проведении испытаний необходимо выполнять правила по работе с электроустановками, источниками лазерного излучения и сжиженными газами в соответствии с действующими внутренними инструкциями и стандартами ГОСТ 12.1.019-79 (переиздан в 1996 г.) по электробезопасности, ГОСТ 17518-79 по транспортировке жидких газов, ГОСТ 12.1.044-89 по пожаровзрывобезопасности, ГОСТ Р 50723-94 при эксплуатации лазерных изделий.

4. Программа испытаний

Определяемые показатели и точность их измерений:

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методики
4.1	Проверка соответствия объекта испытаний требованиям ТЗ	3.6				6.1
4.2	Измерение спектра поглощения исследуемого образца		Вт, 1/см	1 нВт ÷ 1 мкВт, 10 ÷ 5000 (1/см)	1 %, 0.2/см	6.2
4.3.1	Юстировка оптической схемы					6.3.1
4.3.2	Откачка оптического криостата и охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия (4.2 °К)		К	4.2 К	0.5 К	6.3.2
4.3.3	Проведение измерений по спектроскопии насыщения		Вт, пс	0 ÷ 1 Вт, 0 ÷ 1500 пс	1 % по мощности, 10 пс	6.3.3

5. Режимы испытаний

5.1 Порядок испытаний

Для проведения испытаний руководителем работ по проекту назначаются исполняющие измерительных работ.

Измерения проводятся в соответствии с планом-графиком работ.

5.2 Ограничения и другие указания, которые необходимо выполнять на всех или на отдельных режимах исследований.

Измерения прекращаются в случаях:

несоответствия получаемых результатов требованиям ТЗ;

возникновения аварийных ситуаций;

5.3. Измерение абсолютной падающей мощности в пучках импульсов ЛСЭ.

5.7 Измерение абсолютной прошедшей через образец мощности излучения ЛСЭ.

6. Методы измерений

6.1 Проверка по п. 4.1. Программы выполняется следующим образом.

Проверяется соответствие параметров образцов требованиям ТЗ.

Объект испытаний считается выдержавшим проверку, если он соответствует ТЗ.

6.2 Работы по пункту 4.2.1 производятся с использованием Фурье спектрометра с разрешением не более 0.2 1/см.

6.3.1 Юстировка оптической схемы осуществляется с помощью He-Ne лазера, а так же методом поиска максимальной модуляции прошедшего через образец зондирующего импульса.

6.3.2 Охлаждение исследуемых образцов до температуры жидкого гелия в соответствии с пунктом программы происходит с использованием проточного оптического криостата.

6.3.3 Работы по спектроскопии насыщения в кристалле германия по пункту программы 4.3.3 происходит в соответствии с приложением ТЗ.Г настоящей методики.

7. Отчетность

По завершению измерений составляется акт о проведенных работах, а так же протокол измерений, включающий в себя все первичные данные измерений. Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение ТЗ.А	Перечень ссылочных документов
Приложение ТЗ.Б	Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний
Приложение ТЗ.В	Типовая форма протокола испытаний
Приложение ТЗ.Г	«Программа и методики обязательного вида испытаний»

Перечень ссылочных документов

Ophyr inc., Руководство пользователя, http://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/3A-P-THz_3A-FS_3A-P-FS-12_0.pdf

Tydex, ИК- поляризаторы, http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/IR_polarizers.pdf
http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell

Standa, http://vicon-se.ru/catalog/motorizovannye_pozicionery_i_kontrollery_nanopozicionery/linejnye_translyatory/motorizovannyj_linejnyj_translyator_s_bolshim_hodom/

Перечень средств измерений и испытательного оборудования,
необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Лазер на свободных электронах (ЛСЭ)	1	Новосибирский ЛСЭ	Длительность импульса 50-150 пс, частота повто- рения 6 МГц, средняя мощность – 10 Вт Длина волны излучения 90-240 мкм
Синхродетектор	2	Standford Research SR-830	Диапазон частот: 1мГц- 102.4 кГц Динамический диапазон >100 dB Стабильность 5 ppm/°C Разрешение по фазе не менее 0.01 градуса Постоянная времени 10 мксек - 30 ксек Встроенный источник Интерфейс GPIB и RS- 232
Поляризатор	1	Tydex	Полоса пропускания 8- 200 мкм Отношение сигналов на перпендикулярных поля- ризациях – не хуже 0.01
Персональный компьютер	1		Операционная система Windows XP или выше, наличие USB/RS-232 порта
Проточный гелиевый оптический криостат	1	Janis ST-100	Прозрачность окон в диапазоне 50-200 мкм
Контроллер температуры	1	LakeShore 310	Диапазон изменения и контроля температуры 4- 300 К
Измеритель мощности	2	Ophyr 3A-P-THz	0.3-10 ТГц, 15 мкВт – 3 Вт
Детектор	2	Ячейка Голея, GC- 1P, Tydex	Диапазон длин волн 15 ÷ 8000 мкм, чувстви- тельность 10^{-5} Вт, скорость отклика 20 мс

Камера для визуализации светового пятна.	1	Камера микрометрическая	чувствительность до 1 мВт, время отклика до 10 мс
автоматизированная линия задержки	1	Standa, Модель 8MT195	диапазон перемещения 75 см, точность - 12 микрон, шаговый двигатель, контроллер с выходом на РС.

ПРОТОКОЛ

название

№ ____

дата.

1. Объект испытания:
2. Цель испытания:
3. Дата начала испытания:
4. Дата окончания испытания:
5. Место проведения испытания:
6. Средства проведения испытаний
7. Результаты
8. Выводы

Протокол подписывается непосредственными исполнителями работ.

Облучение образца интенсивным монохроматическим резонансным лазерным излучением вызывает изменение населенности уровней энергии и, как следствие, изменение в характере зависимости поглощения (увеличение или уменьшение поглощения на данной частоте). Простейшая двухуровневая модель при таком подходе должна давать просветление, когда скорость возбуждения начнет по порядку величины быть сравнимой с темпом релаксации возбужденного уровня. В случае реальной системы такой подход необходимо скорректировать, принимая во внимание наличие других резонансных или нерезонансных переходов для носителя заряда, находящегося в возбужденном состоянии. Вторым важным фактором является фактор сечения перехода. В случае, если сечение перехода на следующем шаге возбуждения превышает сечение на накачиваемом с основного состоянии, то возможно также и увеличение поглощения. В противном случае должно наблюдаться просветление.

Схема эксперимента похожа на схему измерения времен релаксации в системе методом пробного импульса за исключением того, что время задержки между накачивающим и пробным импульсом не меняется и поляризации электрического поля в этих импульсах должны быть параллельны. Положение линии задержки выстраивается таким образом, чтобы два импульса излучения ЛСЭ были сдвинуты во времени приблизительно на величину длительности импульса, что позволяет получить один импульс с удвоенной длительностью. Это необходимо, чтобы длительность импульса превышала время релаксации измеряемого состояния. В качестве проверки можно использовать изменение поляризации во втором пучке, что должно привести к изменению наблюдаемой картины ввиду того, что свет с перпендикулярной поляризацией не должен взаимодействовать (в первом приближении) с возбужденными атомами. Таким образом, необходимо снять зависимость прошедшей через исследуемый образец мощности от падающей мощности. Точка перегиба должна определить время релаксации исходя из знания сечений переходов, участвующих в процессе и величины плотности светового потока. Плотность светового потока вычисляется на основе знания измеренной с помощью ваттметра средней мощности ЛСЭ, измеренной с помощью камеры-визуализатора площади светового пятна на образце, величины энергии кванта излучения, длительности импульса излучения, периода повторения импульсов излучения. Сечения для участвующих в процессе переходов, в общем случае, берутся из литературы, измеряются или рассчитываются в приближении первого порядка теории возмущений. Длительность импульса может быть измерена на основе интерференции двух сходящихся на поверхности когерентных пучков или с использованием функции автокорреляции.