**ТЕЗИСЫ учасникоВ**

**Конкурс-КОНФЕРЕНЦИИ ИЛФ СО РАН 2018**

**СЕКЦИЯ**

**“Аспиранты И молодые" ученые”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКРИЛАМИДНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИФТОРХАЛКОНОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР ЛИТОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**Деревяшкин С.В.1,2**

1Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова

2Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты и молодые ученые Научный руководитель: с.н.с. ИЛФ СО РАН к. ф.-м. н. В.Н. Бельтюгов

Научный консультант: зав. ЛОСМ НИОХ СО РАН д.х.н., проф. В.В. Шелковников

Активное исследование методов формирования элементов с рельефной микроструктурой обусловлено перспективой их применения в различных компонентах микросистемной техники. Центральное место в современной технологии изготовления таких компонентов занимает фотолитография. Используемые в ней фоторезисты могут подвергаться воздействию высоких (100-150 градусов) температур, обработке в водной среде, агрессивных (щелочных, кислотных) жидкостных средах, плазменному травлению, воздействию электролита при электрохимическом осаждении металлов. Актуальной задачей является разработка фоторезистных материалов, обладающих термо-, плазмо-, хемо- и влагостойкостью. Такого рода материалы могут быть востребованы для таких применений как: 3D электропроводящие структуры высокого разрешения с использованием наноструктурированных подложек анодированного алюминия (Светодиодная техника, СВЧ-электроника, светодиодные драйверы, мощные модули и компоненты); Рельефно-фазовые дифракционные элементы с широким угловым диапазоном ввода излучения и высокой дифракционной эффективностью (Голографический прицел, концентраторы солнечной энергии в солнечных элементах, дифракционные элементы для интегральной оптики и оптоэлектроники); фоторезист для использования в технологиях фотолитографии.

Одним из перспективных классов органических соединений, обладающих фоторезистивными свойствами являются халконы. Халконовые структуры обладают способностью светочувствительностью в области УФ излучения 300-365 нм. Полимеры на основе халконов обладают важными для практического применения свойствами, хорошая растворимость в органических растворителях, склонность к образованию пленок, хорошая устойчивость к растворителям и термостабильность.

В ЛОСМ НИОХ СО РАН проведен синтез оригинальных акриламидных производных полифторхалконов1 в качестве основ фоторезистивных композиций. Полифторхалконы имеют несколько особенностей. Например, можно ожидать увеличение гидрофобности покрытий на их основе, уменьшения взаимодействия между халконом и звеньями полимерной цепи при введении полифторхалконов в полимерную матрицу, увеличения растворимости халконов в неполярных средах, образования в конденсированной фазе супрамолекулярных структур за счет стэкинг-взаимодействия фторированных халконов. Введение акриламидных групп в качестве заместителей в структуру халкона позволяет проводить сшивку халконов по двум механизмам: [2π+2π] фотодимеризация винилкарбонильной группы халкона и свободнорадикальная полимеризация акриламидных заместителей. Данные особенности призваны усилить маскирующие свойства фоторезистов. Поэтому исследование акриламидо-замещенных полифторированных халконов в качестве основы фоторезистивных материалов является актуальной задачей.

Для акриламидных производных полифторхалконов были исследованы спектральные области чувствительности (350-400 нм), для триакриламидного полифторхалкона (ТАФХ) была получены кривые дисперсии показателя преломления для мономерной (*n*=1.622) и полимерной форм (*n*=1.647). Были исследованы термостойкость и маскирующие свойства полимерных структур при жидкостном и реактивном ионном травлении фоторезистных композиций: ТАФХ; ТАФХ в присутствии донора электронов триарилпиразолина (ТАП); ТАФХ с предварительно полимеризованным ТАП (полиТАП). Также было проведено сравнение свойств с коммерчески выпускаемыми фоторезистами SU-8, AZ4562. Результаты приведены в таблице 1.2

**Таблица 1.** Маскирующие и термические свойства ТАФХ, его модификаций, фоторезистов SU-8, AZ4562.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Фоторезист** | **Стойкость в 20% H2SO4** | **Стойкость в 40% H3PO4 (при 80 °С)** | **Стойкость в 1% NaOH** | **Скорость реактивно-ионного травления CF4** | **Термо-стойкость** |
| SU-8 | 74 мин | 32 мин | 74 мин | 33 нм/мин | 300 °С |
| AZ4562 | 8 мин | 4 мин | 0 мин | 20 нм/мин | 200 °С |
| ТАФХ | 74 мин | 74 мин | 74 мин | 17 нм/мин | 327 °С |
| ТАФХ+ТАП | 74 мин | 74 мин | 16 мин | 20 нм/мин | 342 °С |
| ТАФХ+полиТАП | 74 мин | 4 мин | 16 мин | 24 нм/мин | 350 °С |

Также, были исследованы параметры рельефно-фазовых структур полученных в микронных слоях полифторхалконов голографических методом. В полученных тонких слоях была исследована кинетика голографической записи. Показана возможность записи структур в микронных слоях полифторхалконов с дифракционной эффективностью до 59%, и угловой селективностью до 54.5 градусов (рис.1).3

|  |
| --- |
| L:\Новая папка\Graph21.tif |
| **Рис.1.** График зависимости дифракционной эффективности  от отклонения от угла Брэгга тонкой голограммы, записанной в слоях ТАФХ |

1. Е.А. Бородина,Н.А. Орлова, В.В. Шелковников, *Известия академии наук.* *Серия химическая,* **62**, №10, с. 2226-2233, (2013)

2. С.В. Деревяшкин, Е.А. Соболева, В.В. Шелковников, А.И. Малышев, В.П. Корольков, Материалы **молодежной конкурс-конференции «Оптические и информационные технологии»**, г. Новосибирск, с.45-46, (6-7 сентября 2018)

3. С.В Деревяшкин, Е.А. Соболева, В.В. Шелковников, Е.В. Спесивцев, *Химия высоких энергий,* **52,** №6, с. 507–514, (2018)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СВЕРХГЛУБОКОГО ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРУПОЛЬНОГО ПЕРЕХОДА  
Кирпичникова А. А.**

Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты и молодые ученые Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН д. ф.-м. н. О. Н. Прудников

Проведено исследование возможности сверхглубокого лазерного охлаждения атомов цезия с использованием квадрупольного оптического перехода. Показано, что при использовании в качестве вторичной стадии лазерного охлаждения поля с неоднородной поляризацией, резонансного квадрупольному оптическому переходу 62S1/2-52D5/2, возможно достижение более низких температур, чем в классической схеме лазерного охлаждения с использованием оптического перехода 62S1/2-62P3/2.

Лазерное охлаждение нейтральных атомов, получившее широкое распространение в конце прошлого столетия с изобретением интенсивных когерентных источников света - лазеров, в настоящее время используется для широкого спектра современных исследований в области квантовой физики, включая построение сверхчувствительных интерферометров (гравиметров, акселерометров и гироскопов)1,2 на основе холодных атомов и создание современных оптических стандартов частоты3. В частности, атомные интерферометры являются перспективными квантовыми сенсорами для современных сверхточных измерений гравитационного ускорения2,4, градиента гравитационного поля5, подтверждения принципа эквивалентности6, проверки общей теории относительности7, а также для задач бесспутниковой инерциальной навигации8,9.

Несмотря на достаточно полное теоретическое описание и хорошо развитые методы лазерного охлаждения10,11, задача выбора оптимальных параметров светового поля и предсказания минимальных достижимых температур лазерного охлаждения остается открытой для конкретных условий реализации эксперимента и используемых схем. Действительно, в рамках квазиклассической теории указывается лишь то, что температура субдоплеровского лазерного охлаждения в полях малой интенсивности может быть меньше доплеровского предела kBTD≈ħγ/2 (где γ - естественная ширина возбужденного уровня) и составлять несколько энергий отдачи (ER=(ħk)2/2M – энергия получаемая неподвижным атомом в результате поглощения/излучения фотона поля), т.е. меньше температур, при которых нарушаются условия использования квазиклассического подхода. Для улучшения параметров квантовых сенсоров и создания интенсивных когерентных источников нейтральных атомов, в частности, для достижения сверхглубоких температур лазерного охлаждения, рассматривают возможность использования узких оптических переходов12,13, что, согласно классической теории, должно приводить к меньшим температурам доплеровского лазерного охлаждения, а при использовании полей с неоднородной поляризацией, возможно, к меньшим значениям субдоплеровских температур. Однако при использовании узких оптических переходов существенными становятся квантовые эффекты отдачи, и известные классические теории становятся неприменимы. При этом проверка возможности достижения сверхглубоких температур требует детального теоретического исследования вне рамок развитых классических14 и квантовых теорий, в которых для упрощения задача сводится к эволюции между подуровнями основного состояния (работы15,16), а именно требует решения задачи с полным учетом эффектов отдачи при взаимодействии атомов с фотонами поля.

В рамках данной работы было проведено исследование возможности сверхглубокого лазерного охлаждения атомов Cs с использованием квадрупольного оптического перехода 62S1/2-52D5/2. Было показано, что в полях с неоднородной поляризацией возможно достижение температур много меньших, чем при лазерном охлаждении с использованием замкнутого дипольного перехода 62S1/2-62P3/2. Получены оценки оптимальных параметров лазерного охлаждения и достижимых температур.

1. P.R. Berman, *Atom interferometry*, (1997).

2. J.F. Clauser, *Physica B*, 151, pp.262-271, (1988).

3. А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, С.Н. Багаев, *УФН*, 186, с. 193–205, (2016).

4. A. Peters, K.Y. Chung, S. Chu, *Nature*, 400, p. 849, (1999).

5. M.J. Snadden, J.M. McGuirk, P. Bouyer, K.G. Haritos, M.A. Kasevich, *Phys. Rev. Lett.*, 81, p. 971, (1998).

6. S. Fray, C.A. Diez, T.W. Hänsch, M. Weitz, *Phys. Rev. Lett.*, 93, p. 240404, (2004).

7. *HYPER: hyper-precision cold atom interferometry in space: assessment study report*, 10, (2000).

8. T.L. Gustavson, P. Bouyer, M.A. Kasevich, *Phys. Rev. Lett.*, 78, p. 2046, (1997).

9. F. Yver-Leduc, P. Cheinet, J. Fils, A. Clairon, N. Dimarcq, D. Holleville, P. Bouyer, A. Landragin, *J. Opt. B: Quant. Semiclass. Opt.*, 5, pp. S136-S142 (2003).

10. A. P. Kazantsev, G. I. Surdutovich, and V. P. Yakovlev, *Mechanical Action of Light on Atoms*, (1990).

11. H. J. Metcalf and P. van der Straten, *Laser cooling and trapping*, (1999).

12. T. Binnewies, G. Wilpers, U. Sterr, J. Helmcke, T.E. Mehlstabler, E.M. Rasel, W. Ertmer, *Phys. Rev. Lett.*, 87, p. 123002, (2001).

13. M. Chalony, A. Kastberg, B. Klappauf, D. Wilkowski, *PRL*, 107, p. 243002, (2011).

14. C.S. Adams, E.Riis, *Prog. Quant. Electr.*, 21, pp. 1-77, (1997).

15. Y. Castin and J. Dalibard, *Europhys. Lett.*, 14, pp. 761-766, (1991).

16. О.Н. Прудников, Р.Я. Ильенков, А.В. Тайченачев, А.М. Тумайкин, В.И. Юдин, *ЖЭТФ*, 139, с. 1074-1080, (2011).

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В.Ч. ТРАКТОВ ВОЛНОВОДНЫХ СО2-ЛАЗЕРОВ С ПОПЕРЕЧНЫМ РАЗРЯДОМ.**

**Маркелов А. А.**

Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты Научный руководитель: зав. лаб. ИЛФ СО РАН к. ф.-м. н. А. И. Карапузиков

|  |
| --- |
| Graph4.JPGGraph3.JPG |
| **Рис. 1.** Осциллограммы в.ч. радиоимпульсов отраженной волны с различным уровнем временного «джиттера»: а) – время задержки «поджига» разряда – 7 мкс, б) – 23 мкс. | |

Волноводные СО2-лазеры с высокочастотным (в.ч.) возбуждением широко применяются в технологии, приборостроении и медицине. Исследованиям таких лазеров посвящены ряд работ [1,2,3,4], в которых рассматриваются вопросы энергетики, организации в.ч. разряда в протяженных волноводах и волноводных структурах, особенности работы в различных режимах генерации. Чаще всего генерация осуществляется в импульсно-периодическом режиме, для которого одним из наиболее важных параметров является стабильность параметров импульсов. На стабильность генерируемых лазерных импульсов влияет множество факторов, в том числе мощность высокочастотного генератора, потери в элементах схемы согласования и резонансном контуре лазера. При достижении определенного уровня потерь наблюдается нестабильность «поджига» разряда, что заметно на осциллограммах отраженной в.ч. волны представленных на рис. 1.

В данной работе рассмотрены высокочастотные тракты волноводных СО2 лазеров, проведено теоретическое моделирование в.ч. тракта с использованием модели, учитывающей свойства оптического волновода как длинной линии, влияние корпуса излучателя и схемы согласования.

Высокочастотный тракт предназначен для передачи энергий от в.ч. генератора до активной среды и включает передающий кабель, схему согласования, вакуумный в.ч. ввод и электродный узел. В.ч. генератор накачки работает на частоте 144 МГц и способен генерировать импульсы с мощностью до 1 кВт. Электродный узел является параллельным резонансным контуром, состоящим из медных катушек индуктивности и конденсатора, образованного «горячим» и «земляным» электродами, между которыми находится диэлектрический или металлодиэлектрический оптический волновод. Из-за большой протяженности конденсатора относительно длины волны высокочастотного поля накачки его следует рассматривать как длинную линию с распределенными потерями.

|  |
| --- |
| Сравнение 3 записей мощности излучения**Рис. 2.** Временные зависимости мощности излучения для лазера на основе стеклянного волновода в корпусе из нержавеющей стали(1) и из алюминиевого сплава(2) и лазера на основе волновода из ВеО керамики в корпусе из нержавеющей стали(3). |

Эксперименты по измерению характеристик реальных трактов компактных волноводных СО2 лазеров проводились с помощью векторного рефлектометра «CABAN R140». С использованием данного прибора была разработана методика определения волнового сопротивления оптического волновода, необходимая при расчетах в теоретической модели. В экспериментах использовались различные материалы волновода, такие как электровакуумное стекло С52-1 и ВеО керамика, а так же различные материалы корпуса лазера – нержавеющая сталь и алюминиевый сплав. Эксперименты показывают, что наилучшая добротность внутреннего контура может быть получена для лазера на основе ВеО волновода в корпусе из алюминиевого сплава, при этом наблюдается высокая стабильность параметров импульсов излучения. На рис.2 представлены временные зависимости импульсной мощности для лазеров с различными волноводами и различными материалами корпуса.

Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными, полученными с помощью векторного рефлектометра, что говорит о применимости теоретической модели. Показано, что добротность внутреннего контура лазера напрямую влияет на стабильность параметров импульсов генерации, и при достижении определенной величины, существенно уменьшается «джиттер», или нестабильность появления импульсов излучения лазера.

1. D. Hea and D. R. Hall, *Appl. Phys. Lett*. **43**, №8,726-727 (1983).

2. D. Hea and D. R. Hall, *IEEE JQE*, **20**, № 5, 509-514 (1984).

3. B. Heeman-llieva, Yu. B. Udalov, et al, *Appl. Phys,*. **74**, №7,4786-4788 (1993).

4. F. Villarreal, P. R. Murray, H. J. Baker and D. R. Hall, *Appl. Phys. Lett.,* **78**, №16, 2276-2278 (2001).

**ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛАНАРНО-ВОЛОКОННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ И КОНТРОЛЯ  
Никитенко Н.С.**

Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты и молодые ученые Научный руководитель: зав. лабораторией

лазерных информационных систем

ИЛФ СО РАН

д.т.н. Поллер Борис Викторович

Научно-техническая революция, начавшаяся в середине XX века, обусловила рост количества природных катастроф и техногенных аварий, при которых происходит разрушение зданий, загрязнение окружающей среды, повышение радиационного фона, что делает актуальным развитие методов и разработку устройств дистанционного контроля, с применением автономных модулей, которые могут располагаться в труднодоступных или опасных зонах.1-2

Актуальность темы также подтверждается заинтересованностью правительства РФ в мониторинге окружающей среды, так с 1 января 2018 года Федеральным законом "Об охране атмосферного воздуха" предусматривается необходимость оснащения стационарных источников выбросов вредных веществ на объектах I категории средствами автоматического контроля и техническими средствами передачи информации об этих выбросах.

В отечественной и зарубежной литературе предложен ряд методов получения полимерных планарных волноводов, однако, отсутствует описание метода, позволяющего изготовить люминесцентные пленки в короткий срок и с высокой заданной точностью по толщине, недостаточно освещены вопросы мониторинга и передачи информации с использование люминесцентных преобразователей. Нужно отметить, что в отечественной и зарубежной литературе не освещены вопросы изготовления единой планарно-волоконной системы. Нет сведений об оптимальной концентрации люминофора, в зависимости от размеров волновода. Приведены теоретические расчеты оптимальной формы волновода, неподтвержденные широкой экспериментальной базой.3-5

Таким образом, в теме разработки систем дистанционного контроля, с применением полимерных планарных волноводовсуществует достаточное количество нерешенных вопросов, которые требуют более детального освещения. В связи с вышесказанным, была сформулирована цель и задачи данной работы.

Целью настоящейработы является создание лазерных систем мониторинга объектов с использованием полимерных планарных волноводов. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) Разработка методов изготовления планарных волноводов.

2) Повышение эффективности сбора рассеянных фотонов планарными антеннами.

3) Анализ и оптимизация преобразователей ультрафиолетового излучения.

3) Разработка технологии стыковки планарных антенн с волокнами.

4) Экспериментальное определение влияния агломерированных наночастиц Ag на характеристики планарных волноводов.

В результате проведенной работы разработаны методы изготовления единой планарно-волоконной системы, представлена система дистанционного контроля на основе планарных волноводов, с использованием ультрафиолетовых сигналов. Разработанные методологии могут служить для массового создания эффективных сенсорных систем  УФ, видимого и  ИК диапазонов.

# Материалы, полученные в ходе подготовки работы, доложены на международныхконференциях СибОптика-2017, 2018. Представлены в сборниках материалов международных научных конференций Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017, 2018, в сборнике тезисов III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2016). Использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых ИЛФ СО РАН.

1. А.В. Бритвин, Б.В. Поллер, А.Б. Поллер, Ю.И Щетинин, *Сборник докладов конференции RLNC-2013*, **1**. c.233-237, (2013).

2. С.Н. Багаев, Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, С.М .Игнатович, В.В. Чесноков, А.Ф. Ярославцев, *Материалы IX международной конференции "Проблемы функционирования информационных сетей"*, c.22-25, (2006).

3. A. Darwish, M. Sagapolutele, S. Sarkisov D. Patel, *Composites: Part B*, №55, pp.139-146, (2013).

4. K.N. Bourdakos, L.A. Cury, A.P. Monkman, *Organic Electronics*, №12, pp.1142-1145, (2011).

5. А. Е. Иваницкий, М.Л. Колчев, Е.С. Буценко. *Вестник ТГПУ*. № 136, c.149-153, (2013).

**ОПТИЧЕСКИЕ ЧАСЫ НА ОДИНОЧНОМ ИОНЕ ИТТЕРБИЯ. СПЕКТРОСКОПИЯ КВАДРУПОЛЬНОГО ПЕРЕХОДА  
Павлов Н.А.**

Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты и молодые ученые Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН к. ф.-м. н. С. В. Чепуров

Оптические стандарты частоты широко используются в современном мире. Такие области, как: глобальные коммуникационные сети, точные системы спутниковой навигации, метеорология и геофизика (предсказание извержений и землетрясений), проверка фундаментальных теорий (СТО и ОТО) – требуют в своей основе высокоточные стандарты частоты. Одним из наиболее перспективных стандартов для множества применений могут являться оптические часы на одиночных ионах, локализованных в пространстве, в частности, на ионах иттербия-171, имеющих запрещённый сверхузкий переход, используемый в качестве частотного репера.

Для захвата и удержания иона в режиме Лэмба-Дике используется миниатюрная радиочастотная ловушка Пауля с торцевыми электродами (трёхмерная квадрупольная конфигурация).

В рамках данной работы проводилось измерение спектра часового квадрупольного перехода (2S1/2 (F = 0) → 2D3/2 (F = 2)), возбуждаемого лазером на длине волны 436 нм. Излучение лазера стабилизировано с помощью метода Паунда–Древера–Холла по высокодобротному резонатору Фабри-Перо.

Для допплеровского охлаждения ионов используется лазер на длине волны 370 нм, соответствующей дипольному переходу 2S1/2 (F = 1) → 2P1/2 (F = 0).

Вероятность возбуждения уровня 2D3/2 (F = 2, mF = 0) регистрируется как функция частоты лазера на 436 нм. Регистрируемый спектр содержит информацию о колебаниях иона в ловушке, взаимодействии с окружающей средой и его состоянии.

В результате, ширина регистрируемого резонанса на центральной частоте перехода была ~50 Гц.

**НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ ОПТИЧЕСКОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ МАГНИЯ  
Тропников М. А.**

Институт лазерной физики СО РАН

Секция: аспиранты и молодые ученые Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН

к.ф.-м.н. Гончаров А. Н.

Стандарты частоты играют важную роль в различных областях науки и техники – в фундаментальных физических исследованиях, в метрологии и навигации. Точность стандарта частоты на основе фонтана атомов цезия, принятого в качестве первичного, скорее всего, достигла своего предела Δν/ν = 2·10-16 1. Дальнейшее увеличение точности стандартов связывают с переходом из микроволнового диапазона спектра в оптический и, соответственно, с созданием оптических стандартов частоты на основе одиночных ионов или нейтральных атомов. Щелочноземельные металлы, такие, как Sr, Ca, Mg, а также Yb и Hg, являются главными кандидатами для создания на их основе оптических стандартов частоты. На сегодняшний день самыми точными и стабильными оптическими стандартами являются оптические стандарты частоты на основе захваченных в оптическую решетку атомов Sr и Yb. 24Mg имеет некоторые преимущества перед другими кандидатами, такие, как узкий интеркомбинационный переход, простую для расчетов структуру атома, меньший на порядок сдвиг частоты за счет теплового излучения на «часовом» переходе. Наличие быстрого замкнутого перехода 1S0–1P1 позволяет осуществлять эффективное охлаждение и захват атомов магния в магнитооптическую ловушку. Создание стандарта частоты возможно с использованием интеркомбинационного перехода 1S0–3P1 с шириной 36 Гц. Субдоплеровское охлаждение атомов магния и их локализация в оптической решетке позволит использовать более узкий переход 1S0–3P0 и реализовать стандарт частоты с относительной погрешностью 10-16–10-17. В данной работе показана возможность получения узких реперных линий с использованием перехода 1S0–3P1 с целью создания оптического стандарта частоты и представлен достигнутый прогресс в исследованиях по стабилизации частоты по наблюдаемым резонансам.

Лазерная установка для спектроскопии часового перехода 1S0–3P1 представляет собой систему на основе титан-сапфирового лазера с накачкой твердотельным лазером Verdi V18 мощностью 15 Вт, двухступенчатой системой стабилизации частоты и удвоением частоты в нелинейном кристалле KNbO3. Стабилизированное по частоте излучение титан-сапфирового лазера мощностью 1 Вт на длине волны 914 нм удваивается в нелинейном кристалле KNbO3 во внешнем резонаторе, на выходе которого излучение на длине волны 457 нм имеет мощность около 160 мВт. Лазерное охлаждение и локализация атомов магния в магнитооптической ловушке осуществляется с помощью замкнутого перехода 1S0–1P1 на длине волны 285 нм c шириной линии 79 МГц. Исследование перехода 1S0–3P1 холодных атомов магния, локализованных в МОЛ, осуществляется методом разнесенных во времени световых полей (атомный интерферометр Рамси-Бордэ). Для взаимодействия излучения с облаком атомов магния создаются две пары импульсов, формируемых из непрерывного излучения лазерной системы на длине волны 457 нм с помощью акустооптических модуляторов. Импульсы заводятся в магнитооптическую ловушку с помощью двух волокон с противоположных окон ловушки.

Для записи узких резонансов частота излучения лазерной системы перестраивается с помощью генератора Agilent N5181A, сигналом с которого управляется двухпроходный АОМ в системе стабилизации частоты по второму интерферометру. Частота генератора и параметры импульсов контролируются многоканальным таймером, мультиплексером и 4-канальным цифровым синтезатором. Длительность импульсов *τ* составляет 4 мкс, а задержка *T* в паре сонаправленных импульсов может варьироваться для достижения необходимого спектрального разрешения резонансов Δν = 1***/*** (8*Teff*), где *Teff =*(4***/****π*)*τ*+*T*. Наилучшее достигнутое разрешение резонансов Δν = 390 Hz было получено при *T =*310 мкс 2. Сигнал люминесценции облака холодных атомов магния на резонансном переходе λ = 285 нм регистрируется с помощью ФЭУ.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 1.** Девиация Аллана часовой лазерной системы |

Во время стабилизации частоты часовой лазерной системы по центральному пику наблюдаемых резонансов оптическая частота лазера подстраивается изменением частоты радиосигнала, подаваемого на двухпроходный АОМ. Для формирования сигнала ошибки для системы стабилизации используется цифровой аналог метода стабилизации по третьей гармонике 3. Сигнал люминесценции облака холодных атомов регистрируется при 4 отстройках частоты от центральной частоты двух АОМов в системе формирования импульсов, и вычисляется сигнал ошибки *dS=(S-3–3S-1+3S1–S3)*, по которому подстраивается частота АОМа в системе привязки частоты к ситалловому интерферометру. Для измерения стабильности частоты излучения часть излучения часового лазера на длине волны 914 нм направляется по одномодовому оптическому волокну на установку по измерению оптических частот с помощью фемтосекундного комба на основе титан-сапфирового лазера 4. Частота повторений фемтосекундного комба стабилизируется по сигналу биений одной из его мод с частотой излучения оптического стандарта частоты на основе Yb:YAG лазера 5. На Рис. 1 представлена девиация Аллана, показывающая относительную долговременную нестабильность частоты часовой лазерной системы на уровне 3·10-15 при времени усреднения *τ* =103 с.

Проведенные исследования выполнены при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (гранты РНФ 16-12-00054 и 17-72-20089), измерение метрологических характеристик стандарта частоты выполнено с использованием оборудования центра коллективного пользования «Фемтосекундный лазерный комплекс».

1. F. Levi, D. Calonico, C. E. Calosso, A. Godone, S. Micalizio, G. A. Costanzo, *Metrologia*, **51(3)**, 270 (2014).

2. A. N. Goncharov, A. E. Bonert, V. I. Baraulya, M. A. Tropnikov, S. A. Kuznetsov, A. V. Taichenachev, S. N. Bagayev, *Quantum Electronics*, **48(5)**, 410, 2018.

3. K. Sengstock, U. Sterr, G. Hennig, D. Bettermann, J. H. Müller, W. Ertmer, *Opt. Commun*., **103**, 73 (1993).

4. Y. A. Matyugin, S. M. Ignatovich, S. A. Kuznetsov, M. I. Nesterenko, M. V. Okhapkin, V. S. Pivtsov, M. N. Skvortsov, S. N. Bagayev, *Quantum Electronics*, **42(3)**, 250 (2012).

5. S. M. Ignatovich, M. N. Skvortsov, V. I. Vishnyakov, D. V. Brazhnikov, N. L. Kvashnin, *Journal of Physics: Conference Series,* **793(1)**, 012010 (2017).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИОГЕННОГО УСИЛИТЕЛЯ С МОЩНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

**Г.В. Купцов**

1Институт лазерной физики СО РАН

2Новосибирский государственный университет

3Новосибирский государственный технический университет

Секция: аспиранты Научный руководитель: с.н.с. ИЛФ СО РАН к. ф.-м. н. В.В. Петров

В настоящий момент, создание и развитие масштабируемых лазерных комплексов для генерации излучения с высокой средней и пиковой мощностью является актуальным. В Институте лазерной физики СО РАН разрабатывается источник импульсов с одновременно высокой пиковой и средней мощностью на основе масштабируемой полностью твердотельной диодно-накачиваемой высокоинтенсивной лазерной системы джоульного уровня, работающей с высокой частотой повторения1,2.

Система состоит из задающего генератора, регенеративного усилителя, стретчера, двух каскадов лазерного усиления и удвоителя оптической частоты. Основным каскадом лазерного усиления является мультидисковый многопроходный усилитель с криогенным охлаждением. В качестве активных элементов усилителя используются 8 диффузионно-сваренных дисков YAG-Yb:YAG (10 ат.%). Охлаждение дисков осуществляется с помощью криогенных охладителей замкнутого цикла. Усилитель разработан для получения импульсов с энергией, превосходящей 300 мДж, при энергии входных импульсов 10 мДж. Средняя мощность накачки для одного элемента составляет 100 Вт. Большая средняя мощность накачки приводит к нагреву активных элементов3, и как следствие, возникновению термически наведённой линзы и уменьшению коэффициента усиления.

При помощи численного компьютерного моделирования рассчитан градиент температуры вдоль оптической оси накачки величиной ~57 К/мм в центре активного элемента лазерного блока усиления. Разработана и экспериментально реализована новая оригинальная методика бесконтактного измерения температурных полей в накачиваемой области активных элементов усилителей, в том числе работающих при криогенных температурах, основанная на динамической лазерной термометрии. При помощи методики экспериментально подтверждены наличие и величина градиента температуры в активном элементе вдоль оптической оси накачки. Получено усиление слабого сигнала с коэффициентом ~1.45 на проход через дисковый активный элемент.

Полученные данные будут использованы для оптимизации параметров мультидискового лазерного усилителя.

Работа поддержаны программами Президиума РАН "Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом" и СО РАН.

Литература:

1. V.V. Petrov, G.V. Kuptsov, V.A. Petrov, A.V. Laptev, A.V. Kirpichnikov, E.V. Pestryakov, *Quantum. Electron.*, **48**, №4, 358-362 (2018)

2. G.V. Kuptsov, V.V. Petrov, V.A. Petrov, A.V. Laptev, A.V. Kirpichnikov, E.V. Pestryakov, *IOP Conf. Series*: *JPCS,* 999, 012008 (2018)

3. V.A. Petrov, G.V. Kuptsov, V.V. Petrov, A.V. Kirpichnikov, A.V. Laptev and E.V. Pestryakov, *AIP Conf. Proc*., 1893, 030121 (2017)

**ТЕЗИСЫ учасникоВ**

**Конкурс-КОНФЕРЕНЦИИ ИЛФ СО РАН 2018**

**СЕКЦИЯ**

**“СТУДЕНТЫ”**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА - ЧЕТВЕРНОГО БАРИЕВОГО ХАЛЬКОГЕНИДА И СОЗДАНИЕ НА ЕГО ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА  
Ерушин Е.Ю.**

Новосибирский государственный технический университет

Секция: студенты Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН д.ф.-м.н. Д.Б. Колкер

Выдох человека является сложной газовой смесью различных химических соединений, в том числе воды, метана, этана, диоксида углерода, ацетона, аммиака и др. В области 3 – 15 мкм наиболее широко представлены линии поглощения колебательно-вращательных переходов этих веществ. Некоторые молекулы, имеющие специфичность образования в организме, могут служить естественными газообразными «биомаркерами». Регистрация и определение концентрации перечисленных газовых примесей в выдохе человека могут дать ценную информацию для диагностики биохимических и физиологических процессов, протекающих в организме человека при определенных заболеваниях.

Лазерная оптико-акустическая спектроскопия является одним из эффективных подходов, используемых для определения концентраций летучих соединений в сложных газовых смесях, в том числе и в выдыхаемом человеком воздухе. При разработке лазерных газоаналитических приборов необходимо обеспечить возможность плавной перестройки длины волны излучения в среднем ИК диапазоне.

Преобразование частоты, используемое в параметрических генераторах света, является эффективным способом создания когерентного излучения в среднем ИК диапазоне. Однако, основным ограничением при разработке ПГС является крайне

ограниченное количество нелинейных кристаллов, прозрачных в ближнем и среднем

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 1.** Взаимодействие *ee-o*. Расчётные перестроечные характеристики ПГС на основе BGGSe при накачке излучением с длиной волны 1,064 мкм (кружки) и 1,5 мкм (треугольники). |

ИК-диапазоне (1-15 мкм), обладающих рядом необходимых физических свойств: высокими нелинейными свойствами, лучевой стойкостью, хорошими механическими свойствами и большой теплопроводностью. Одним из потенциально интересных материалов является четверной бариевый халькогенид (BGGSe), т.к. он прозрачен от 2 до 18 мкм и имеет высокий коэффициент нелинейности (максимальная составляющая тензора квадратичной нелинейности d11 = 6615 пм/В2).

Целью работы является исследование структуры BGGSe и создание широко перестраиваемого параметрического генератора света в области 2-15 мкм с накачкой наносекундными импульсами неодимового лазера на длине волны 1064 мкм. Создание такого источника света представляет большой интерес для неинвазивной диагностики и газоанализа.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 2.** Взаимодействие *oe-o*. Расчётные перестроечные характеристики ПГС на основе BGGSe при накачке излучением с длиной волны 1,064 мкм (кружки) и 1,5 мкм (треугольники). |

Для достижения поставленной цели были проведены модельные исследования перестроечных характеристик параметрических генераторов света на основе нового перспективного нелинейного кристалла, некоторые из них представлены на рис.1 и рис.2, рассмотрены случаи использования различных источников накачки при реализации всех возможных типов трёхволнового взаимодействия, выбраны углы среза экспериментальных образцов BGGSe для обеспечения диапазона перестройки 3 – 15 мкм длины волны излучения ПГС3.

Сейчас работа идет на исследовании лучевой стойкости пластинок кристалла BGGSe. В дальнейшем ожидается разработать действующий макет высокоэффективного наносекундного ПГС на основе BGGSe, а также исследовать его перестроечные и энергетические характеристики. Такой источник излучения позволит детектировать различные газовые смеси, в том числе вредные, взрывчатые и наркотические вещества, а также может использоваться для неивазивной медицинской диагностики и позволит выявлять некоторые болезни на ранних стадиях развития, например, рак легких, груди, пищеварения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «мол\_а» № 18‑32‑00105.

1. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головко В.Ф, *Оптика атмосферы и океана* **Т. 18**, № 9. С. 765–776, (2005).

2. V. Badikov, D. Badikov, V. Laptev et al, *Opt. Mater. Express* **6**, 2933, (2016).

3. Е.Ю. Ерушин, Д.А. Малахов, Н.Ю. Костюкова, А.А. Бойко, Д.Б. Колкер, *Актуальные проблемы электронного приборостроения*, **Том 5**, С. 30-35, (2018).

**НОВЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ЛАЗЕР НА ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕХОДАХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ НЕОНА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 743.89 НМ  
Капуста Д. Н.**

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Секция: студенты Научный руководитель: зав. лаборатории ИЛФ СО РАН, д. ф.-м. н., А. М. Ражев

Представлены результаты экспериментального исследования спектральных, энергетических и временных характеристик, направленного на создание нового импульсного газоразрядного лазера видимого диапазона, активной средой которого является газообразный неон высокого давления, возбуждаемый самостоятельным объемным поперечным электрическим разрядом с УФ предыонизацией излучением искр сбоку.

Целью данной работы было получение новой генерации на электронных переходах нейтральных атомов неона 2s22p5(2P03/2)3p:2[1/2]1 - 2s22p5(2P01/2)3s:2[1/2]00 (λ=743.889 нм) в видимом диапазоне оптического спектра с применением импульсного самостоятельного объемного поперечного электрического разряда в качестве способа накачки активной газовой среды высокого давления.

Импульсный газоразрядный Ne I-лазер с длиной волны излучения 743.89 нм представляет особый научный и практический интерес. Данный лазер может использоваться для решения множества прикладных задач, таких как: накачка лазеров на парах щелочных металлов, в терапии, спектроскопии, метрологии, проточной цитометрии и т.д.

|  |
| --- |
| Снимок |
| **Рис. 1.**Спектрограмма выходного лазерного излучения NeI при давлении 6 атм, ослабленного спектральными стеклами |

В данной работе для накачки газообразной активной среды лазера была использована импульсная высоковольтная схема возбуждения «LC-инвертор», разработанная и описанная нами в нашей работе1. Энергия в импульсе лазерного излучения оценивалась при помощи измерителя энергии/мощности лазерного излучения Ophir Optronics (дисплей Nova II и сенсор PE-50SH-V2). Форма и длительность импульса излучения регистрировалась с использованием фотодиода FK-15 и цифрового осциллографа Tektronix (мод. TDS 2014B). Для спектральных исследований использовались монохроматор Acton Research Corporation (SpectraPro-500) с разрешением 0.025 нм и спектрометр Solar laser System (мод. S-150) с разрешением 0.66 нм.

По результатам проведенного исследования впервые создан новый импульсный газоразрядный лазер видимого диапазона на электронных переходах нейтральных атомов неона высокого давления с длинной волны излучения 743.89 нм (рис.1) с накачкой самостоятельным объемным поперечным электрическим разрядом с УФ-предыонизацией активной среды. Исследованы спектральные, энергетические и временные характеристики нового лазерного источника. Ширина спектральной линии лазерного излучения составила около 0.03 нм (FWHM). Энергия в импульсе лазерного излучения составила 0.2 мДж с длительностью импульсов около 12±1 нс (FWHM), формируемых на фронте нарастания импульса тока разряда. При этом пиковая мощность лазерного излучения составила более 16 кВт. Полная расходимость лазерного излучения по горизонтали составила около 0.3 мрад.

1. Ражев А.М. и др. Квантовая электроника, 34, 901 (2004)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНЫХ АТОМНЫХ ЧАСОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ КПН НА АТОМАХ РУБИДИЯ И ЦЕЗИЯ  
Макаров А. О.**

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный университет

Секция: студенты Научный руководитель: гл.н.с. ИЛФ СО РАН д. ф.-м. н. М. Н. Скворцов

|  |
| --- |
| частота при разной СВЧ мощности рукнаровская ячейка №7  Rb Ne 25.35 Torr и Ar 13.65 Torr.jpg |
| **Рис. 1.** График частоты при изменении мощности СВЧ, подавляемой на аттенюаторе от -16Db до -6.5 в ячейке РУКНАР №7 Rb Ne 25.35 Torr и Ar 13.65 Torr |

Для многих уже не секрет, что атомные часы занимают важное положение во многих современных фундаментальных исследованиях. Различные виды часов обслуживают широкий спектр отраслей, но эффективность этих часов еще не достигла предела своих возможностей на данный момент. Актуальность предлагаемых исследований также продиктована текущим интересом со стороны ученых по различным направлениям как квантовой электроники, так и квантовой оптики. В частности, атомные часы представляют интерес для следующих областей: радиотехнические методы измерения расстояния для навигационных технологий, навигационные системы, разнообразные геофизические исследования и измерения;, разработка чувствительного высотомера, который будет ориентироваться на изменения в силе тяжести.

|  |
| --- |
| частота от температуры рукнаровская ячейка №7 Rb Ne 25.35 Torr и Ar 13.65 Torr.jpg |
| **Рис. 2.** Зависимость частоты от температуры, ячейка РУКНАР №7 Rb Ne 25.35 Torr и Ar 13.65 Torr |

В данной работе описано устройство атомных часов на основе КПН на атомах рубидия и цезия. Также описан принцип работы автоподстроек, конфигурация ячеек, их геометрия. Представлены чертеж квантового дискриминатора и фотографии ячеек, с которыми проводилась и проводится работа на данный момент. Описана проблема, связанная с большими затратами по времени при смене исследуемых ячеек и их тестирования, связи с чем был разработан и собран корпус быстросъемного типа для оперативной смены ячеек и работы с ними, включающий в себя кольца Гельмгольца, системы термостабилизации и линзу. Показаны измерения (Рис. 1, Рис. 2), которые проводятся при тестировании ячеек для нахождения оптимальных условий, при которых можно добиваться наилучших характеристик этих ячеек.

Описаны проблемы дрейфа частоты и влияние температуры лазера и СВЧ генератора на стабильность, а также их решения при помощи дополнительных систем термостабилизации и припаивания к "хвостику" ячейки провода, ведущего к холодильнику, для достижения градиента температур в ячейке.

Представлены данные по исследованию пороговых токов лазеров с вертикальным резонатором, работающих на длине волны цезия, графики биений лазеров (Рис. 3) при исследовании дополнительной частоты в характеристике лазеров при генерации СВЧ, а также измерения, связанные с изменением индекса модуляции лазеров при разном токе лазеров.

|  |
| --- |
| побочная мода ток 1.2 СВЧ мощность -4Dbm.jpg |
| **Рис. 3.** График нулевой и первой моды, а также дополнительная частота, возникшая между ними для лазера, работающего на длине волны цезия. Ток лазера 1.2mA СВЧ мощность -4Dbm |

В заключении представлены результаты измерения функции Аллана для ячеек с атомами цезия, где видно, что мы имеем нестабильность частоты порядка 0.5\*10^(-11) за первую секунду, 5.5\*10^(-12) 1/с за первые 10 секунд с дальнейшим улучшением до 3.3\*10^(-12) в течение 1000 секунд и для ячеек с атомами рубидия (Рис. 4), откуда следует, что мы имеем нестабильность частоты порядка 0.5\*10^(-11) за первую секунду, 5.5\*10^(-12) 1/с за первые 10 секунд с дальнейшим улучшением до 2.5\*10^(-12) в течение 10000 секунд и 2.8\*10^(-12) в течение 100000 секунд.

Описан вклад в работу докладчика, как, например, участие в разработке и модификации быстросъемного корпуса для ячеек, сбивание лазеров для исследования дополнительной характеристики лазеров и измерения характеристик этих лазеров, тестирование ячеек для нахождения оптимальных условий, при которых можно добиваться наилучших характеристик этих ячеек, сборка и модификация системы термостабилизации с нуля и пр.

Показана фотография собранного стандарта частоты совместно с ВНИИФТРИ по проекту НАП-КПН.

Представлен план исследований и работ на ближайшие несколько лет для улучшения имеющихся характеристик миниатюрных атомных часов.

|  |
| --- |
| Алан с 07.08.18 по 13.08.18 Rb.bmp |
| **Рис. 4.** Девиация Аллана для ячейки с атомами рубидия с 07.08.18 по 13.08.18 |

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ БЛИЗКО-ОРБИТАЛЬНЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ  
Руменских М. С.**

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный университет

Секция: студенты Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН д. ф.-м. н. И.Ф. Шайхисламов

Математическое моделирование является важной частью исследования физических процессов, включая астрофизические объекты. Наряду с наблюдениями и лабораторными экспериментами, оно позволяет изучить влияние внешних факторов на исследуемый объект.

Экзопланеты являются новыми объектами в астрофизике, которые были впервые обнаружены двадцать лет назад. Одним из классов таких планет, не имеющих аналогов в Солнечной системе, являются горячие близко-орбитальные экзопланеты. Из-за очень близкого расположения к звезде и нагрева ионизующим излучением их атмосфера испытывает газодинамическое сверхзвуковое истечение. Скорость и режимы течения зависят от таких параметров, как массы звезды и планеты, интенсивность ультрафиолетового излучения, температура и концентрация частиц звездного ветра. Наблюдения космическим телескопом Хаббл обнаружили значительное поглощение в линии Lyα во время прохождения планеты по диску звезды для ряда экзопланет, что подтвердило наличие вокруг таких объектов обширного планетарного облака.

В нашей работе для интерпретации транзитных наблюдений теплого Нептуна Glise-436b в линии Lyα полученных в (1, 2) используется трехмерная модель водородной атмосферы (3), в которой учтены такие эффекты, как нагрев рентгеновским и ультрафиолетовым (XUV) излучением, ионизация и рекомбинация компонент, водородная плазмо-фото-химия.



**Рис. 1.** Сравнение измеренного спектра линии Ly-α вне транзита и в транзите1, с газодинамическим трехмерным моделированием Glise-436b

1. B. Lavie, D. Ehrenreich, V. Bourrier, *A&A*, 605, L7 (2017)

2. D. Ehrenreich, V. Bourrier, P. Wheatley, *Nature,* vol. 522, p. 459–461 (2015)

3. I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, A. G. Berezutsky, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 481/4, p. 5315–5323

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ И ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ПОТОКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ФОНОВУЮ СРЕДУ  
Чибранов А.А.**

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный университет

Секция: студенты Научный руководитель: в.н.с. ИЛФ СО РАН

д. ф.-м. н. И. Ф. Шайхисламов

Лабораторное моделирование позволяет изучать различные космофизические процессы и явления (подробное изучение которых сложно осуществить в естественной среде) в пределах экспериментальной установки, затрачивая при этом гораздо меньшее количество ресурсов по сравнению с проведением экспериментов за пределами Земли1.

Цель настоящей работы – исследование потока лазерной плазмы, разлетающейся в замагниченный фон2, а также подтверждение теории о Ларморовском вращении ионов плазмы в магнитном поле.

|  |
| --- |
| **C:\Users\Alexey\Desktop\Диплом\3+ — копия.JPG** |
| **Рис. 1.** Зависимость интенсивности свечения лини (С3+) от расстояния от мишени. Пунктирная линия – теоретическая зависимость данного параметра. |

Для исследования характеристик лазерной плазмы использовались зондовая и спектральная диагностика. Спектральная диагностика является одним из наиболее удобных способов мониторинга спектров различных видов излучения, позволяющий исключить контактное влияние на исследуемую область, а также наблюдать отдельные компоненты лазерной плазмы. Но, в то же время, данный метод регистрации позволяет получить сигнал только в виде интеграла по всей оси наблюдения. Зондовая диагностика, в свою очередь, позволяет регистрировать сигнал в локальной области, но вызывает некоторые возмущения плазмы, что может повлиять на качество регистрируемого сигнала.

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 2.** Динамика интенсивности свечения линии (С2+) в вакууме (сплошная) и в замагниченном фоне (точки). Расстояние от мишени 68 см. |

Объект исследования создавался на экспериментальном стенде КИ-13:

Излучение от СО2–лазера (Ек~200 Дж) фокусировалось на полиэтиленовую мишень в крупногабаритной (∅120см\*5м), высоковакуумной (2\*10-6 Торр) камере. В результате абляции на поверхности мишени образуется горячая лазерная плазма (~100 эВ), которая адиабатически расширяется и распространяется в фоновую плазму, концентрация которой ~ 1014 см-3, предварительно созданную тета – пинчем. Фоновая плазма распространяется в однородном магнитном поле, величина которого варьируется (В0=0÷500 Гс), создаваемое катушками.

Анализируя результаты лабораторного моделирования были сформулированы выводы:

● Интенсивность свечения линий ионов падает в соответствии с , где R –

расстояние от мишени, что соответствует инерциальному расширению лазерного факела (Рис.1).

● Скорость распространения лазерной плазмы в вакуум ≈ 100 км/с, что примерно в 1.5 раза быстрее скорости ее распространения в нейтральный газ H2 или фоновую плазму и магнитное поле ≈ 70 км/с (Рис.2).

● При распространении лазерной плазмы в замагниченном фоне наблюдается эффект Ларморовского вращения лазерных ионов, который зависит от направления магнитного поля.

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32 00029.

Итоги работы позволят расширить область знаний о поведении плазмы в различных средах и послужат хорошим информационным подспорьем для точного теоретического и численного моделирования нестационарных космофизических процессов, таких как: вспышки Сверхновых звезд, солнечный ветер и др.

1. J. D. Huba, P. A. Bernhardt, J. G. Lyon, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, № A**1**, р.11-24, (1992).

2. Yu. P. Zakharov, V. A. Terekhin, A. G. Ponomarenko, I. F. Shaikhislamov, A. G. Berezutski, E. L. Boyarintsev, K. V. Vchivkov, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, M. A. Rumenskikh, A. A. Chibranov, *Khariton’s scientific readings*, p. 59-60, (2018) .

3. Yu. P. Zakharov, A. M. Orishich, A. G. Ponomarenko, edited by A. G. Preobrazhensky, Novosibirsk, 220, (1988).

**ПРЕИМУЩЕСТВА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СХЕМЫ РЕЗОНАНСНОГО ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА  
Четвергова Л.В.**

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Секция: студенты Научный руководитель: с.н.с. ИЛФ СО РАН к. ф.-м. н. И.В. Шерстов

Интенсивное развитие промышленности способствует увеличению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере. Поэтому потребность в непрерывном контроле экологической обстановки является актуальной. Для проведения локального и дистанционного газоанализа атмосферы широко используют лазерные технологии, в частности, метод лазерной оптико-акустической (ОА) спектроскопии1. Основной составляющей ОА-газоанализатора является оптико-акустический детектор (ОАД). Настоящая работа посвящена исследованию параметров резонансного дифференциального оптико-акустического детектора, в частности, преимуществам использования дифференциальной схемы измерений.

|  |
| --- |
| **Рис. 1.** Конструкция резонансного дифференциального ОАД |
| Отношение_сигн_хол.jpg  *а*) |
| *б*)  **Рис. 2.** АЧХ (*а*) и ФЧХ (*б*) резонансного дифференциального ОАД |

Резонансный дифференциальный ОАД (см. рис. 1) содержит два параллельных акустических резонатора (*7*) Ø9×90 мм, соединенные с торцов двумя балластными полостями (*5*) Ø20×8 мм, которые закрыты фланцами с прозрачными окнами ZnSe/AR (*1*). В середине каждого резонатора установлен микрофон (*3*). При измерении поглощения через один из резонаторов ОАД («сигнальный») проходит модулированное излучения CO2 лазера, второй резонатор ОАД – «холостой». При этом внутри ОАД возникают акустические колебания, которые регистрируются микрофонами.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости отклика микрофонов ОАД (*а*) и разности фаз сигналов микрофонов (*б*) от частоты в диапазоне 0,1-10 кГц. Возбуждение акустических колебаний в ОАД производилось с помощью звукового пьезоизлучателя (*4*), установленного в «сигнальном» резонаторе. Как видно из графиков (рис. 2), частотные зависимости «сигнального» (*1*) и «холостого» (*2*) микрофонов различаются: в «сигнальном» резонаторе наблюдается несколько переворотов фазы на 180°.   
В области продольных резонансных частот ОАД   
(1760; 5100; 8400 Гц) в диапазоне ±500 Гц акустические колебания в «сигнальном» и «холостом» резонаторах находятся в противофазе, а на низких частотах (менее 800 Гц) и в промежутках между резонансными частотами ОАД – в фазе. В этом случае использование дифференциального усилителя позволяет эффективно подавлять паразитные синфазные сигналы ОАД (например, низкочастотные шумы воздушного насоса). В эксперименте при использовании дифференциальной схемы ОАД (2 микрофона) зафиксировано примерно 10-кратное подавление паразитного сигнала от воздушного насоса (миниатюрный роторный), чем с каждого отдельного микрофона ОАД.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость напряжения шума от скорости прокачки воздуха через ОАД (дифференциальная схема измерений). Использован форвакуумный насос. Как видно, при скоростях от 0 до 0,8 л/мин уровень шумов минимален. При скорости 1,2 л/мин и выше зафиксировано резкое возрастание уровня шумов, обусловленное переходом режима потока воздуха из ламинарного в турбулентный. Аналогичный результат по шумам был получен при использовании только одного «сигнального» микрофона ОАД. Таким образом, рабочая скорость прокачки воздуха через данный ОАД составляет не более 1,0 л/мин.

|  |
| --- |
| **Рис. 3.** Экспериментальная зависимость шумов при прокачке воздуха |
| **Рис. 4.** Экспериментальное измерение концентрации SF6 и фона |

На рис. 4 представлены фрагменты измерения концентрации SF6 (*1*) в тестовой газовой смеси (N2 + 40 ppm SF6) и эквивалентного фонового сигнала в различных условиях (по 1 мин каждый): продувка азота (*2*) или прокачка воздуха с помощью форвакуумного (*3*), миниатюрного роторного (*4*) насосов со скоростью 0,6 л/мин. Через «сигнальный» резонатор ОАД проходил пучок модулированного излучения волноводного CO2 лазера (длина волны 10,6 мкм). Использована дифференциальная схема измерений (2 микрофона) с нормировкой сигналов по отпаянной газонаполненной ячейке2. Проведена предварительная калибровка оптической схемы по указанной тестовой газовой смеси. Как видно из графиков, при прокачке воздуха через ОАД (0,6 л/мин) с помощью форвакуумного (*3*) и миниатюрного роторного (*4*) насосов эквивалентная фоновая концентрация SF6 составляет ~1 ppb.   
При продувке через ОАД азота (*2*) зафиксирован фон ~5 ppb, что может быть связано с загрязнением использованного азота.

Далее проведены аналогичные эксперименты с использование только одного («сигнального» или «холостого») микрофона в ОАД, которые показали примерно 2-кратное преимущество дифференциальной схемы измерений при использовании миниатюрного роторного насоса. Этот насос предназначен для работы в составе переносного газоанализатора в полевых условиях.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально показано, что отклики с «сигнального» и «холостого» микрофонов резонансного дифференциального ОАД имеют разные АЧХ и ФЧХ. В окрестности продольных резонансных частот ОАД (±500 Гц) колебания давления в «сигнальном» и «холостом» резонаторах находятся в противофазе, в остальных диапазонах – в фазе. Поэтому применение дифференциального усилителя позволяет существенно (в 10 раз) подавить низкочастотный паразитный сигнал, создаваемый насосом при прокачке воздуха через ОАД. Измерена максимальная скорость прокачки воздуха через ОАД (~1 л/мин), при которой шумы потока не влияют на результаты измерений поглощения. Экспериментально показано, что использование дифференциальной схемы измерений (2 микрофона) имеет примерно 2-кратное преимущество по фоновому сигналу по сравнению со схемами, использующими только 1 микрофон в ОАД.

1. A. Miklos, P. Hess, Z. Bozoki, *Rev. Sci. Instrum.* V. **72**, p. 1937-1955 (2001).

2. И.В. Шерстов., В.А. Васильев, К.Г. Зенов, Р.В. Пустовалова, В.В. Спицын, С.Б. Черников, *Приборы и техника эксперимента*, № 3, c. 106-113 (2017).