

На правах рукописи



Забегаев Дмитрий Николаевич

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВЕРХБЫСТРЫХ
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОВ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ**

1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: **Черепенин Владимир Алексеевич**
доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий лабораторией математических методов в радиофизике и биомедицине ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Официальные оппоненты: **Зайченко Кирилл Вадимович**
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией радио- и оптоэлектронных приборов биоинформационных и геномных технологий ранней диагностики патологий живых систем ИАП РАН

Захаров Петр Николаевич
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Микроволновая Электроника»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита диссертации состоится 14 июня 2024 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Zabegaev/disser.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.111.02,
доктор физико-математических наук,



Кузьмин Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Мировые тенденции в области развития оптики, оптического приборостроения и оптического материаловедения в последние годы претерпели значительные изменения. Сегодня слово «фотоника» занимает первое место по популярности в рейтинге новых оптических терминов. Согласно словарю терминов «Фотоника», изданным Российской академией наук, это наука о способах генерации и практического использования света и других форм энергии излучений, квантовой единицей которых является фотон [1]. Фотоника вписана в приоритетные направления развития науки и техники многих ведущих стран. В этих странах под фотонику разрабатываются государственные стратегические программы развития на 10-20 лет.

Сегодня фотоника – не только новейшая наука и технология. Фотоника рассматривается и как направление бизнеса: тысячи высокотехнологичных компаний работают в этом секторе. Рынок фотоники начинает конкурировать с традиционным оптическим рынком и по прогнозам должен через 5-10 лет догнать рынок электроники.

Ключевой составной частью фотоники являются, в частности, оптоэлектроника и радиофотоника. С момента создания лазеров, способных генерировать мощные сверхкороткие (пико- и фемтосекундные) световые импульсы, в оптоэлектронике стали появляться новые области исследования, связанные с возможностью применения таких импульсов для прямых измерений характеристик быстрых процессов.

В основе таких измерений лежит быстрое оптическое возбуждение системы с помощью мощного сверхкороткого импульса, приводящее к отклонению системы от состояния равновесия, а затем прямое наблюдение временной эволюции системы. Такие наблюдения потребовали значительных преобразований в технике сверхбыстродействующих оптических и электронных регистрирующих устройств.

Стремительное развитие областей информационных технологий и микроэлектроники дало в свою очередь возможность реализовать эффективное управление сложными измерительными устройствами даже с помощью персонального компьютера, а также оперативно осуществлять сбор и обработку большого количества измеряемых физических величин, в том числе непосредственно во время измерений в режиме реального масштаба времени (on-line).

Применение пико- и фемтосекундных оптических импульсов для исследования сверхбыстрых процессов в полупроводниках и полупроводниковых гетероструктурах является перспективным направлением исследований современной науки. Это связано с возможностью их использования в устройствах сверхбыстродействующей

оптоэлектроники, что уже подтверждено на примере создания оптических процессоров [2-3], детекторов сверхкоротких оптических импульсов [4], оптоэлектронных ключей [5], полупроводниковых лазеров [6-7].

Цели и задачи работы

Целью данной диссертационной работы является создание системы управления модернизированным лазерным пикосекундным спектрофотохронметрическим комплексом, а также проведение исследований сверхбыстрых оптоэлектронных процессов, происходящих в тонком (~ 1 мкм) слое GaAs, накачиваемом мощным пикосекундным импульсом света.

Для достижения поставленных целей потребовалось решение следующих задач:

1. Создание программного и аппаратного обеспечения, реализующего взаимодействие управляющего персонального компьютера с исполнительными механизмами и измерительными компонентами лазерного комплекса через устройство сопряжения.
2. Определение наличия влияния космических лучей на спектры измеряемых импульсов и удаление их из серии измерений.
3. Разработка и реализация алгоритма устранения эффекта джиттера при проведении измерений хронограмм выделенной спектральной компоненты измеряемого импульса, называемых в дальнейшем хронограммами.
4. Оптимизация работы оптических усилителей.
5. Разработка и реализация алгоритма измерения диаметра луча лазерного импульса.
6. Проведение измерений спектров и хронограмм излучения GaAs под действием импульса накачки.

Научная новизна

1. В диссертации реализован оригинальный алгоритм устранения джиттера при проведении измерений хронограмм выделенных спектральных компонент импульса. Алгоритм основан на математической обработке массивов данных, сводящейся к нахождению и совмещению «средних линий» изображений хронограмм.

2. С помощью разработанной вычислительной системы сбора и обработки измеряемых величин были впервые проведены прямые экспериментальные измерения собственного стимулированного пикосекундного излучения в GaAs при мощной оптической накачке. Было обнаружено, что интенсивность излучения возрастает с пикосекундной задержкой относительно фронта пикосекундной накачки. При спаде накачки интенсивность излучения релаксирует с характерным временем порядка 10 пс.

Были получены зависимости времени задержки, времени релаксации, длительности пикосекундного импульса излучения от энергии его фотона.

3. Обнаружена бистабильность автомодуляции спектра стимулированного пикосекундного излучения, возникающая при пикосекундной оптической накачке GaAs. На фронте импульса излучения в его спектре выделился один набор эквидистантных мод. На спаде излучения его заменил набор мод, расположенных в спектре посередине между первым. Выявленная бистабильность разъяснила физическую природу двух состояний обеднения заселенностей, вызванного излучением, между которыми ранее были обнаружены субтерагерцевые автоколебания в поле этого же излучения.

Практическая ценность работы

Диссертация посвящена созданию компьютерной системы управления работой лазерного пикосекундного спектрофотохрометрического комплекса и проведению исследований явления собственного стимулированного пикосекундного излучения в GaAs с помощью этого комплекса.

Информация, полученная в результате исследований, может быть полезна при разработке новых устройств сверхбыстродействующей полупроводниковой оптоэлектроники, для которых характерна высокая интенсивность стимулированного излучения. К числу таких устройств можно отнести мощные полупроводниковые лазеры и суперлюминесцентные диоды, оптически управляемые пикосекундные модуляторы прозрачности и т.д.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально обнаружено, что в GaAs интенсивное излучение возникает с пикосекундной задержкой относительно фронта мощной пикосекундной оптической накачки. Длительность импульса излучения сравнима с длительностью накачки. Задержка разгорания, длительность излучения и характерное время его релаксации зависят от энергии фотона излучения.

2. Экспериментально обнаружено, что в слое GaAs при мощной пикосекундной оптической накачке зависимость времени разгорания излучения от энергии его фотона имеет осциллирующую форму.

3. Обнаружена бистабильность автомодуляции спектра стимулированного пикосекундного излучения, возникавшего при пикосекундной оптической накачке GaAs. На фронте импульса излучения в его спектре выделился один набор эквидистантных мод. На спаде излучения его заменил набор мод, расположенных в спектре посередине между

первым. Внутри каждого набора интервал между модами совпадал с расчетным интервалом между собственными модами являющегося активным резонатором слоя GaAs.

4. Подвергающийся мощной пикосекундной оптической накачке слой GaAs в гетероструктуре $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As} - \text{GaAs} - \text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ даже без учета отражения излучения от ее торцов может обладать в определенной степени качества лазера. Это проявляется в выделении отдельных спектральных мод и равенстве расстояния между ними на спектре в эксперименте и при численном расчете для активного резонатора.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно создано программное обеспечение для управления ходом эксперимента на лазерном пикосекундном спектрофотометрическом комплексе, разработан и реализован алгоритм определения присутствия в измеряемых спектрах импульсов космических лучей, разработан и реализован алгоритм устранения эффекта джиттера при измерении огибающих (хронограмм) выделенной спектральной компоненты измеряемого импульса, реализовано программное управление работой источников питания оптических усилителей с возможностью автоматической поддержки значений интенсивности излучения в оптических каналах в заданном диапазоне, создано программное обеспечение, которое на основе анализа потокового видео с веб-камеры, измеряет параметры пикосекундных лазерных импульсов.

При помощи разработанной информационно-аналитической системы автором совместно с коллегами из ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН были проведены экспериментальные исследования пикосекундных разгорания и релаксации интенсивного стимулированного излучения GaAs и анализ полученных результатов, а также получен результат экспериментальных исследований бистабильности автомодуляции спектра собственного стимулированного пикосекундного излучения GaAs.

Апробация результатов

Результаты исследований, вошедших в диссертационную работу, были представлены на международных и российских конференциях:

- “The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010)” (Seoul, Korea, 2010),
- “The International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (NOEKS10)” (Paderborn, Germany, 2010),
- “29th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics including 1st Workshop on Advanced Sensing and Imaging” (Morioka, Japan, 2010),

- “Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)” (Munich, Germany, 2011),
- “The 30th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP-30)” (Pretoria, South Africa, 2012),
- “XI Российская конференция по физике полупроводников” (Санкт-Петербург, 2013),
- “XII Российская конференция по физике полупроводников” (Звенигород, 2015),
- 38 научно-технический семинар “Радиотехнические и телекоммуникационные системы” (РТУ МИРЭА, Москва, 2023),
- Научно-квалификационный семинар “Генерация электромагнитных колебаний и их применения” (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 2023).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 34 печатных работах, включая 27 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и проиндексированы в РИНЦ, а 6 из них – в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, а также 7 публикаций в сборниках трудов и тезисов конференций.

Структура и объем диссертации

Предлагаемая диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ автора по теме диссертации. Работа содержит 140 страниц, 56 рисунков. Список литературы включает 109 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности выбранной темы работы, формулируются цели и задачи диссертации, показывается научная новизна исследования, а также практическая ценность полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, раскрывается личный вклад автора, демонстрируется апробация результатов, представляется описание объема и структуры диссертационной работы по главам.

В первой главе приводится обзор наиболее важных теоретических и экспериментальных работ, выполненных к моменту начала диссертационных исследований, посвященных изучению динамики неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) GaAs при межзонном поглощении интенсивного сверхкороткого светового импульса.

Начало исследований взаимодействия интенсивной электромагнитной волны с полупроводником на лазерном пикосекундном комплексе, подробно описанном во второй главе диссертации, было положено работами [8, 9]. Основным предметом исследований являлось просветление (увеличение прозрачности) тонких (~ 1 мкм) эпитаксиальных слоев GaAs при облучении мощным импульсом света длительностью 30 пс с энергией фотона $\hbar\omega_{ex}$, близкой к ширине запрещенной зоны E_g . Просветление отображало изменение суммы заселенностей неравновесными носителями заряда энергетических уровней в валентной зоне и в зоне проводимости, связанных прямым оптическим переходом. Было обнаружено, что во время генерации ЭДП создается инверсия заселенностей для фотонов с энергией $E_g < \hbar\omega < \hbar\omega_{ex}$ и аномально быстро возникает интенсивное стимулированное излучение, интерпретированное как рекомбинационная суперлюминесценция.

Ранее предполагалось, что спектры просветления при фотовозбуждении представляют собой плавные кривые благодаря доминированию процессов электрон-электронных взаимодействий. Однако в [10] в спектрах просветления обнаружались локальные минимумы, разделенные интервалами 41 мэВ. Осциллирующий характер просветления наблюдался при различных энергиях фотона $\hbar\omega_{ex} > E_g$ и интегральных энергиях W_{ex} возбуждающего импульса. Спектральное положение минимумов при этом сохранялось неизменным.

Наличие осцилляций в спектре просветления объяснялось следующим. В результате интенсивной рекомбинации на дне зоны проводимости в локальной области энергетических состояний возникает обеднение заселенности электронов. Собственное стимулированное излучение инициирует энергетический поток электронов в область обеднения, который частично идет путем излучения электронами продольных оптических фононов. При этом оказывается, что частота переходов электронов в область обеднения с излучением оптических фононов больше частоты ухода электронов из этой области с поглощением оптического фонона. Это приводит к образованию в зоне проводимости областей обеднения заселенности электронами энергетических уровней. Такие области повторяются с периодом, равным энергии оптического фонона. Такой процесс и объясняет наличие фононных осцилляций.

В цикле обзора работ обнаружено, что при накачке в GaAs под влиянием собственного стимулированного излучения возникает коллективное возбуждение носителей заряда – автоколебания обеднения заселенностей зоны проводимости.

Вторая глава посвящена описанию лазерного пикосекундного спектрофотохронметрического комплекса АК-1, на котором были выполнены экспериментальные исследования. Рассматривается структура комплекса. Дается подробное описание его отдельных компонент.

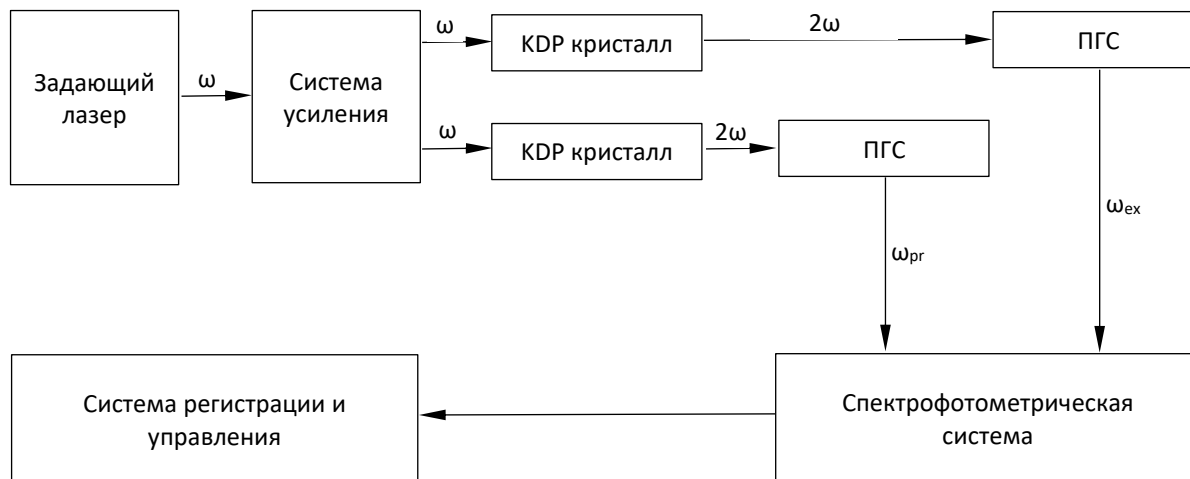


Рис. 1. Структурная схема пикосекундного лазерного комплекса

Структурная схема лазерного пикосекундного комплекса представлена на рисунке 1. Задающий лазер генерирует световые импульсы с частотой 1.4 Гц на длине волны 1064 нм с энергией ~ 0.4 мДж и длительностью ~ 22 пс. Далее импульс попадает в двухступенчатую систему усиления. После прохождения первого оптического усилителя усиленный импульс разделяется на два импульса – возбуждающий и зондирующий. Второй этап усиления каждый из этих импульсов проходит отдельно через разные усилители и в дальнейшем следуют по разным оптическим каналам. Полное увеличение энергии излучения в системе усиления составляет ~ 10².

Далее оба импульса проходят через нелинейные кристаллы KDP, в которых происходит генерация второй гармоники. Выделенные с помощью спектроделителей импульсы второй гармоники осуществляют накачку двух безрезонаторных параметрических генераторов света (ПГС) на LiNbO₃. Длительность импульсов на выходе ПГС ~ 14 пс. Длина волны, генерируемых ПГС импульсов регулируется перестройкой температуры термостата, в который помещен кристалл LiNbO₃. Полный диапазон независимой перестройки длины волны возбуждающего и зондирующего импульсов составляет 660 нм ÷ 2.7 мкм. Специальная оптическая линия задержки осуществляет смещение зондирующего импульса во времени относительно возбуждающего на задаваемую величину.

Импульсы с требуемыми длинами волн, энергиями и величиной задержки друг относительно друга направляются в каналы возбуждения и зондирования

спектрофотометрической системы. По заданной в соответствии с экспериментальной задачей схеме в спектрофотометрической системе производится облучение образца возбуждающим и зондирующим импульсами света. Измерения производятся при комнатной температуре.

Результаты измерений с фотоприемников и ПЗС-камер направляются в систему регистрации и управления, где происходит обработка поступающих данных, отображение измеренных и рассчитанных величин на экран, сохранение данных на информационный носитель компьютера. Так же с помощью системы регистрации и управления производится контроль работы всех исполнительных механизмов, входящих в состав спектрофотометрической системы.

В состав системы регистрации и управления лазерного комплекса АК-1 входит двойной спектрограф SpectraPro-2500i, ПЗС-камера PIXIS, стрик-камера PS-1/S1 и ПЗС-камера CoolSNAP. Такая конфигурация дает возможность проводить измерения интегрального по времени спектра сверхкороткого излучения, а также огибающей (хронограммы) выделенной спектральной компоненты или выделенного спектрального диапазона излучения.

В описываемых в данной работе экспериментальных исследованиях для спектральных измерений использовалась только первая ступень спектрографа. Исследуемое излучение, разложенное в спектр, попадает в ПЗС-камеру «PIXIS», установленную на выходную щель первой ступени спектрографа. Камера «PIXIS» позволяет проводить измерение спектров сверхкороткого оптического излучения с разрешением от 0.3 нм (в диапазоне шириной 160 нм) до 0.05 нм (в диапазоне 30 нм).

При временных измерениях излучения двойной спектрограф работает в режиме вычитания дисперсии. При таком способе измерений длительность компоненты излучения на выходе спектрографа равна длительности на входе. Ориентацией дифракционных решеток спектрографа выделяется требуемая спектральная компонента, а регулировкой щели между двумя ступенями спектрографа – ее ширина. Стрик-камера PS-1/S1, работающая совместно с ПЗС-камерой CoolSNAP, присоединяется ко второй выходной щели спектрографа и позволяет измерять хронограммы выделенных спектрографом компонент пикосекундного светового импульса с разрешением не хуже 2 пс. Джиттер (нестабильность запуска развертки) составляет ± 3 пс и автоматически компенсируется в режиме «online» при накоплении данных с помощью специально разработанного алгоритма, который будет подробно рассмотрен в главе 3.

Основной величиной, измеряемой в экспериментах на лазерном комплексе, является просветление $\lg(T^l/T^0)$ (увеличение оптической прозрачности T) тонкого слоя GaAs под

воздействием возбуждающего излучения (индексы 1 и 0 означают, соответственно, наличие и отсутствие возбуждающего излучения). Просветление демонстрирует изменение заселенности неравновесными носителями заряда энергетических уровней в валентной зоне и в зоне проводимости, связанных оптическими переходами. В экспериментах измеряется зависимость величины просветления $lg(T^1/T^0)$ от различных параметров системы: временной задержки τ_d между зондирующим и возбуждающим импульсами; энергии фотона $\hbar\omega_p$ зондирующего импульса; энергии фотона $\hbar\omega_{ex}$ возбуждающего импульса; интегральной энергии W_p зондирующего импульса; интегральной энергии W_{ex} возбуждающего импульса.

Процесс измерений происходит следующим образом. Перед началом эксперимента экспериментатор задает в программе исходные данные и параметры проведения измерений: начальные положения исполнительных механизмов; диапазон и длину шага сканирования измеряемого параметра; допустимую погрешность измерений; минимально и максимально допустимые величины энергии каждого из опорных импульсов (окна дискриминации), число измерений в одной точке, при котором все выстрелы удовлетворяют условиям дискриминации; порядок работы затвора в канале возбуждения.

Выстрелы, при которых энергия хотя бы одного из опорных импульсов выходит за заданные границы дискриминации, не участвуют в расчете величины просветления. Накопление данных происходит при открытом и закрытом флаге поочередно заданными порциями (обычно по 10 выстрелов). Измерения проводятся автоматизировано в режиме «online» с одновременным отображением промежуточного результата и погрешности его определения. Расчет просветления (увеличения прозрачности) производится по формуле:

$$lg\left(\frac{T^1}{T^0}\right) = lg\left[\frac{(E_{pr}^1/E_r^1)}{(E_{pr}^0/E_r^0)}\right],$$

где E_{pr} и E_r средние значения сигналов зондирующего и опорного лучей соответственно, индексы 1 и 0 означают наличие и отсутствие возбуждения. Эксперимент прекращается либо при достижении заданного среднеквадратичного отклонения измеряемой величины, либо при достижении определенного количества выстрелов, удовлетворяющих условиям дискриминации.

В третьей главе дается описание системы автоматизации работы лазерного комплекса, созданной для обеспечения его эффективного функционирования после проведенной глубокой модернизации аппаратной части. В основе создания системы лежит разработка программного обеспечения, которое можно условно разделить на 3 компонента:

- Компьютерная программа, управляющая работой спектрофотометрической схемы через устройство сопряжения, а также принимающая все измеренные данные с

ПЗС-камер. Кроме того, программа в режиме on-line производит расчеты искомым величин на основании измеренных, осуществляет их вывод на экран и сохранение на информационные носители.

- Компьютерная программа, управляющая работой источников питания оптических усилителей на основании данных, получаемых от программы управления в режиме реального времени.
- Компьютерная программа, проводящая автоматизированные измерения диаметра луча лазерного импульса с использованием web-камеры.

Каждый из этих трех компонентов рассматривается более подробно далее.

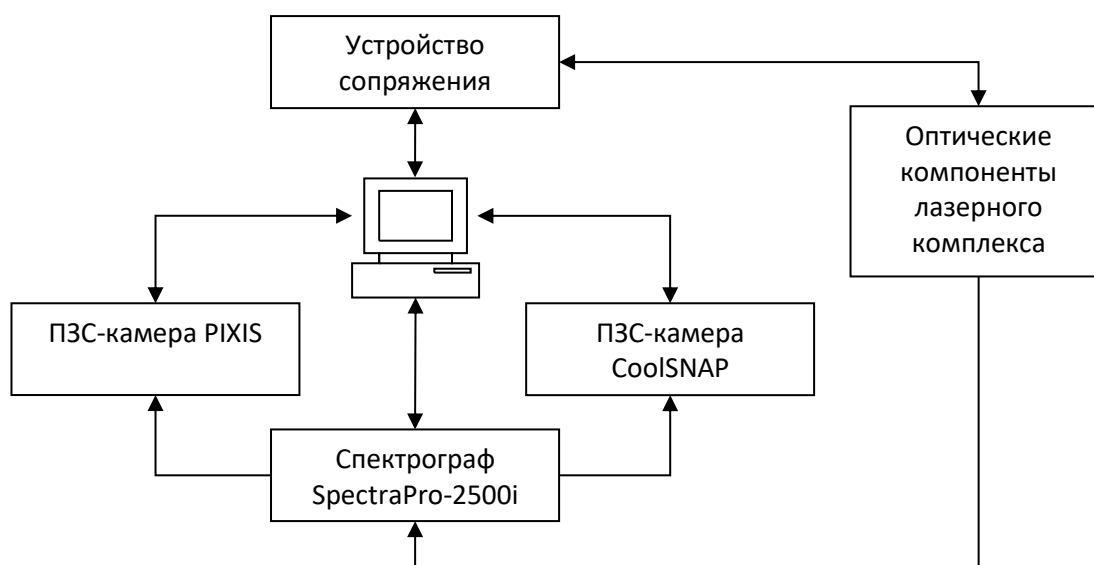


Рис. 2. Схема взаимодействия управляющего компьютера с компонентами лазерного комплекса.

Главная управляющая программа выполняет следующие функции:

1. Считывание цифровых значений напряжений на фотоприемниках.
2. Передача значений рабочих параметров (положений шаговых двигателей, состояний механических затворов) исполнительным механизмам спектрофотометрической системы.
3. Передача параметров измерений и отображений, а также прием данных (оцифрованных спектров и хронограмм) с ПЗС-камер «PIXIS» и «CoolSNAP».
4. Математическая обработка всех полученных данных, вывод результатов на монитор и запоминающие устройства.

На рисунке 2 изображена схема взаимодействия управляющего компьютера с компонентами лазерного комплекса. На схеме видно, что компьютер осуществляет обмен данными непосредственно с четырьмя устройствами: устройством сопряжения, двойным спектрографом SpectraPro-2500i, ПЗС-камерой «PIXIS» и ПЗС-камерой «CoolSNAP».

Задание требуемых значений исполнительным механизмам, а также прием значений напряжений на фотоприемниках производится на персональном компьютере через устройство сопряжения. Связь компьютера с ПЗС-камерами и спектрографом для задания параметров измерений и приема спектров и хронограмм осуществляется непосредственным подключением к этим устройствам.

Вместе с ПЗС-камерами Pixis и CoolSNAP была осуществлена поставка программного продукта WinSpec/32. Он позволяет воспроизводить на экране компьютера как изображение, полученное непосредственно камерой, так и спектральное или временное распределение интенсивности излучения (спектр, либо хронограмму излучения, падающего на светочувствительную матрицу камеры). С помощью этой программы существует возможность производить несложные манипуляции с полученными изображениями: такие, например, как простое суммирование спектров или вычитание из измеряемых спектров (хронограмм) «нулевых» спектров (хронограмм), измеренных и сохраненных в файл ранее. «Нулевыми» спектрами или хронограммами называют изображение сигнала, создаваемого внешним фоном в помещении при отсутствии возбуждающего и измерительного лучей.

Среди встроенных в программу функций, отвечающих за эти манипуляции, отсутствовали многие из необходимых нам для проведения экспериментальных исследований: такие, например, как автоматическое одновременное отображение нескольких экспериментальных кривых в главном окне программы, или определение среднего арифметического значения спектра за серию измерений. Однако, WinSpec/32 содержит обширную библиотеку функций для языка программирования Visual Basic, с помощью которой есть возможность производить необходимые нам манипуляции, во-первых, с параметрами измерения спектров и хронограмм, во-вторых, с параметрами отображения этих данных, и, в-третьих, с самими данными. Поэтому было принято решение создавать программу автоматизации в интегрированной среде разработки Visual Basic 6.0.

Предусмотрено 18 режимов работы программы, объединенных в 5 следующих групп (рисунок 3):

1. Background Modes (режимы: *Background Mode (EMP)*, *Background Mode (CCD Pixis)*, *Background Mode (CCD CoolSnap)*): предназначены для определения средних значений нулевых сигналов. Измеренные значения сохраняются на жесткий диск компьютера и впоследствии вычитаются из измеренных значений для определения истинных величин.

2. Dynamic Modes (режимы: *Dynamic Mode (EMP)*, *Dynamic Mode (CCD Pixis)*, *Dynamic Mode (CCD CoolSnap)*): предназначены для отображения текущих значений

напряжений в опорных и измерительном каналах. Используются для настройки экспериментальной установки и для выбора оптимальных параметров измерений.

3. Work Modes (EMP) (режимы: *Transparency Mode (EMP)*, *Correlation Mode (EMP)*, *Radiation Mode (EMP)*, *Ratio Mode (EMP)*): рабочие режимы при проведении измерений с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ).

4. Work Modes (Pixis) (режимы: *Transparency Mode (CCD Pixis)*, *Correlation Mode (CCD Pixis)*, *Radiation Mode (CCD Pixis)*, *Ratio Mode (CCD Pixis)*): рабочие режимы при проведении измерений с ПЗС-камерой Pixis.

5. Work Modes (CoolSnap) (режимы: *Transparency Mode (CCD CoolSnap)*, *Correlation Mode (CCD CoolSnap)*, *Radiation Mode (CCD CoolSnap)*, *Ratio Mode (CCD CoolSnap)*): рабочие режимы при проведении измерений со стрик-камерой и ПЗС-камерой CoolSnap.

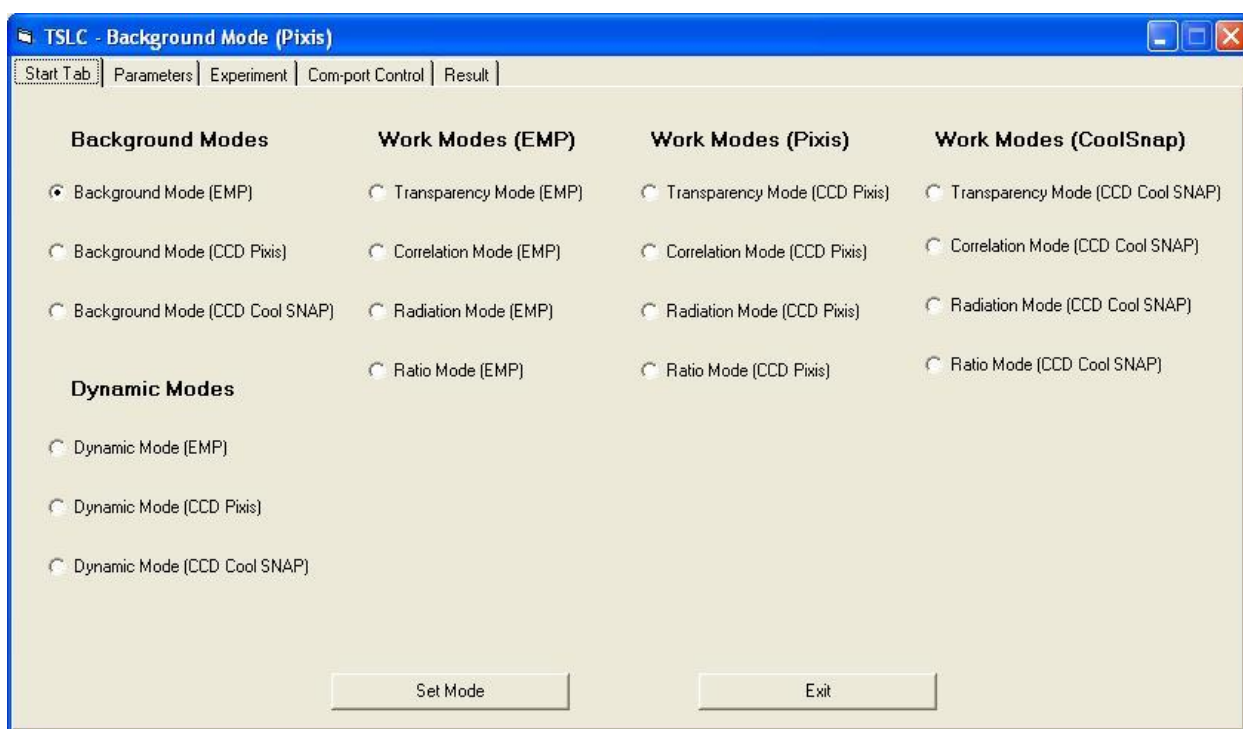


Рис. 3. Интерфейс главного окна программы автоматизации со списком всех режимов работы

«EMP» в названии режима означает, что измерения производятся при помощи фотоэлектронного умножителя, а измеряемой величиной является интегральная по времени интенсивность вырезанной спектральной компоненты излучения. «CCD Pixis» означает, что в измерениях участвует первая ступень спектрографа в связке в ПЗС-камерой «Pixis», а измеряемая величина – спектр падающего излучения. «CCD Cool SNAP» означает, что в измерениях участвуют обе ступени спектрографа в связке со стрик-камерой и ПЗС-камерой «Cool SNAP», а измеряемая величина – хронограмма вырезанной спектральной компоненты излучения.

Рабочие режимы подразделяются на 4 типа: Transparency Mode, Correlation Mode, Radiation Mode и Ratio Mode. В режимах Transparency Mode участвуют два луча: возбуждающий и зондирующий. Измеряется величина просветления образца. В режимах Correlation Mode участвуют также возбуждающий и зондирующий лучи. Измеряется кросскорреляционная функция между ними. В режимах Radiation Mode участвует один луч. Режимы предназначены для измерения параметров излучения. В режимах Ratio Mode участвует также один луч. Режимы предназначены для измерения параметров излучения с поправкой на колебания энергии в опорном канале.

При проведении измерений с ФЭУ экспериментатор использует только основную программу управления экспериментом для наблюдения за значениями напряжений в опорных и измерительном каналах. При проведении измерений с ПЗС-камерой Pixis или стрик-камерой в связке с ПЗС-камерой CoolSnap экспериментатор использует основную программу для наблюдения за значениями напряжений в опорных каналах и программу WinSpec для наблюдения за спектрами либо хронограммами измеряемых импульсов.

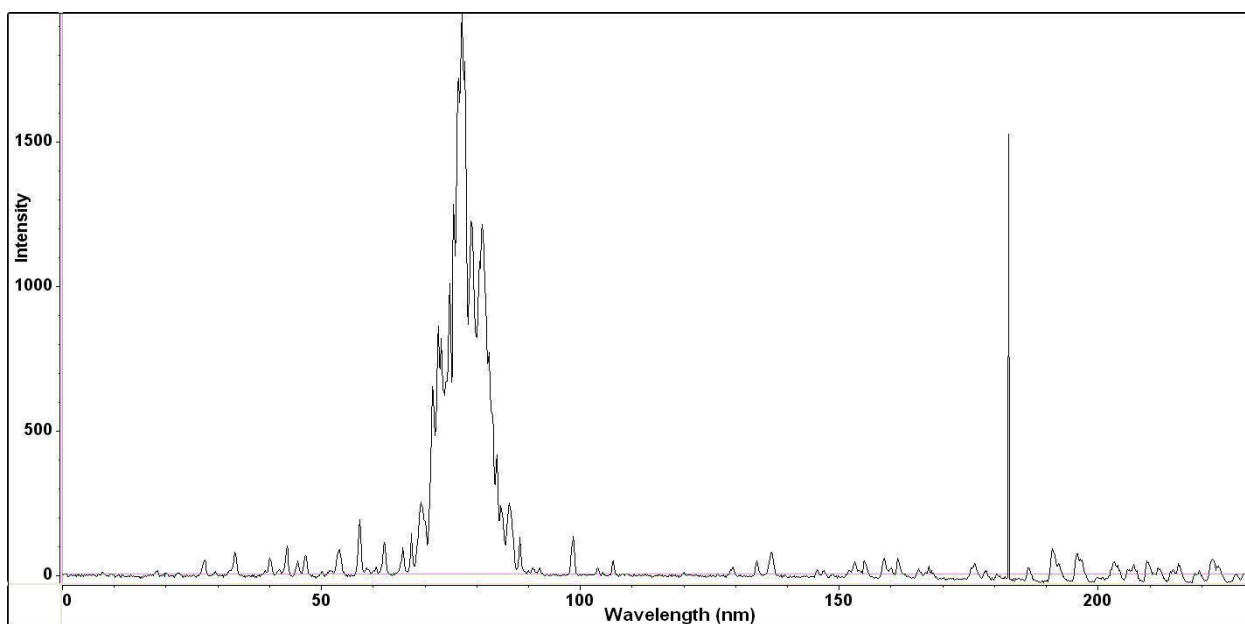


Рис. 4. Спектр импульса, содержащий космический луч

В процессе создания программы автоматизации возник ряд проблем, требующих решений. Одной из таких проблем стало наличие изображений космических лучей на спектрах. Космическими лучами называются элементарные частицы и ядра атомов, движущиеся с высокими энергиями в пространстве. Известна способность космических лучей взаимодействовать с кристаллом микросхемы CMOS/CCD-матрицы. Существуют как любительские, так и профессиональные научные проекты, целью которых является детектирование космических лучей с помощью бытовых фото-видеокамер, в том числе даже с помощью камер пользовательских смартфонов. В нашем случае способность космических лучей взаимодействовать со светочувствительной матрицей ПЗС-камеры Pixis

приводит к негативному эффекту. Результатом такого взаимодействия является присутствие узких высоких пиков в произвольном месте изображения спектра импульса. На рисунке 4 показан пример спектра импульса, в правой части которого присутствует такой острый пик.

Негативное влияние этих пиков может быть весьма заметным даже с учетом усреднения спектра по большому числу выстрелов. В связи с этим возникла идея анализировать каждый спектр на предмет наличия космического луча, и не учитывать «плохие» спектры в расчетах.

Для этого была разработана подпрограмма, сравнивающая в процессе измерений попиксельно каждый измеряемый спектр с усредненным спектром за все прошедшие выстрелы текущего эксперимента. Специальный алгоритм определяет наличие узких

высоких пиков в тех точках горизонтальной оси спектра текущего выстрела, в которых их не наблюдается на усредненном спектре. Спектры, содержащие такие пики, не участвуют в дальнейших расчетах.

Другое серьезное препятствие возникло в процессе измерения хронограмм излучения. Проблема заключается в наличии случайных отклонений положений фронтов измеряемых импульсов по оси времени. Такие отклонения называются джиттером. Их величина составляла в нашем случае около ± 5 пс. Основными причинами джиттера являются нестабильность амплитуды и формы импульса, запускающего развертку электронно-оптической камеры (ЭОК), нестабильность задержки запускающего импульса при его прохождении через элементы цифровых микросхем, задержка импульса и его затухание при прохождении по кабелям и т.д.

При измерении формы усредненной хронограммы требуется суммирование хронограмм за большое количество выстрелов. Джиттер приводит к несовпадению положений фронтов на оси времени. Тем самым простое суммирование привело бы к уширению усредненной хронограммы и к искажению ее истинных параметров. Такой процесс искажения (уширения) формы сверхкороткого светового импульса не несет в себе физического смысла и, следовательно, простое суммирование не подходит для определения формы хронограммы. Для проведения корректной обработки измеренных хронограмм возникла необходимость устранения эффекта джиттера. С этой целью был разработан способ устранения джиттера, основанный на математической обработке измеренных хронограмм.

Суть разработанного алгоритма заключается в совмещении хронограмм импульсов по вертикальной линии, условно делящей площадь под графиком каждого импульса на некотором заданном диапазоне на две равные части. Сначала из всего измеренного диапазона вырезается участок, содержащий исследуемый импульс. Затем вычисляется площадь под графиком импульса на данном участке. После чего находится положение вертикальной линии, делящей рассчитанную площадь пополам. По этой вертикальной линии происходит совмещение всех измеренных хронограмм.

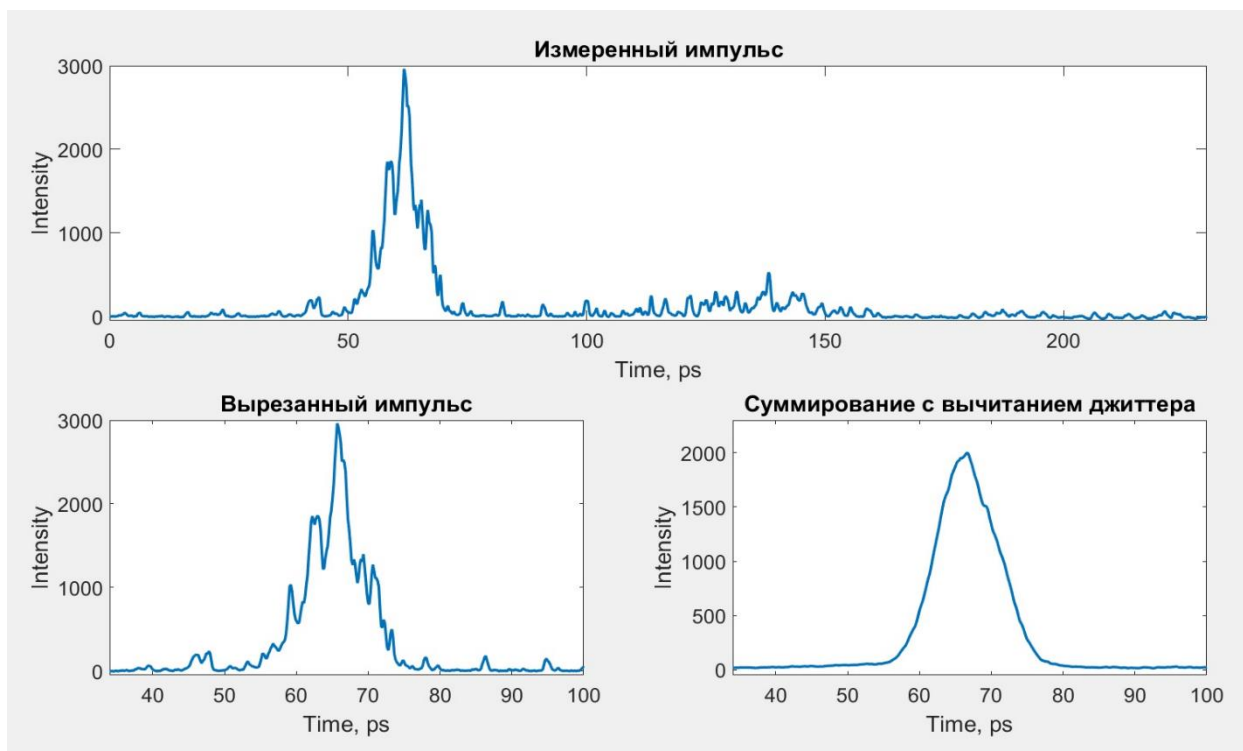


Рис. 5. Изображение окна измерительной программы при суммировании хронограмм с исключением джиттера во время эксперимента

На рисунке 5 демонстрируется аналог окна программы, которое наблюдает экспериментатор в процессе проведения измерений с применением алгоритма исключения джиттера. На верхнем графике отображается весь измерительный диапазон, содержащий исследуемый импульс. Нижний левый график показывает часть этого диапазона, содержащую измеряемый импульс, вырезаемую из него в соответствии с представленным алгоритмом. Суммирование при нахождении усредненного значения производится только по этим вырезанным импульсам. Результат усреднения отображается в нижнем правом окне программы. Видно, что в результате применения алгоритма при суммировании не происходит искажающего уширения результирующего импульса. Кроме того, усредненный импульс обладает гладкой формой и лишен изрезанности, свойственной исходному импульсу.

Вторая составляющая часть системы автоматизации – решение задачи управления работой источников питания оптических усилителей. В системе оптического усиления

исходного лазерного луча используются импульсные лампы накачки. Питание ламп осуществляется источниками PS 703TC производства Центра физического приборостроения ИОФ им. А.М. Прохорова РАН (г. Троицк). Коэффициент усиления проходящего через оптический усилитель лазерного импульса определяется напряжением на усилителе, создаваемым источником питания. Во время проведения измерений возможно существенное отклонение энергии сигнала в опорном канале в большую или меньшую сторону от среднего значения заданного диапазона. Такой процесс может быть обусловлен, например, внешними условиями (изменением температуры, движением воздуха и т.д.). С помощью ручной регулировки напряжения на соответствующем усилителе экспериментатору требовалось, по возможности, удерживать значение энергии возле заданного положения.

Источники питания PS 703TC имеют возможность электронного управления с использованием интерфейса RS-232. Возникла идея автоматизировать регулировку напряжений на источниках питания с помощью персонального компьютера. Тем самым существенно облегчить работу экспериментатора и повысить уровень контроля над значениями напряжений в опорных и измерительном каналах.

Управление источниками питания производится посредством передачи последовательности байт определенного формата через COM-порт компьютера, либо, как в нашем случае, через USB-порт, эмулирующий работу COM-порта.

В интегрированной среде разработки Visual Basic 6.0 было создано независимое приложение, реализующее, во-первых, электронное управление значениями напряжений на выходах источников питания и, во-вторых, их автоматическую регулировку для удержания значений напряжений в каналах возле заданного положения.

Работа алгоритма автоматической регулировки заключается в следующем. В основной программе автоматизации для каждого канала создается текстовый файл с названием *Kvolt.txt* (где *K* – номер канала). Первым числом в этом файле записывается среднее значение между границами дискриминации, вводимыми пользователем. Далее после каждого выстрела в конец файла дописывается измеренное последнее значение напряжения в этом канале. Программа автоматизации работы источников питания считывает данные из этих файлов, рассчитывает усредненное значение за *N* (задается пользователем) последних выстрелов и сравнивает его с первым числом в файле. В зависимости от результата сравнения, увеличивает на 2 В (минимальный шаг), уменьшает на 2 В, либо оставляет неизменным напряжение на данном усилителе.

Данная программа в течение продолжительного времени используется при проведении экспериментальных исследований. Результатом ее использования стал, во-

первых, более точный контроль над значениями напряжений в опорных каналах, что приводит к сокращению времени измерений и повышению точности. И, во-вторых, заметное облегчение работы экспериментатора.

Третья составляющая часть системы автоматизации – решение задачи измерения диаметра луча лазерного импульса. Информация о диаметре луча необходима, во-первых, для определения размеров активной области накачки. Для этого требуется измерить диаметр луча возбуждающего импульса. Во-вторых, для определения площади зондирования единичного выстрела. Для этого требуется измерить диаметр луча пробного импульса.

Ранее для решения этой задачи использовалась диафрагма с диаметром отверстия 0,1 мм. Диафрагму попеременно с малым шагом смещали в пространстве, измеряя энергию части импульса, прошедшей через отверстие. По измеренным данным строился пространственный горизонтальный и вертикальный профиль интенсивности луча. Такой способ измерений занимал очень много времени, поэтому возникла острая необходимость его оптимизации.

Идея нового метода заключается в следующем. Измеряемый луч через набор светофильтров направляется непосредственно на светочувствительную матрицу веб-камеры, подключенной к компьютеру. Компьютер в реальном времени анализирует потоковое видео, выделяет кадры, содержащие изображение луча и по измеренной интенсивности рассчитывает диаметр и другие параметра луча. Главной задачей являлось создание программного обеспечения, решающего эту проблему.

Пакет прикладных программ Matlab содержит специальные комплекты инструментов Image Acquisition Toolbox и Image Processing Toolbox, представляющие собой обширный набор эталонных алгоритмов и графических инструментов для получения, обработки, анализа и визуализации изображений. В том числе потокового видео, поступающего от веб-камеры. Благодаря удобству решения таких задач выбор был сделан в пользу пакета Matlab.

Ход выполнения программы может быть представлен следующей последовательностью действий:

1. Определение изображений измеряемого импульса.

Специальный алгоритм выделяет из последовательности кадров, образующих видеопоток, кадры, содержащие изображения импульса. Формируется массив таких изображений.

2. Анализ массива на предмет корректности данных.

В реальном эксперименте оказалось, что не все изображения, отобранные на первом шаге, имеют корректный вид. Специальный алгоритм проверяет каждый кадр на корректность и удаляет из массива изображения, имеющие дефекты.

3. Дискриминация по энергии.

Интерес представляют импульсы, обладающие энергией, лежащей в определенном диапазоне значений. Рассчитывается относительная яркость каждого сохраненного кадра и оставляются в массиве только те из них, яркость которых лежит внутри заданного диапазона.

4. Расчет усредненного импульса.

На основании сформированного массива кадров производится окончательный расчет изображения луча и его параметров.

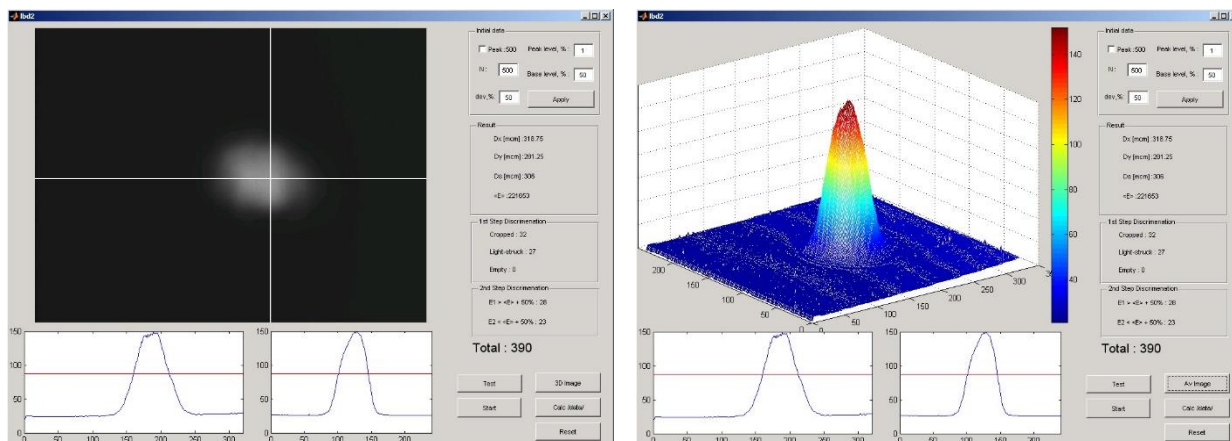


Рис. 6. Окно программы измерения диаметра лазерного луча: отображение усредненного изображения и трехмерного профиля

На рисунке 6 показано основное окно программы в режиме отображения усредненного изображения измеряемого луча (слева) и его трехмерного профиля (справа). Кроме того, строятся и отображаются вертикальный и горизонтальный профили луча по осям с максимальной суммарной интенсивностью. Вычисляются вертикальный и горизонтальный «диаметры» луча на заданном уровне энергии, а также «диаметр», рассчитанный по формуле площади круга. Выводится вся вычислительная статистика (количество отбракованных изображений по каждому из признаков, количество дискриминированных изображений по уровню энергии, число оставшихся изображений).

Четвертая глава посвящена описанию работы [11], в которой впервые экспериментально было обнаружено возникновение стимулированного излучения в GaAs. Установлено, что его интенсивность возрастает с пикосекундной задержкой относительно фронта мощной пикосекундной оптической накачки, создававшей плотную электронно-дырочную плазму. При спаде накачки интенсивность излучения релаксирует с характерным временем порядка 10 пс.

Эксперимент проводился при комнатной температуре на спектрофотохрометрическом пикосекундном лазерном комплексе АК-1, подробно описанном в главе 2. Накачке подвергалась изготовленная молекулярно-лучевой эпитаксией гетероструктура $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ с толщинами слоев соответственно 1.3-1.5-1.2 мкм, с площадью поверхности $8 \times 8 \text{ мм}^2$, освобожденная на площади $4 \times 4 \text{ мм}^2$ от подложки. Длительность и энергия фотона импульса накачки составляли соответственно $t_p = 11.3 \text{ пс}$ и $\hbar\omega_{ex} = 1.512 \text{ эВ}$. Диаметр луча накачки (FWHM) равнялся $D \approx 0.5 \text{ мм}$. Угол между лучом накачки и нормалью к эпитаксиальным слоям гетероструктуры составлял 10° . Как для накачки, так и для излучения, слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ прозрачны.

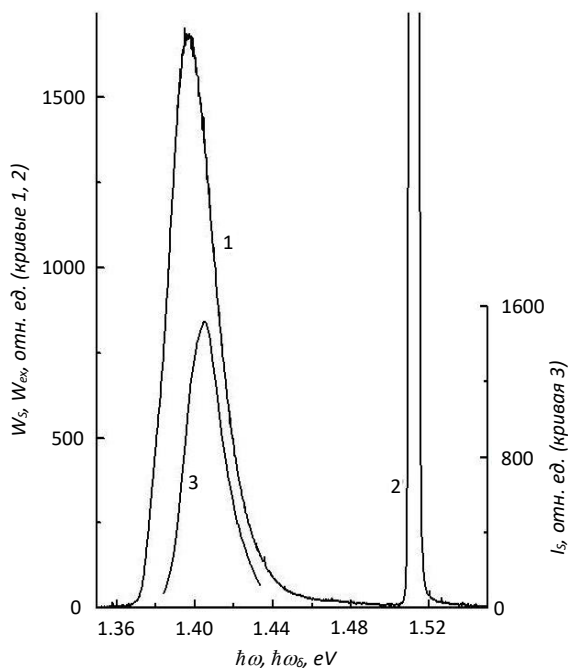


Рис. 7. Интегральный по времени спектр стимулированного излучения W_s (1), основание спектра накачки W_{ex} (2) и спектр излучения I_s (3) через 17 пс после начала накачки. Кривым 1,2 соответствует левая ось ординат, кривой 3 – правая.

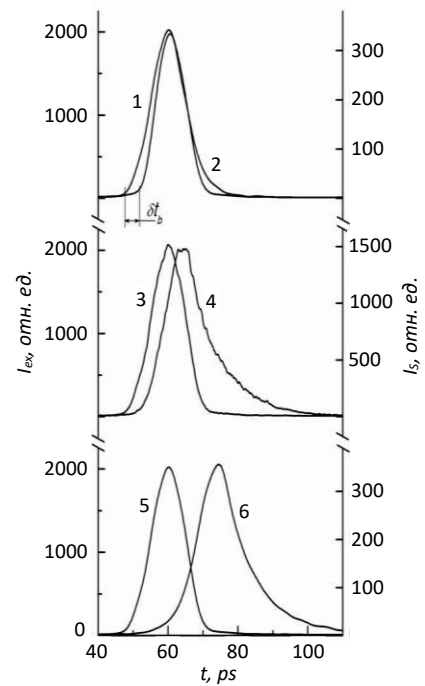


Рис. 8. Хронограммы импульса накачки I_{ex} (1, 3, 5) и спектральных компонент стимулированного излучения I_s при $\hbar\omega_s = 1.429 \text{ эВ}$ (2), 1.403 эВ (4), 1.384 эВ (6).

Вследствие интенсивной накачки в образце GaAs возникали инверсия населенностей носителей заряда и стимулированное излучение, усиливавшееся главным образом вдоль эпитаксиального слоя. Часть излучения, распространявшаяся внутри телесного угла $\Omega = 9 \cdot 10^{-4} \text{ ср}$ с осью, ортогональной поверхности гетероструктуры, направлялась в спектрограф. Интегральные по времени спектр стимулированного излучения и спектр рассеянного образцом света накачки регистрировался с помощью CCD-камеры PIXIS (рис. 7).

При измерении огибающей импульса двойной спектрограф настраивался на работу в режиме вычитания дисперсии. Промежуточная щель между первой и второй ступенями

спектрографа была настроена на пропускание излучения спектральной ширины $\delta\hbar\omega = 7.6$ мэВ. Исследуемая компонента излучения направлялась в электронно-оптическую камеру. Хронограмма регистрировалась CCD-камерой CoolSNAP.

На рисунке 8 представлены хронограммы излучения с различными значениями $\hbar\omega_\delta$ вместе с хронограммами импульса накачки ($\hbar\omega_\delta$ – энергия фотона в середине интервала $\delta\hbar\omega$). Видно, что излучение разгорается, и его интенсивность I_s растет с пикосекундной задержкой относительно фронта импульса накачки.

Как и предполагалось ранее, релаксация излучения происходила по экспоненциальному закону с характерным временем $\tau_\Sigma = 12$ пс. Обнаружилось, что характерное время релаксации τ_s для различных спектральных компонент различно.

В главе приводятся оценки, свидетельствующие о приемлемости предположения о том, что наблюдаемое излучение можно рассматривать, как стимулированное (усиленное спонтанное). Его интенсивность на расстоянии $D/2$ от центра активной области оценивается величиной $I = 0.85 \frac{\text{ГВт}}{\text{см}^2}$.

В итоге, в главе экспериментально обнаруживается следующее. В GaAs интенсивное излучение возникает с пикосекундной задержкой относительно фронта мощной пикосекундной оптической накачки. Длительность импульса излучения сравнима с длительностью импульса накачки. Задержка разгорания, длительность излучения и характерное время его релаксации зависят от энергии фотона излучения.

Информация, заключающаяся в экспериментальных результатах, может быть полезной при создании мощных импульсных полупроводниковых лазеров и суперлюминесцентных диодов.

Пятая глава посвящена описанию работы [12], в которой проводилось исследование эволюции спектра пикосекундного излучения до достижения им торцов образца. Обнаружилось, что в спектре излучения образуется модовая структура, создающая бистабильную модуляцию. Бистабильная модуляция позволила объяснить физическую природу состояний обеднения заселенностей, вызванного излучением, между которыми в поле этого излучения возникали обнаруженные ранее субтерагерцовые автоколебания [13].

Постановка эксперимента была схожа с описанной в предыдущей главе. Тот же образец подвергался накачке на лазерном комплексе. Длительность (FWHM) и энергия фотона импульса накачки составляли соответственно $t_p = 13$ пс и $\hbar\omega_{ex} = 1.512$ эВ. Диаметр луча накачки (FWHM) равнялся $D \approx 0.6$ мм.

Вследствие интенсивной накачки в образце GaAs образовывалась плотная ($n = p > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) ЭДП, возникали инверсия населенностей носителей и стимулированное излучение. Излучение усиливалось вдоль эпитаксиального слоя. Из-за несовершенства волноводных качеств гетероструктуры часть излучения вытекала через ее поверхность. Доля излучения, распространявшаяся внутри телесного угла $9 \cdot 10^{-4} \text{ ср}$ с осью, ортогональной поверхности гетероструктуры, направлялась в двойной спектрограф.

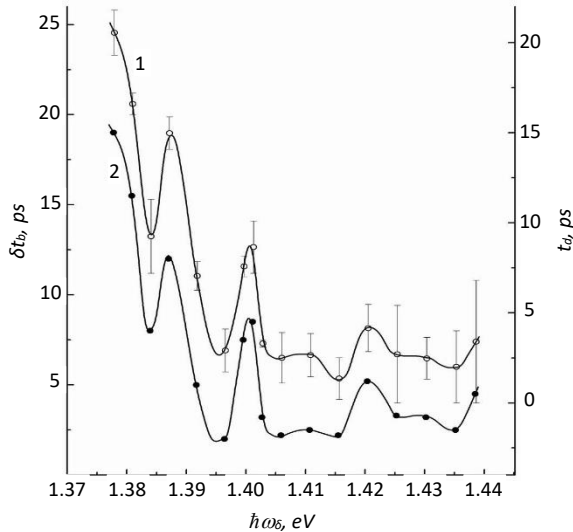


Рис. 9. Зависимость времени задержки t_d (кривая 1, правая ось ординат) и времени разгорания δt_b (кривая 2, левая ось) излучения от энергии его фотона $\hbar\omega_\delta$.

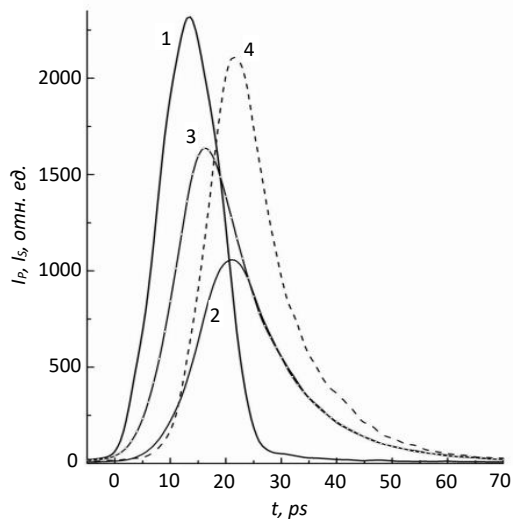


Рис. 10. Зависимости интенсивности накачки I_p (1) и интенсивности излучения I_s от времени t при энергии фотона излучения $\hbar\omega_\delta = 1.392 \text{ эВ}$ (2), 1.396 эВ (3), 1.401 эВ (4).

Процедура измерения огибающей импульса была аналогична описанной в предыдущей главе. С помощью промежуточной щели между первой и второй ступенями спектрографа вырезалась спектральная компонента излучения шириной $\delta\hbar\omega = 7.6 \text{ мэВ}$. Эта компонента излучения направлялась в ЭОК PS-1/S1, преобразующую ее в

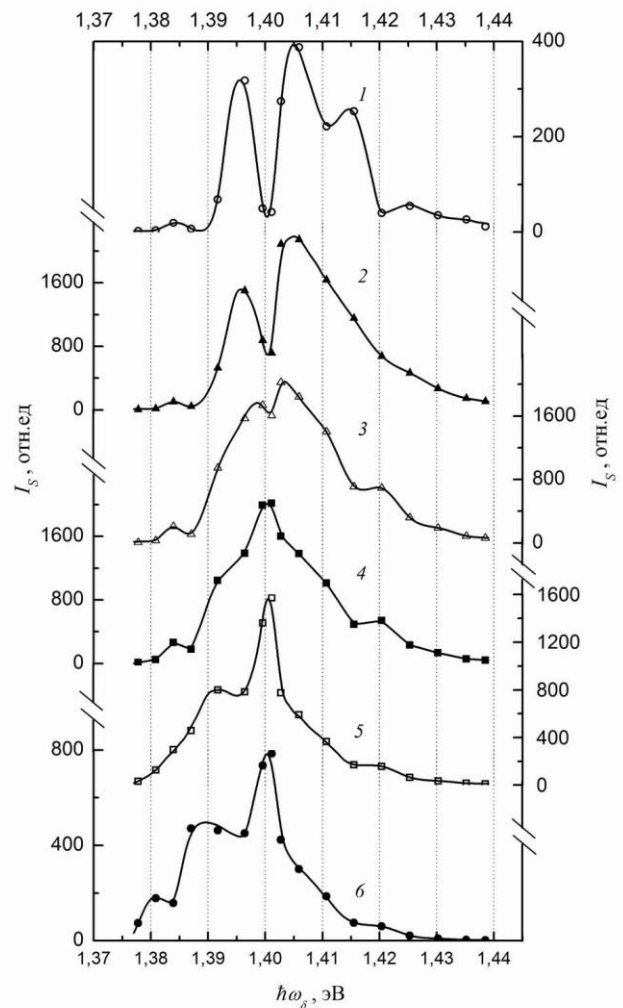


Рис. 11. Спектры излучения в различные моменты времени t , пс: 6(1), 14(2), 18(3), 20(4), 26(5), 32(6).

пространственную зависимость интенсивности (хронограмму). Хронограмма регистрировалась CCD-камерой CoolSNAP. Интегральный по времени спектр излучения регистрировался CCD-камерой Pixis, установленной у второй выходной щели первой ступени спектрографа.

Измерялись хронограммы импульсов накачки и излучения с разными значениями энергии фотона $\hbar\omega_\delta$ в середине интервала $\delta\hbar\omega$. Определялось время задержки t_d – интервал между моментами, когда интенсивность накачки и интенсивность излучения становятся равными половине своих амплитуд. На зависимости $t_d(\hbar\omega_\delta)$ обнаружилась немонотонность, которая в длинноволновой области принимала характер явно выраженных осцилляций (рис. 9, кривая 1). Физически это означает, что излучение, для которого время t_d находится в одном из локальных минимумов, разгоралось раньше, чем две соседствующие с ним в спектре компоненты. Это иллюстрирует рис. 10.

На основании измеренных хронограмм накачки и излучения, во-первых, была установлена зависимость времени δt_b разгорания излучения от энергии фотона $\hbar\omega_\delta$ (рис. 9, кривая 2), тоже осциллирующая. Моментом разгорания излучения (начала накачки) условно считался тот, на который приходилась максимальная положительная кривизна на фронте импульса излучения (накачки). Во-вторых, были воссозданы спектры излучения для моментов времени t , разделенных интервалами в 2 пс. Время t , как и на рис. 10, отсчитывалось от начала накачки.

Избранные примеры спектров излучения $I_s(\hbar\omega_\delta)$, дающие представление об их эволюции, представлены на рис. 11, где I_s – мгновенная интенсивность спектральной компоненты излучения. В начале фронта импульса излучения, например, при $t = 6$ пс, на спектре обнаруживаются локальные максимумы при $\hbar\omega_\delta \approx 1.405$ эВ $\pm k\zeta_e$, где $k = 0, 1, 2$ и $\zeta_e = 10$ мэВ. Излучение, составляющее локальную особенность спектра при таком значении $\hbar\omega_\delta$, будем называть i -модой. Видно, что в процессе эволюции спектра i -моды перестают выделяться на графике.

В начале спада импульса излучения при $t = 20$ пс на спектре возник новый максимум с энергией фотона $\hbar\omega_\delta = 1.40$ эВ. Вскоре в длинноволновой области от этого максимума через интервал $-\zeta_e$ возникает сначала одно, а затем и второе «плечо» (локальное усиление излучения на склоне спектра). Таким образом, со временем на спектре начинают выделяться локальные усиления излучения при $\hbar\omega_\delta \approx 1.400$ эВ $- k\zeta_e$. Излучения, составляющие локальные особенности спектра при таких значениях $\hbar\omega_\delta$ будем называть h -модами.

Измеренный, интегральный по времени, спектр излучения $W(\hbar\omega)$ имел при этом гладкую (без локальных особенностей) форму.

Стоит отметить, что описанные результаты были получены при накачке наименее дефектной области гетероструктуры. В другой ее области, которая накачивалась в эксперименте предыдущей главы, а до этого многократно подвергалась еще более интенсивной накачке, мгновенные спектры излучения не имели явно выделенных мод и были гладкими. Гладкой, без осцилляций, была в этой области гетероструктуры и зависимость $\delta t_b(\hbar\omega_\delta)$, как это показано в предыдущей главе.

В главе показывается, что можно рассматривать слой GaAs в качестве активного резонатора, в котором излучение распространяется под углом $\beta \approx 5^\circ$ к границам раздела слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и GaAs. В этом случае примерно равный интервал ξ_e , разделяющий соседние моды на мгновенных спектрах, совпадает с расчетным интервалом ξ_c между резонансными модами излучения:

$$\xi_c = \frac{c \sin \beta}{2d\chi} = 10 \text{ мЭВ},$$

где c – скорость света в вакууме, $d = 1.5$ мкм – толщина слоя GaAs, $\chi \approx 3.6$ – показатель преломления GaAs.

Таким образом, выделение отдельных мод и равенство $\xi_e = \xi_c$ свидетельствует о том, что накачиваемая гетероструктура, даже без участия отражения излучения от ее торцов, обладает в определенной степени качествами лазера.

Заключение содержит основные результаты работы.

1. Создана информационно-аналитическая система, автоматизирующая проведение экспериментальных исследований на лазерном пикосекундном спектрофотохронометрическом комплексе. Система включает в себя 3 основные компоненты: 1) компьютерная программа, управляющая через устройство сопряжения работой исполнительных механизмов (шаговых двигателей, механических затворов), считывающая и обрабатывающая измеряемые данные с фотоприемников и ПЗС-камер в режиме реального времени, 2) компьютерная программа, автоматически поддерживающая значения интенсивностей импульсов в оптических каналах возле заданного положения путем подстройки напряжений на источниках питания оптических усилителей, 3) компьютерная программа, работающая в связке в web-камерой, измеряющая и визуализирующая пространственное распределение интенсивности лазерного луча. Система была отлажена и активно используется при измерениях сверхбыстрых оптоэлектронных процессов в GaAs.

2. Предложены и реализованы собственные математические алгоритмы решения задачи компенсации джиттера при измерении огибающих светового импульса пикосекундной длительности с помощью электронно-оптической камеры и задачи

устранения влияния космических лучей при измерении спектров импульсов. Применение этих алгоритмов в многочисленных экспериментах показало хороший результат их работы. Благодаря их использованию впервые удалось определить характерные времена разгорания и релаксации интегрального по спектру стимулированного пикосекундного излучения GaAs, а также отдельных его спектральных компонент.

3. Использование системы, управляющей работой лазерного комплекса, позволило экспериментально подтвердить представление, созданное ранее на основании лишь косвенных признаков: под действием мощной пикосекундной оптической накачки, создающей плотную электронно-дырочную плазму в GaAs, возникает стимулированное излучение, а его интенсивность возрастает с пикосекундной задержкой относительно фронта импульса накачки. При спаде накачки интенсивность излучения релаксирует с характерным временем порядка 10 пс. Получены зависимости времени задержки, времени релаксации, длительности пикосекундного импульса излучения от энергии его фотона. Оценки, основанные на том, что релаксация излучения определяется остыванием электронно-дырочной плазмы, соответствуют измеренному времени релаксации.

4. Обнаружена бистабильность автомодуляции спектра стимулированного пикосекундного излучения, возникавшего при пикосекундной оптической накачке GaAs. Излучение измерялось до достижения им торцов образца. На фронте импульса излучения в его спектре выделился один набор эквидистантных мод. На спаде излучения его заменил набор мод, расположенных в спектре посередине между первыми. Внутри каждого набора интервал между модами совпадал с расчетным интервалом между собственными модами являющегося активным резонатором слоя GaAs. Время разгорания излучения оказалось осциллирующей функцией энергии его фотона. Эволюция спектра так самосогласована, что интегральный по времени спектр и интегральная по спектру огибающая импульса излучения имели гладкую (без локальных особенностей) форму. Предполагается, что автомодуляция спектра излучения является разновидностью вынужденного комбинационного рассеяния.

Список литературы

1. Ковалевская Т.Е., Овсяк В.Н., Белоконев В.М., Е.В. Дегтярев Фотоника: Словарь терминов – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
2. Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В., Симовский К.Р., Шполянский Ю.А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи – СПб: СПбГУИТМО, 2008.
3. Исихара С. Оптические компьютеры: Новая эра науки. - М.: Наука, 1992.
4. Wiczer J.J., Markelo H. Picosecond optical detection by high-speed sampling of photoelectrons. – Appl. Phys. Lett. 1975, 27, pp.397-400.
5. Johnson A.M., Auston D.H. Microwave switching by picosecond photoconductivity. – IEEE J. 1975, QE-11, pp. 283-287.
6. Физика полупроводниковых лазеров. Под ред. Х. Такумы. – М.: Мир, 1981.
7. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Под ред. У. Тсанга. – М.: Радио и связь, 1990.
8. Броневой И.Л., Гадонас Р.А., Красаускас В.В., Лифшиц Т.М., Пискаускас А.С., Сеницын М.А., Явич Б.С. Обратимое пикосекундное изменение прозрачности арсенида галлия при межзонном поглощении мощных импульсов света. – Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, №20, с.322-325.
9. Броневой И.Л., Кумеков С.Е., Перель В.И. Механизм обратимого пикосекундного просветления прямозонного полупроводника при межзонном поглощении мощных импульсов света. – Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, в.8, с.368-370.
10. Bronevoi I.L., Krivonosov A.N., Perel'. V.I. Phonon oscillations in the spectrum of the reversible bleaching of gallium arsenide under interband absorption of a high-power picosecond light pulse. – Sol. St. Commun. 1995, 94, №9, pp.805-808.
11. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Пикосекундные «разгорание» и релаксация интенсивного стимулированного излучения GaAs. – ЖЭТФ. 2013, 143, №4, с.634-641.
12. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Бистабильность автомодуляции спектра собственного стимулированного пикосекундного излучения GaAs. – ЖЭТФ. 2013, 144, №2, с.227-234.
13. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Субтерагерцовые автоколебания обеднения заселенностей электронов в зоне проводимости GaAs при наличии накачки и собственного стимулированного излучения. – ФТП. 2010, 44, №9, с.1157-1164.

Список работ автора по теме диссертации

- A1. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Субтерагерцовые автоколебания обеднения заселенностей электронов в зоне проводимости GaAs при наличии накачки и собственного стимулированного излучения. – ФТП. 2010, 44, №9, с.1157-1164.
- A2. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Повторение формы сверхбыстрой автомодуляции спектра поглощения света при изменении энергии импульса накачки GaAs. – ФТП. 2010, 44, №10, с.1328-1331.
- A3. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Autowave of electron population depletion and sub terahertz self-modulations of light absorption and intrinsic stimulated emission in GaAs. – Physica Status Solidi. 2011, C.8, №4, pp.1211-1215.
- A4. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. Погрешности измерений пикосекундных импульсов света с помощью пикосекундных стрик-камер. – ПТЭ. 2011, №4, с.108-115.
- A5. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Изменения спектра пикосекундного стимулированного излучения GaAs с сопутствующими им признаками электрон-фононного взаимодействия. – ФТП. 2012, 46, №7, с.944-951.
- A6. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Модуляция характеристик стимулированного пикосекундного излучения GaAs, рекомендации по её использованию и борьбе с ней. Визуализация ямы в области усиления спектра поглощения света, ”выжигаемой” излучением. – Журнал Радиоэлектроники. 2012, №10.
- A7. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Математический алгоритм устранения джиттера при измерении с помощью электронно-оптических камер усредненной хронограммы пикосекундного импульса света. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/13/text.pdf> DOI: 10.30898/1684-1719.2018.11.13.
- A8. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Переключение спектральных мод пикосекундного стимулированного излучения GaAs вследствие их вынужденного комбинационного рассеяния при межзонных осцилляциях электронов в поле излучения // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т.63, №10. – С. 1130-1140.
- A9. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Пикосекундные «разгорание» и релаксация интенсивного стимулированного излучения GaAs. – ЖЭТФ. 2013, 143, №4, с.634-641.

- A10. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Бистабильность автомодуляции спектра собственного стимулированного пикосекундного излучения GaAs. – ЖЭТФ. 2013, 144, №2, с.227-234.
- A11. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Gornostaev P.B., Krivonosov A.N., Lozovoi V.I., Pelipenko V.I., Shashkov E.V., Schelev M.Ya., Vorobiev N.S., Zabegaev D.N. PS-1/S1 picosecond streak camera measurements of GaAs stimulated radiation. – Programme and Book of Abstracts of the 30th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics ICHSIP-30, (16-21 September 2012 CSIR International Convention Centre Pretoria South Africa), p.2.
- A12. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Осцилляции поглощения зондирующего пикосекундного импульса света, вызванные его взаимодействием с собственным пикосекундным стимулированным излучением в GaAs. – ЖЭТФ. 2015, 147, №4, с.765-774.
- A13. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Автосинхронизация модуляции заселенности энергетических уровней электронами, создаваемой пикосекундными импульсами зондирующего и собственного стимулированного излучения в GaAs. – ФТП. 2016, 50, №10, с.1333-1342.
- A14. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Осцилляции энергии пикосекундных световых импульсов, как проявление синхронизации создаваемых импульсами локальных отклонений от квазиравновесного распределения электронов в GaAs. – Журнал радиоэлектроники. 2017, №3, с.1-24.
- A15. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Пикосекундная релаксация перенормировки запрещенной зоны GaAs, вызванной кулоновским взаимодействием носителей заряда. – ФТП. 2017, 51, №5, с.594-599.
- A16. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Субтерагерцовая автомодуляция поглощения пикосекундного зондирующего импульса света в GaAs, взаимосвязанная с собственным пикосекундным стимулированным излучением GaAs. – Журнал радиоэлектроники. 2017, №4, с.1-23.
- A17. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Krivonosov A.N., Zabegaev D.N. Sub terahertz self-oscillations of electron population depletion in conduction band as the reason for ultrafast self-modulations of intrinsic stimulated emission and fundamental light absorption in GaAs. – The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), Seoul, Korea, 2010, abstract, p.2-383.
- A18. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Krivonosov A.N., Zabegaev D.N. Sub terahertz self-oscillations of electron population depletion in conduction band as the reason for ultrafast

- self-modulations of intrinsic stimulated emission and fundamental light absorption in GaAs. – The International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors is the 10th meeting (NOEKS10), Paderborn, Germany, 2010, abstract, p.78.
- A19. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Gornostaev P.B., Krivonosov A.N., Lozovoi V.I., Schelev M.Ya., Vorobiev N.S., Zabegaev D.N. Measurement accuracy in picosecond streak imaging. – Abstracts of 29th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics including 1st Workshop on Advanced Sensing and Imaging (20-24 September 2010, Morioka, Japan), p.20-24.
- A20. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Krivonosov A.N., Zabegaev D.N. Autowave of electron population depletion and sub terahertz self-modulations of light absorption and intrinsic stimulated emission in GaAs. – Abstracts of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC, 22-25 May 2011, ICM Munich, Germany) 2011, p.7.
- A21. Агеева Н.Н., Броневои И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Пикосекундное интенсивное стимулированное излучение GaAs. – Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург (16-20 сентября 2013 г), с.137.
- A22. Агеева Н.Н., Броневои И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Бистабильность автомодуляции спектра собственного стимулированного пикосекундного излучения GaAs. – Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников, Звенигород (21-25 сентября 2015 г), с.224.
- A23. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Krivonosov A.N., Zabegaev D.N. Picosecond self-modulation of the fundamental absorption of a light pulse in the GaAs, that generates the stimulated emission, causing interband electron oscillations. Journal of Radio Electronics. 2019. №4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/2/text.pdf> DOI:10.30898/1684-1719.2019.4.2.
- A24. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Relation between the Relaxation of Intrinsic Stimulated Picosecond Emission from GaAs with a Characteristic Charge-Carrier Cooling Time. Semiconductors. 2019, Vol.53, No 11, pp.1431-1438. DOI:10.1134/S1063782619110022.
- A25. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Anticorrelation between the Intensity of Stimulated Picosecond Emission in GaAs and the Characteristic Time of Charge-Carrier Cooling. Semiconductors. 2020, Vol.54, No 1, pp.22-27. DOI: 10.1134/S1063782620010029.
- A26. Агеева Н.Н., Броневои И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. «Брэгговская» решетка заселенности электронов, наводимая в гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}$

xAs её собственным стимулированным пикосекундным излучением. – ФТП. 2020, 54, №10, с.1018-1028.

- A27. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Влияние на длительность пикосекундного стимулированного излучения GaAs разогрева носителей заряда этим излучением. – ФТП. 2021, 55, №2, с.113-120.
- A28. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А. Н. Длины усиления спектральных компонент собственного стимулированного пикосекундного излучения, зависимость от них характерного времени релаксации указанных компонент и связь спектров стимулированного и спонтанного излучения в GaAs. – ФТП. 2021, 55, №2, с.121-126.
- A29. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Влияние разогрева носителей заряда собственным стимулированным пикосекундным излучением в GaAs на линейное возрастание на фронте и длительность спектральной компоненты этого излучения. – ФТП. 2021, 55, №5, с.434-440.
- A30. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Переход от экспоненциального к линейному возрастанию плотности энергии спектральной компоненты пикосекундного стимулированного излучения GaAs при насыщении усиления. – ФТП. 2022, 56, №4, с.394-400.
- A31. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Functional Dependences of the Maximum Energy Density of the Spectral Component of Stimulated Picosecond Emission by GaAs upon Gain Saturation. The Residual Characteristic Emission Relaxation Time. *Semiconductors*. 2022, Vol.56, No 3, pp.145-152. DOI: 10.1134/S1063782622020014.
- A32. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Transition from an Exponential to Linear Increase in the Energy Density of the Spectral Component of Picosecond Stimulated Emission by GaAs upon Gain Saturation. *Semiconductors*. 2022, Vol.56, No 3, pp.153-159. DOI: 10.1134/S1063782622020026.
- A33. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N. Effect of Carrier Heating by Intrinsic Stimulated Picosecond Emission in GaAs on a Linear Increase at the Front and the Duration of the Spectral Component of This Emission. *Semiconductors*. 2021, Vol.55, No 5, pp.476-481. DOI: 10.1134/S106378262105002X.
- A34. Агеева Н.Н., Броневой И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. Функциональные зависимости максимальной плотности энергии спектральной компоненты стимулированного пикосекундного излучения GaAs при насыщении усиления. Остаточное характерное время релаксации излучения. – ФТП. 2022, 56, №3, с.307-314.