

АННОТИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ
О РЕЗУЛЬТАТАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ
НА ЭТАПЕ № 1

«Выбор направления исследований. Теоретические оценки и
предварительные расчеты»

Соглашение от 24 августа 2012 г. №14.В37.21.0770.

Тема: «Разработка высокоэффективных нелинейно-оптических методов генерации короткоимпульсного излучения в терагерцовом и среднем инфракрасном диапазонах частот»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Ключевые слова: терагерцовое излучение, ик-излучение, ультракороткие лазерные импульсы, нелинейное преобразование волн, терагерцовая спектроскопия.

1. Цель проекта

1.1. Целью проекта является разработка высокоэффективных методов генерации импульсов (суб)пикосекундной длительности в плохо освоенных частотных диапазонах электромагнитного спектра – терагерцовом и среднем инфракрасном (ИК). Разрабатываемые методы основаны на нелинейно-оптическом преобразовании фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК диапазона.

1.2. В результате выполнения НИР на основе разработанных методов будут созданы и экспериментально апробированы опытные образцы высокоэффективных источников терагерцового и среднего ИК излучений для использования в спектроскопии и (био)сенсорике, в системах безопасности и неразрушающего контроля, для мониторинга состояния окружающей среды.

2. Основные результаты проекта

2.1. Подготовлен аналитический обзор информационных источников по теме проекта, проведены патентные исследования.

Выбран оптимальный вариант направления исследований, сопоставлены ожидаемые показатели новой продукции после внедрения результатов НИР с существующими показателями изделий-аналогов.

Проведены расчеты и математическое моделирование для разработки высокоэффективного источника широкополосного терагерцового излучения на основе нелинейного преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в волноводной сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной (тонким слоем ниобата лития) и призмным элементом вывода излучения. Разработана теория излучения терагерцовых волн движущимся нелинейным источником в сэндвич-структуре типа «кремниевая призма – тонкий слой ниобата лития – воздух». Рассчитана энергия излученного терагерцового импульса. Показано, что эффективность конверсии в предлагаемой схеме на два порядка больше, чем максимальные оценки эффективности для кристалла ZnTe, возбуждаемого титан-сапфировым лазером с теми же параметрами.

Проведены расчеты и математическое моделирование для разработки теории генерации широкополосного терагерцового излучения лазерными импульсами с наклонным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах LiNbO₃ и GaAs, когда дифракционная решетка нанесена непосредственно на входную грань кристалла. Показано, что эффективность генерации можно максимизировать путем подбора оптимальной частотной модуляции лазерного импульса накачки. Исследовано влияние

длины кристалла, длительности лазерного импульса и поперечного размера пучка накачки на эффективность конверсии.

Проведены расчеты и математическое моделирование для исследования возможностей высокоэффективной генерации широкополосного терагерцового излучения за счет возбуждения сверхбыстрых всплесков фототока в специально разработанных полупроводниковых структурах при воздействии на них фемтосекундными лазерными импульсами. В результате моделирования получена угловая зависимость мощности терагерцового излучения в структурах отражательного и проходного типа.

Проведены расчеты и математическое моделирование для разработки неэллипсометрического метода детектирования терагерцовых волн – в условиях их черенковского (неколлинеарного) синхронизма с пробным оптическим импульсом в структуре, состоящей из слоя ниобата лития и призмного элемента ввода терагерцового излучения. Предложена и экспериментально продемонстрирована новая схема электрооптического стробирования для детектирования импульсного терагерцового излучения, в которой изменение интенсивности пробного импульса, индуцированное терагерцовым полем в нелинейном кристалле, измеряется без применения поляризационной оптики. Показано, что измерение модуляции интенсивности пробного импульса при использовании техники неколлинеарного черенковского синхронизма может быть столь же эффективным, как обычный эллипсометрический метод.

Проведены расчеты и математическое моделирование для разработки полностью волоконного перестраиваемого источника ультракоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона (2-2,6 мкм) на основе рамановского преобразования фемтосекундных импульсов ближнего ИК диапазона в германо-силикатном световоде. Проведен расчет дисперсии групповых скоростей, модовой дисперсии и длин волн отсечки высших мод в германо-силикатных световодах с различными концентрациями допирования и диаметрами сердцевины. Определены оптимальные параметры волокон для рамановского сдвига несущей длины волны солитонов в средний ИК диапазон. Проведено математическое моделирование распространения импульсов с выхода эрбиевого усилителя в германо-силикатных световодах с оптимальными свойствами. Показано, что при использовании двух последовательно соединенных световодов возможно достижение перестройки длины волны солитона до 2,6 мкм.

Проведены расчеты и математическое моделирование для разработки физических принципов построения высокоэффективных перестраиваемых лазеров диапазона 2–3 мкм с ультракороткими импульсами генерации на поликристаллах халькогенидов цинка, легированных двухвалентным хромом, с накачкой твердотельными Tm:YLF, Tm:YAlO₃ – лазерами. Исследованы спектральные характеристики лазерных кристаллов ZnSe:Cr²⁺, ZnS:Cr²⁺, CdSe:Cr²⁺ и поликристалла Cr²⁺:ZnSe.

Проведены расчеты и математическое моделирование для исследования возможностей эффективного оптико-терагерцового преобразования в ионизируемых атомных кластерах и плазмоподобных наноструктурах в условиях плазмонного резонанса. Получено общее выражение для средней пондеромоторной силы, определяющей динамику низкочастотных (терагерцовых) колебаний кластера. Показано, что возбуждение дипольных колебаний атомных кластеров под действием усредненной пондеромоторной силы лазерного импульса при объемах кластеризованной области газа $\sim 10^{-2} \text{ см}^3$ приводит в условиях резонанса поверхностного плазмона к генерации терагерцового излучения с мощностью порядка нескольких десятков киловатт.

2.2. Практическая реализация решаемых в проекте задач позволит, во-первых, добиться новых рекордов по эффективности оптико-терагерцового преобразования мощных лазерных импульсов, во-вторых, разработать эффективные методы терагерцовой генерации лазерными импульсами малой энергии (без использования оптических усилителей) и, в-третьих, повысить эффективность традиционных схем детектирования терагерцовых волн, применив новые подходы на основе явления гетеродинамирования

терагерцового сигнала и на основе черенковского синхронизма терагерцовой волны и пробного оптического импульса.

В рамках проекта впервые разработана последовательная электродинамическая теория генерации терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в схеме, где наклон фронта импульса накачки создается дифракционной решеткой, нанесенной непосредственно на входную грань электрооптического кристалла. Разработанная теория будет служить основой для экспериментальной реализации данной схемы.

Разрабатываемый в проекте новый метод оптико-терагерцового преобразования в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной основан на пионерской идее участников проекта и позволит преодолеть ряд существенных недостатков традиционных схем. В перспективе, на основе данного метода могут быть разработаны компактные, эффективные, перестраиваемые и сравнительно дешевые источники терагерцового излучения.

Одной из новейших идей, развиваемых в проекте, является концепция инвертирования эффекта Черенкова в целях эффективного детектирования терагерцового излучения.

Один из перспективных путей продвижения в средний ИК диапазон основан на эффекте генерации суперконтинуума в световодах на основе стекол (теллуритных, германатных, и халькогенидных) и на основе фотонно-кристаллических волокон. В проекте предлагается альтернативный путь – использование эффекта рамановского преобразования частоты фемтосекундных оптических импульсов в германо-силикатных световодах, прозрачных для оптического излучения на длинах волн свыше 2 мкм.

Для выращивания поликристаллов халькогенидов цинка, легированных ионами переходных металлов, в проекте впервые будет использован метод химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод), позволяющий выращивать экстремально чистые материалы с высокой однородностью легирования, недостижимой при использовании альтернативных методов. Предварительные эксперименты показали перспективность этого подхода. Оптимизация параметров синтеза позволит получить опытные образцы высокочистых поликристаллических селенида и сульфида цинка, легированных ионами хрома, превосходящих по лазерным характеристикам лучшие зарубежные аналоги.

Для накачки лазеров на халькогенидах цинка оптимальными являются мощные тулиевые лазеры, излучающие в диапазоне среднего ИК (1,8-2 мкм), поскольку они обеспечивают наименьшую разницу между энергиями кванта накачки и рабочего перехода ионов Cr^{2+} , что снижает тепловыделение и повышает КПД.

Несмотря на высокий интерес к лазерам на тулий-содержащих кристаллах в настоящее время нет доступных коммерческих образцов таких лазеров. В России работы по разработке тулиевых лазеров успешно ведутся в рамках данного проекта. Разработанные лазерные системы по своим характеристикам соответствуют лучшим мировым аналогам.

2.3. Разрабатываемые методы и теории основаны на передовых, а по ряду направлений и пионерских, идеях исполнителей НИР. Коллектив НИР занимает лидирующие позиции, как в стране, так и в мире в области лазерных методов генерации терагерцового излучения. Выполнение НИР обеспечивает достижение научных результатов мирового уровня, а планируемые к созданию на следующем этапе выполнения проекта экспериментальные образцы, макеты и установки - рекордные на сегодня в мире характеристики.

3. Назначение и область применения результатов проекта

3.1. Разработанные методы генерации и детектирования широкополосного терагерцового излучения и созданные на их основе экспериментальные образцы излучателей и детекторов будут применены для решения практических задач по

терагерцовой спектроскопии и терагерцовому имиджингу биомедицинских образцов, предметов искусства и археологических артефактов. Полученные результаты могут быть также применены для создания новейших терагерцовых систем безопасности, систем контроля качества фармакологических препаратов и продуктов питания.

Разработанные методы генерации короткоимпульсного излучения среднего ИК диапазона могут быть использованы при разработке лазерных систем дистанционного мониторинга состояния атмосферы и диагностики повреждений на газо- и нефтепроводах в безопасном для зрения человека интервале длин волн 2-2,6 мкм, а также для целей поверхностного упрочнения материалов.

Результаты по взаимодействию короткоимпульсного электромагнитного излучения с кластерной плазмой могут быть использованы для диагностики структур, используемых в современных нанотехнологиях.

4. Перспективы развития исследований

1) В ходе выполнения проекта установлены тесные связи с французской, китайской и двумя японскими исследовательскими группами: группой профессора Gerard Mourou из Institut de Lumiere Extreme, Paris, France, группой профессора Jianquan Yao из College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, China, группой профессора Masanori Hanyo из Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan, группой профессора Masahiko Tani из Center for Development of Far-Infrared Region, Fukui University, Fukui, Japan.

Сотрудничество с этими группами будет продолжено и после окончания проекта.

2) Проекты научного коллектива по аналогичной тематике.

Грант РФФИ, 08-02-92216-ГФЕН_а «Генерация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами и электронными пучками в плазмонных системах»

Грант РФФИ, 10-02-00476-а «Генерация терагерцовых волн движущимися светоиндуцированными источниками для целей поверхностной спектроскопии, ближнепольной микроскопии и исследования метаматериалов в терагерцовом диапазоне частот»

Грант РФФИ, 11-02-92107-ЯФ_а «Генерация и трансформация терагерцового излучения в планарных метаматериалах и плазмонных кристаллах»

Грант РФФИ, 10-02-01241-а «Генерация плавно перестраиваемых оптических импульсов ультракороткой длительности в среднем ИК-диапазоне»

Грант РФФИ, 11-02-12184-офи-м-2011 «Разработка физических принципов создания компактных терагерцовых систем «теравидения» и time-domain спектроскопии»

Грант РФФИ, 09-02-00478-а «Лазеры среднего и ближнего ИК диапазонов, двухцветные лазеры и комбинационные гармоники в гетероструктурах (включая квантовые) кадмий-ртуть-теллур при оптической накачке»

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» «Волоконно-оптические генераторы предельно коротких лазерных импульсов, содержащих малое число периодов оптических колебаний»

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК № 02.740.11.0563 от 22 марта 2010 г. «Генерация электромагнитных излучений в неосвоенных частотных диапазонах на основе нелинейно-оптических преобразований»

ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК ПЗ85 от 11 мая 2010 г. «Разработка высокоэффективных методов генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами»

Грант Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования «Экстремальные световые поля и их приложения».

5. Опыт закрепления молодых исследователей – участников проекта (этапа проекта) в области науки, образования и высоких технологий

Закреплены следующие специалисты:

Горелов Сергей Дмитриевич, 05.01.1986 года рождения, зачислен в очную аспирантуру Исполнителя;

Кузнецова Светлана Михайловна, 04.11.1988 года рождения, зачислена в очную аспирантуру Исполнителя;

Смирнова Дарья Александровна, 27.09.1989 года рождения, зачислена в очную аспирантуру Исполнителя.

Проректор по научной работе Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Гурбатов С.Н.

Руководитель Проекта

Бакунов М.И.

