

«ПРОВЕДЕНИЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОЗДАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДЕЛА ПО ТЕХНОЛОГИЯМ В ОБЛАСТИ ПРИОРИТЕТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ»

в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы»

Часть 1. Пояснительная записка

Блок ФЦП: **«Генерация знаний»**

Приоритетное направление: 1.2.4. Рациональное природопользование

Программное мероприятие: 1.5. Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований и создание научно-технического задела в области рационального природопользования

Критическая технология: Базовые и критические военные, специальные и промышленные технологии. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы. Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений. Технологии экологически безопасной разработки месторождений и добычи полезных ископаемых.

Название темы: Разработка и создание высокоэффективных и компактных твердотельных лазерных систем среднего ИК диапазона для дистанционного экологического мониторинга и диагностики утечки газов из магистральных газопроводов.

Цель работы: Разработка оптимальных схемных решений и создание образцов новых лазерных систем дистанционной диагностики загрязнения окружающей среды и определения мест и объёма утечки газов из магистральных газопроводов.

1. Описание поставленной научной задачи и предлагаемых подходов к её решению

Проблема загрязнения окружающей среды продуктами деятельности человека всё острее встаёт перед современным обществом. Техногенные выбросы различных газов в атмосферу приводят к изменению её химического состава и оптических свойств, что не только ухудшает качество вдыхаемого человеком воздуха, но и способствует изменению климата на планете в целом. Заметный вклад в загрязнение окружающей среды вносят различные углеводороды, которые активно используются самыми разными отраслями современного производства и транспортом. Потребление нефти и природного газа является важнейшим индикатором промышленного развития различных стран мира. В тоже время в процессе добычи и транспортировки углеводородов возможны значительные потери сырья, что не только увеличивает его себестоимость, но и способно привести к экологическим катастрофам. Эта

проблема особенно актуальна для России, которая является одним из крупнейших мировых производителей и поставщиков углеводов на мировой рынок. С другой стороны, события последних лет показывают, что для нашей страны актуальна также проблема диагностики экологического загрязнения такими, например, углеводородами, как гептил, который активно используется жидкостными двигателями космических ракет.

В последние годы многими научными группами различных стран мира исследуются возможности создания компактной техники и устройств генерации и приема электромагнитного излучения среднего ИК диапазона. Это диктуется широкими возможностями применения приёмно-передающих устройств этого диапазона для решения важных задач военно-технического назначения (таких как активное противодействие, системам ИК наблюдения и наведения, диагностика отравляющих веществ и биологических агентов, и др.), а также различных задач гражданского назначения. Среди последних можно отметить мониторинг загрязнения окружающей среды, диагностика повреждений газо- и нефтепроводов, контроль аварий на производстве, медицинская хирургия и офтальмология, тепловидение с повышенным температурным контрастом, беспроводная оптическая связь и другие. В настоящее время по многим из этих направлений в развитых странах мира имеются национальные программы.

Большой интерес к среднему ИК диапазону обусловлен целым рядом обстоятельств. Прежде всего, в этом диапазоне расположены “окна электромагнитной прозрачности” атмосферы (3-5 мкм, 8-12 мкм и др.) и различные источники теплового излучения. Кроме того, в среднем ИК диапазоне лежат линии поглощения колебательных переходов - “маркеров” разнообразных молекул. Это даёт возможность дистанционного определения по спектрам поглощения и рассеяния, в частности, сложных органических молекул - загрязнителей атмосферы, содержащих С-Н, С-N и N-O связи. Лазерная дистанционная диагностика в среднем ИК диапазоне является безопасной для зрения людей, что выгодно отличает её, например, от ультрафиолетовой диагностики.

В среднем ИК диапазоне в настоящее время существуют мощные лазерные системы на основе молекулярных газов (таких как CO_2 и CO) и химических реакций (например, в соединениях HF и DF) Основные трудности использования этих лазеров для решения реальных задач гражданского назначения и некоторых военно-технических задач связаны с их громоздкостью, малой эффективностью и вредным воздействием на окружающую среду. некогерентные источники излучения, используемые в настоящее время для решения некоторых из указанных задач, имеют ограниченный диапазон действия и являются малоэффективными. Большое внимание во многих странах мира уделяется также созданию полупроводниковых лазеров среднего ИК диапазона. Однако к настоящему времени мощность таких лазеров довольно мала, а расходимость излучения велика, что затрудняет их использование для решения задач дистанционного мониторинга.

В России ранее исследовались пути построения лазеров для дистанционной диагностики в среднем ИК диапазоне. Создавался, например, вертолётный лазерный локатор утечек метана на основе He-Ne лазера, способного

генерировать на длинах волн 3.3-3.4 мкм (смотри, например, Кислицын В.Е. и др. “Вертолётный локатор утечек метана “Поиск-2”, Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции “Оптика лазеров”, Л., 1990, с. 380). Однако мощность излучения He-Ne лазера ограничивается несколькими десятками милливатт, что существенно уменьшает диапазон действия такой системы и снижает её помехозащищённость. Ранее разрабатывалась также авиационная система для обнаружения утечек метана из трубопроводов на основе твердотельного лазера с ламповой накачкой (патент РФ “RU 2091759”). В отличие от указанных разработок предлагаемая нами система базируется на твердотельном лазере нового поколения, использующем диодно-лазерную накачку, и параметрические генераторы света (ПГС). Это позволяет существенно улучшить массогабаритные параметры системы, снизить её энергопотребление и увеличить чувствительность диагностики утечки газа.

Научно-исследовательские лаборатории разных стран мира ведут разработки лазеров среднего ИК диапазона при поддержке и в интересах крупных финансово-промышленных групп. Например, разработка твердотельной лазерной системы самолётного базирования для инспекции трубопроводов в Германии ведётся Институтом аэрокосмических исследований (Штутгарт) и фирмой “Aldas” (Берлин) в интересах концерна Рургаз (смотри, например, публикацию в интернете по адресу “OPTICS.ORG/articles/ole/11/5/7/1” 27 May 2006). Известен также английский проект разработки аналогичных лазеров, выполняемый лабораторией университета “St. Andrews” по заказу концерна “Shell” и французская разработка (фирма “ONERA”, Palaiseau).

Закупка таких систем западного производства в будущем может быть сопряжена со значительными финансовыми затратами, а также с экспортными ограничениями для подобной продукции, имеющей двойное назначение. Уже сейчас в США и Западной Европе существуют серьёзные ограничения на продажу, например, лазерных диодов мощностью более 60 Вт, а также диодов с длиной волны более 1,55 мкм. Таким образом, разработка мощных и компактных твердотельных лазерных систем среднего ИК диапазона в России продиктована не только соображениями экономической целесообразности, но и технологической безопасности.

2. Краткая характеристика работы

Настоящая заявка направлена на формирование проекта разработки и создания новых эффективных и компактных твердотельных лазерных систем, способных генерировать пучки мощного импульсно-периодического излучения на длинах волн среднего ИК диапазона (в окне атмосферной прозрачности 3-5 мкм). Именно в этом диапазоне длин волн находятся сильные линии колебательного спектра поглощения диагностируемых углеводородов (таких как этан и гептил). Задачей проекта является создание лабораторного прототипа компактной и эффективной твердотельной лазерной системы на основе лазерных кристаллов с диодной и лазерной накачкой, а также параметрического генератора света (ПГС), обеспечивающего перестройку излучения в широком диапазоне длин волн. Основное внимание будет уделено достижению таких параметров лазерного излучения (по длине волны, энергии и длительности импульсов, частоте их повторения), которые необходимы для использо-

вания в системах дистанционного определения углеводородных загрязнителей атмосферы, а также диагностики утечки газов из магистральных трубопроводов. Наряду с созданием излучающего лазера должна быть создана чувствительная приёмная система (на основе дифференциального приёма близких по частоте световых волн), обеспечивающая приём волн обратного рассеяния и отражения от земной поверхности (на частоте максимального поглощения диагностируемого газа и на близкой частоте).

Создание системы диагностики того или иного газа требует оптимизации параметров приёмно-передающей системы с учётом концентрации и индивидуальных особенностей спектральных линий молекул, а также дальности диагностируемого объекта и вида носителя диагностирующего аппарата (самолёт, вертолёт или наземный транспорт). Например, для самолётного варианта системы дистанционного зондирования этана представляются необходимыми следующие параметры лазерной системы:

- спектральный диапазон перестройки излучения - 3,3-3,5 мкм;
- частота повторения импульсов - 10-100 кГц;
- импульсная мощность лазерного импульса ~ 10-100 кВт.

Указанные параметры лазерного источника в комплексе с приёмной системой дифференциальной диагностики обеспечивают расчётную чувствительность всего комплекса по этану ~15 ppm·м. Такая чувствительность позволит с легкого самолёта (типа ЯК-12, Cessna или Л-25) диагностировать малую утечку газа из газопровода в труднодоступных для наземной инспекции районах. Такая инспекция может быть произведена с высоты ~500-1000 м от поверхности земли при скорости летательного аппарата до 500 км/ч, что обеспечит безопасную работу оператора и персонала во время облёта трасс, "мобильность" измерений и оперативность диагностики объектов газового хозяйства. Указанные параметры лазера (высокая частота повторения импульсов) позволяют осуществлять диагностику места утечки с точностью 10-30 см при высоте полёта 500 м и скорости 500 км/ч.

В настоящее время представляется возможным создание нескольких вариантов твердотельной лазерной системы с требуемыми характеристиками излучения в среднем ИК диапазоне. Один из них базируется на импульсно-периодическом твердотельном лазере (с диодной накачкой), излучающего на длине волны ~1064 нм, частота излучения которого перестраивается с помощью ПГС. Другой вариант системы основан на создании твердотельного лазера (с волоконно-лазерной накачкой), излучающего на длине волны ~2.1 мкм, с перестройкой частоты с помощью ПГС (но на основе иных нелинейно-оптических кристаллов). Существует также принципиальная возможность создания твердотельного лазера с диодно-лазерной накачкой, излучающего непосредственно на длине волны диагностики ~3.3-3,5 мкм. В ходе выполнения темы должны быть расширены знания о предельных возможностях твердотельных лазерных систем и выработаны оптимальные схемные решения построения таких лазеров для конкретных систем диагностики.

Выполнение предлагаемого исследования будет способствовать расширению знаний о возможностях построения компактных и эффективных твердотельных лазерных систем среднего ИК диапазона, которые имеют ши-

рокий спектр приложений для решения целого ряда задач гражданского и военно-технического назначения. Успешное создание твердотельной системы дистанционной диагностики этана, например, позволит оперативно диагностировать повреждения газопроводов, что будет способствовать уменьшению потерь природного газа при транспортировке. В результате этого может появиться новый вид услуг по дистанционной инспекции магистральных трубопроводов. Успешная диагностика гептила, спектр поглощения которого находится в том же частотном диапазоне (что и у этана), позволит адекватно оценивать масштабы загрязнения местности в области падения фрагментов ракет.

3. Функциональные характеристики (потребительские свойства) или качественные характеристики создаваемой научно-технической продукции (работ, услуг)

Создание лабораторной модели компактной твердотельной лазерной системы среднего ИК диапазона, её сопряжение с приёмником отражённого излучения (или пучка рассеяния), а также демонстрация её применения для визуализации потоков газа этана (или аналогов гептила) будет важным шагом на пути постановки ОКР. Важной задачей на этом пути должна стать оптимизация массо-габаритных параметров лазерной системы, а также достижение характеристик излучения среднего ИК диапазона, достаточных для дистанционной диагностики с борта лёгкого самолёта (летающего на высоте 500-1000 м со скоростью ~500 км/ч). Для этого лазерная система должна иметь общий вес ~40 кг, быть совместима с бортовой системой электропитания, не использовать водяного охлаждения. При достижении указанных выше параметров твердотельная лазерная система диагностики будет иметь существенные конкурентные преимущества перед более ранними разработками, выполненными как в России, так и за рубежом.

Разрабатываемая нами лазерная система должна быть защищена патентами РФ и других стран (возможных потребителей). Окончательная оптимизация всех параметров системы дистанционной диагностики должна быть осуществлена в ходе ОКР, которую предполагается провести в 2010-2012 годах.

Анализ зарубежной литературы показывает, что бортовая лазерная система дистанционной диагностики утечки этана будет востребована предприятиями, обеспечивающими транспортировку, добычу и переработку природного газа. Существующая в настоящее время система автоматического отключения (переключения) участка газопровода при падении давления более чем на 10% допускает наличие довольно больших потерь вследствие малых утечек газа, продолжающееся длительное время. Лазерная система дистанционной диагностики с борта самолёта с чувствительностью по этану ~15 ppm·м позволит существенно уменьшить объем таких потерь газа. Огромная протяжённость газопроводов в России и странах ближнего зарубежья, а также их прохождение по труднодоступным районам говорят о большом коммерческом потенциале системы самолётного зондирования, которая позволит существенно ускорить процесс инспекции и уменьшить число требуемого

рабочего персонала “неинтеллектуальных” специальностей. При этом может быть создан новый вид услуг – скоростная самолётная инспекция протяжённых участков газопроводов.

Существует также рыночный запрос (со стороны Росавиакосмоса, например) на дистанционную диагностику остатков ракетного топлива (гептила). Сферами дистанционной диагностики здесь могут быть области, прилегающие к космодромам, а также предприятия переработки и утилизации топлива ракет, подлежащих уничтожению по международным договорам (подписанным Россией). Нам известна, например, необходимость инспекции выброс остаточного гептила на таких перерабатывающих предприятиях, расположенных на территории Нижегородской области.

4. Предпосылки для успешного завершения исследования (реальность получения предполагаемого результата)

Проблема создания эффективных лазерных систем среднего ИК диапазона в течение длительного времени привлекает внимание исследователей многих стран мира. К настоящему времени накоплен большой объём научной информации по различным видам таких систем, в том числе на основе твердотельных лазеров. Эта информация доступна в виде статей, опубликованных в ведущих научных журналах мира, материалов международных конференций, интернет-сайтов фирм и лабораторий. В последние годы на крупных международных научных конференциях (таких как CLEO, CLEO-EUROPE, EURO-PHOTONICS и др.) регулярно проводятся специальные секции, посвящённые проблеме создания твердотельных лазеров среднего ИК диапазона. В ноябре 2005 года и в сентябре 2006 года были проведены отдельные международные конференции (в испанской Барселоне и итальянской Пизе), посвящённые лазерным источникам среднего ИК диапазона. Известен также ряд свежих публикаций, посвящённых созданию систем дистанционной диагностики газов в среднем ИК диапазоне на основе твердотельных лазеров и дифференциальных приёмников (смотри, например, “OPTICS.ORG/articles/ole/11/5/7/1” 27 May 2006).

Проблеме создания эффективных лазеров среднего ИК диапазона и систем на их основе уделяется внимание и в российских научных лабораториях. В предыдущие десятилетия в России исследовались лазеры среднего ИК диапазона на основе газов (СО, СО₂, He-Ne и др.), химических реакций, кристаллов с ламповой накачкой. Были выявлены негативные факторы, мешающие использованию таких лазеров в гражданских системах (такие как, значительные массогабаритные параметры, большие эксплуатационные расходы, малый ресурс работы). В последние годы ведутся исследования по созданию волоконных лазеров 2-микронного диапазона, лазеров с параметрическим преобразованием, а также лазеров на кристаллах (таких как Er:KРbCl₃, Fe²⁺:ZnSe, и др.), способных генерировать в диапазоне 3-5 мкм.

Накоплен опыт создания и исследований твердотельных лазеров с диодно-лазерной и волоконно-лазерной накачкой. Были исследованы диодно-накачиваемые лазеры на основе кристаллов Nd:YAG и Nd:YVO₄ с обычными и голографическим резонаторами. Получена генерация в непрерывном и импульсно-периодическом режимах с высокой эффективностью использования

энергии накачки и высоким качеством пучка генерации [1,2].

В последние 3 года в ИПФ РАН и Нижегородском государственном университете совместно с Институтом лазерной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) были выполнены работы по созданию эффективных и компактных твердотельных лазеров 2-микронного диапазона (на основе кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG с волоконно-лазерной и диодно-лазерной накачкой) с преобразованием частоты с помощью ПГС в диапазон 3-5 мкм:

- создан лазер на кристалле Ho:YAG, генерирующий на длине волны ~2098 нм (в непрерывном и импульсно-периодическом режимах) со средней мощностью до 15-16 Вт при накачке пучком излучения волоконного лазера на длине волны 1908 нм с мощностью до 32-35 Вт [3,4];
- создан лазер на кристаллах Tm:YLF с диодной накачкой, генерирующий излучение на длине волны 1908 нм с мощностью до 20 Вт [5];
- создан и исследован ПГС на основе кристалла ZnGeP₂ с накачкой излучением лазера на кристалле Ho:YAG, преобразующий излучение накачки в диапазон 3.6-4.0 мкм (для сигнальной волны) и 4.5-5.0 мкм (для холостой волны) с эффективностью ~50% [3,4,6].

На проведение этих исследований, являющихся непосредственным заданием настоящего проекта, в 2005-2006 годах было затрачено ~10000 тыс. рублей (хоздоговорные НИР, средства программы ОФН РАН “Нелинейная оптика для уникальных лазерных систем”, международные программы ИНТАС (грант 03-51-4893) и “Наука ради мира” (грант SfP974143)). За счёт средств этих проектов была создана необходимая приборная база, а сотрудники лабораторий ИПФ РАН и ННГУ (в том числе, молодые аспиранты) приобрели необходимый опыт по разработке и исследованиям современных твердотельных лазеров и ПГС.

В настоящий момент имеется часть оборудования для проведения НИР по разработке и созданию твердотельных лазерных систем среднего ИК диапазона. Имеются лазерные кристаллы (Tm:YLF, Ho:YAG, Nd:YVO₄ и др.) и диодные лазеры для их накачки. Имеются кристаллы ZnGeP₂ для параметрического преобразования излучения в средний ИК диапазон. Имеются приёмники излучения ближнего и среднего ИК диапазонов.

Литература к разделу

[1] Antipov O.L., Eremykin O.N., Ievlev A.V., and Savikin A.P. “Diode-pumped Nd:YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity,” *Optics Express*, v. **12**, N 18. pp. 4313-4319 (2004).

[2] Eremykin O.N., Antipov O.L., Minassian A., and Damzen M.J. “Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO₄ laser with a reciprocal dynamic holographic cavity,” *Optics Letters*, v. **29**, N 20, pp. 2390-2392 (2004).

[3] Antipov O.L., Eremykin O.N., Frolov Yu.N., Freidman G.I., Garanin S.G., Il'kaev R.I., Konyushkov A.P., Lazarenko V.I., Mischenko G.M., Savikin A.P., Sergeev A.M., Velikanov S.D., and Volkov R.Yu. “Mid-infrared parametric oscillator based on ZnGeP₂ crystal pumped by a 2.1-μm laser beam”// *Proc. of Int. Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” (NWP-2005)*, Nizhny

Novgorod, August 2–9, 2005 (NWP-2 High-field Laser Physics, ed. by Alexander M. Sergeev). pp. 9–10.

[4] Eremeykin O.N., Antipov O.L., Frolov Yu.N., Freidman G.I., Garanin S.G., Il'kaev R.I., Konyushkov A.P., Lazarenko V.I., Mischenko G.M., Savikin A.P., Sergeev A.M., Velikanov S.D., and Volkov R.Yu. "Mid-IR ZnGeP₂-parametric oscillator with laser pumping at 2.1- μ m" in Technical Digest of International Conference "Mid-Infrared Coherent Sources (MICS2005)", Barcelona, 6-11 November 2005, Conference Digest (<http://www.icfo.es/mics2005>), paper Mo 10.

[5] N.G. Zakharov, O.L. Antipov, O.N. Eremeykin, and A.P. Savikin, "OPTIMIZATION OF A DIODE-PUMPED Tm:YLF LASER AT 1908 nm," TECHNICAL DIGEST OF INTERNATIONAL CONFERENCE "High power laser beams", Nizhny Novgorod, 3 – 8 July, 2006 г.

[6] O.L. Antipov, O.N. Eremeykin, G.I. Freidman, A.M. Sergeev, Yu.N. Frolov, S.G. Garanin, R.I. Il'kaev, V.I. Lazarenko, G.M. Mischenko, S.D. Velikanov, and R.Yu. Volkov, A.P. Konyushkov, A.P. Savikin, "Mid-IR PARAMETRIC OSCILLATOR BASED ON ZnGeP₂ CRYSTAL WITH LASER PUMPING AT 2.1- μ m," in Technical digest of International Conference "2nd EPS-QEOD EUROPHOTON Conference on Solid-state and Fiber Coherent Light Sources," Pisa, Italy, 10-15 September 2006, paper FrA7.

5. Возможность (целесообразность) проведения предлагаемого исследования в рамках международного научного сотрудничества

Предлагаемые в проекте исследования могут быть проведены с участием зарубежных научных лабораторий. Лаборатория ИПФ РАН имеет долговременные научные связи с лабораториями Англии (Имперский колледж, Лондон), Франции (Университет г. Каен, а также исследовательская лаборатория фирмы "Thales-CSF"), Германии (Лазерный институт Технического университета Берлина) и с некоторыми другими научными группами. С исследовательскими группами этих западных центров выполнялись совместные научные проекты. Существует ряд результатов по созданию твердотельных лазеров, которые являются совместными (научные публикации и доклады с участием представителей разных групп). В связи с этим представляется возможным привлечение некоторых зарубежных научных групп к выполнению совместных международных проектов по близкой тематике. Возможно, например, совместное выполнение проектов программы FP7 (Европейского сообщества) или программы НАТО "Наука ради безопасности".

Преыдушие совместные проекты показали, что наша научная группа способна выступать в качестве равноправного партнёра в международных проектах. Чёткая постановка задачи гражданского исследования (параметров лазерной и приёмной систем) позволяет обеспечить сохранение информации, которая потенциально может составить предмет государственной тайны.

Выполнение совместных проектов по тематике, близкой к заявленной разработке, будет способствовать привлечению дополнительных финансовых ресурсов, приобретению дополнительного современного научного оборудования, получению последней информации о научно-технических новинках, обучению молодых сотрудников на современном научном оборудовании в ходе кратковременных поездок в зарубежные лаборатории.

6. Оценка сроков выполнения исследования в полном объёме 2007 - 2009 годы

Представляется возможным выполнить научно-исследовательскую часть проекта в полном объёме за 3 года работ (2007-2009 годы). К концу третьего года работ должны быть определены ключевые параметры систем, а также созданы лабораторные прототипы. После этого проект должен перейти в стадию опытно-конструкторской разработки.

7. Оценка стоимости исследования

- общий объем финансирования работы:

всего 71 млн. рублей, в том числе на 2007 год – 11 млн. рублей,
в том числе:

- объем средств федерального бюджета:

всего 35 млн. рублей, в том числе на 2007 год – 10 млн. рублей,

- объем средств из внебюджетных источников:

всего 36 млн. рублей, в том числе на 2007 год – 1 млн. рублей.

В 2007 году на выполнение работ по созданию твердотельных лазеров с диодной накачкой могут быть привлечены средства гранта ИНТАС в размере ~1 млн. руб. В настоящее время ведутся переговоры с представителями фирмы “Волготрансгаз” (регионального подразделения ОАО “Газпром”) по поводу финансирования разработки лазерной системы дистанционной диагностики утечки газа. Запрашиваемый объем финансирования в “Волготрансгазе” по этому проекту на 2007-2009 годы составляет 35 млн. руб.