

1. Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа является *завершенной*.

Тема диссертационной работы признана *актуальной*. Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в настоящее время активно ведутся поиски принципов построения новых мощных лазеров, в которых бы сочетались высокая эффективность, масштабируемость и дифракционное качество излучения. Газовые среды могут обеспечить высокое качество лазерного излучения в непрерывном режиме при мегаваттных мощностях, тогда как в твердотельных средах при таких мощностях возникают проблемы с оптической однородностью и лучевой прочностью.

В настоящее время наиболее проработанным в техническом отношении мощным непрерывным газовым лазером является химический кислородно-йодный лазер (ХКЙЛ). Лазеры этого типа достигли мегаваттных мощностей в непрерывном режиме. Низкая общая энергетическая эффективность КИЛ сдерживает развитие этого перспективного лазера. Это обуславливает необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований для разработки новых способов создания активной среды этого лазера.

За последнее десятилетие созданы мощные и эффективные диодные лазеры, линейки и стеки на их основе, но их качество излучения заметно хуже дифракционного. Излучение диодных лазеров можно использовать в качестве эффективной оптической накачки лазерных сред, обеспечивающих излучение дифракционного качества. Поэтому, перспективным направлением построения мощных лазеров является преобразование и суммирование излучения диодных лазеров с помощью различных лазерных сред, допускающих оптическую накачку.

Недавно была предложена и реализована экспериментально новая активная среда лазера с оптической накачкой, использующая метастабильные атомы инертных газов, получаемые в плазме электрического разряда. Длины волн излучения таких лазеров лежат в ближней инфракрасной области спектра и попадают в окна прозрачности атмосферы. Теоретические оценки эффективности этой лазерной среды для непрерывного режима работы показали, что кинетика столкновительных процессов при давлении порядка атмосферного может обеспечить удельный энергоём лазерного излучения порядка сотен ватт с кубического сантиметра. Таким образом, лазерная среда с метастабильными атомами инертных газов и оптической накачкой представляет большой практический интерес и требует внимательного изучения.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Разработка и изготовление разрядных систем для получения концентраций атомов йода порядка 10^{16} см^{-3} в непрерывном тлеющем разряде при давлении 20 Тор и более с использованием в качестве донора метилиодида (CH_3I), в том числе с помощью плазмохимических процессов.
2. Разработка метода диагностики потерь синглетного кислорода в активной среде ХКЙЛ и его применение для прямого сравнения двух методов получения активной среды – традиционного, посредством диссоциации I_2 в потоке синглетного кислорода и с атомами йода, выработанными вне активной среды в электрическом разряде.
3. Разработка и изготовление химического кислородно-йодного лазера с внешним генератором атомов йода.
4. Определение температурной зависимости константы скорости тушения $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ атомами кислорода.
5. Разработка и изготовление разрядных систем для получения метастабильных атомов инертных газов.
6. Разработка метода измерения и измерение коэффициентов столкновительного уширения спектральных линий переходов, используемых для оптической накачки

лазеров на инертных газах.

2. **Достоверность** полученных автором результатов подтверждается воспроизводимыми результатами экспериментов, физической адекватностью используемых численных моделей и хорошим согласием полученных результатов с известными данными литературы.

3. **Диссертация соответствует** п.1, п.2, п.5 и п.8 области исследования паспорта специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

4. В рамках диссертационной работы получены результаты, обладающие **научной новизной и выносимые на защиту**:

1. Расширение диапазона рабочих параметров кислородно-йодного лазера (увеличение давления активной среды в два раза – до 8-ми Тор при содержании паров воды до 15%) за счёт использования электроразрядного генератора атомов йода, ведущее к существенному улучшению массогабаритных характеристик лазера.
2. Увеличение времени жизни $O_2(^1\Delta)$ в активной среде ХКЙЛ при работе с электроразрядным генератором на 30% по сравнению с традиционным способом диссоциации $[I_2]$ синглетным кислородом.
3. Электроразрядный генератор атомов йода с концентрацией атомов йода до $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при давлении газа-носителя более 20 Тор.
4. Температурная зависимость константы скорости тушения возбуждённого состояния атомов йода $I(^2P_{1/2})$ атомами кислорода: $k(T) = (6.5 \pm 1) \times 10^{-12} \times (T/300)^{1.76} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.
5. Метод измерения коэффициентов столкновительного уширения в низкотемпературной плазме тлеющего разряда, основанный на одновременном измерении Гауссовой и Лоренцевой компонент линии поглощения, аппроксимированной контуром Фойгта.
6. Измеренные значения констант столкновительного уширения перехода $5s[3/2]_2 \rightarrow 5p[5/2]_3$ криптона собственными атомами и атомами гелия, которые составляют:

$$\xi_{\text{Kr-Kr}} = (2.4 \pm 0.2) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3 \text{ и } \xi_{\text{Kr-He}} = (3.1 \pm 0.1) \times 10^{-10} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3.$$

5. Полнота изложения результатов работы в публикациях.

Соискатель имеет 32 опубликованных работы по теме диссертации, в том числе 26 публикаций в научных журналах из списка ВАК РФ, 6 работ в материалах и трудах Международных и Всероссийских конференций. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты, а также основные аспекты их практического применения. Без соавторов Михеев П.А. опубликовал 1 обзор в журнале из списка ВАК РФ. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии. Диссертационная работа Михеева П.А. соответствует требованиям, установленным пунктом 14 Положения о присуждении ученых степеней.

Работы, опубликованные в ведущих международных и Российских журналах, приведены в списке:

1. Mikheyev, P.A. Influence of molecular oxygen on iodine atoms production in an RF discharge / P.A. Mikheyev, N.I. Ufimtsev, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, V.N. Azyazov, A.P. Napartovich // *Plasma Sources Science and Technology*. - 2016. - V. 25, №3. - P. 035027.
2. Mikheyev, P.A. Pressure broadening of Ar and Kr $(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$ transition in the parent gases and in He / P.A. Mikheyev, A.K. Chernyshov, N.I. Ufimtsev, E.A. Vorontsova, V.N. Azyazov // *Journal of Quantitative Spectroscopy and*

Radiative Transfer. - 2015. - V. 164. - P. 1-7.

3. Михеев, П.А. Лазеры на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой / П.А. Михеев // *Квантовая Электроника*. - 2015. - Т. 45, №8. - С. 704-708.
4. Demyanov, A.V. Kinetic study of a cw optically pumped laser with metastable rare gas atoms produced in an electric discharge / A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, P.A. Mikheyev // *Journal of Physics D: Applied Physics*. - 2013. - V. 46. - P. 375202.
5. Mikheyev, P.A. Chemical oxygen-iodine laser with external production of iodine atoms in CH₃I/Ar dc glow discharge / P.A. Mikheyev, V.N. Azyazov, M.V. Zagidullin // *Applied Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. - 2010. - V. 101. - P. 7.
6. Demyanov, A.V. Study of iodine atom production in Ar/CH₃I dc glow discharges / A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, V.N. Azyazov, P.A. Mikheyev // *Plasma Sources Science and Technology*. - 2010. - V. 19, №2. - P. 025017.
7. Аязов, В.Н. Характеристики электроразрядного генератора атомов иода для химического кислородно-йодного лазера / В.Н. Аязов, М.В. Воробьев, А.И. Воронов, Н.В. Купряев, П.А. Михеев, Н.И. Уфимцев // *Квантовая Электроника*. - 2009. - Т. 39, № 1 - С. 84-88.
8. Mikheyev, P.A. Temperature dependence of the O + I(²P_{1/2}) → O + I(²P_{3/2}) quenching rate constant / P.A. Mikheyev, D.J. Postell, M.C. Heaven // *Journal of Applied Physics*. - 2009. - V. 105, № 9. - P. 094911.
9. Mikheyev, P.A. Properties of O₂(¹Δ)-I(²P_{1/2}) laser medium with a dc glow discharge iodine atom generator / P.A. Mikheyev, V.N. Azyazov // *Journal of Applied Physics*. - 2008. - V. 104, №12. - P. 123111.
10. Azyazov, V.N. Formation of I₂ (B ³Π₀) in the presence of O₂(a¹Δ) / V.N. Azyazov, P.A. Mikheyev, N.I. Ufimtsev, E.V. Fomin, I.O. Antonov, M.C. Heaven // *Journal of Applied Physics*. - 2007. - V. 102, №12. - P. 3108.
11. Mikheyev, P.A. Production of iodine atoms by dissociating CH₃I and HI in a dc glow discharge in the flow of argon / P.A. Mikheyev, A.A. Shepelenko, A.I. Voronov, N.V. Kupryayev // *Journal of Physics D: Applied Physics*. - 2004. - V. 37. - P. 3202-3206.
12. Шепеленко, А.А. Получение атомов йода для кислородно-йодного лазера из йодсодержащих молекул с помощью атомарного кислорода / А.А. Шепеленко, П.А. Михеев // *Квантовая электроника*. - 2003. - Т. 33, № 3. - С. 215-218.
13. Михеев, П.А. Получение атомарного йода разложением метилйодида продуктами плазмы тлеющего разряда в потоке кислорода / П.А. Михеев, А.А. Шепеленко, Н.В. Купряев // *Теплофизика высоких температур*. - 2002. - Т. 40, № 1. - С. 34-38.
14. Михеев, П.А. Получение атомарного йода в потоке газа при разложении метилйодида тлеющим разрядом постоянного тока / П.А. Михеев, А.А. Шепеленко, А.И. Воронов, Н.В. Купряев // *Квантовая электроника*. - 2002. - Т. 32. - С. 1-4.

6. **Апробация работы** проводилась более чем на 10-ти международных и всероссийских конференциях и семинарах, в том числе:

- The 20th International Symposium on High Power Laser Systems and Applications (Chengdu, China, 25.08.2014–29.08.2014),
- The 19th International Symposium on High Power Laser Systems and Applications (Istanbul, Turkey, 10.09.2012–14.09.2012).

7. **Теоретическая значимость работы** соискателя состоит в том, что в диссертации разработаны:

- метод эффективной генерации атомов йода в плазме тлеющего разряда, в том числе с использованием плазмохимических реакций с участием атомарного кислорода;
- метод измерения столкновительного уширения спектральных линий в плазме тлеющего разряда.

Полученные результаты могут использоваться в учебном процессе при подготовке

магистров по направлению 03.04.01 - прикладные математика и физика и аспирантов по направлению 03.06.01 – физика и астрономия.

8. Практическая значимость работы состоит в том, что

- созданный электроразрядный генератор атомов йода позволил продемонстрировать возможность расширения рабочих параметров активной среды кислородно-йодного лазера, что ведёт к улучшению массогабаритных характеристик этого лазера;

- разработанный метод измерения столкновительного уширения спектральных линий разряда позволяет измерять коэффициенты ударного уширения с точностью лучше 10%, в том числе в плазме тлеющего разряда.

Диссертация имеет четкую структуру, написана понятным и грамотным языком, хорошо оформлена. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. В частности, экспериментально показано расширение области рабочих параметров химического кислородно-йодного лазера с электроразрядным генератором атомов йода. Разработан метод определения коэффициентов столкновительного уширения спектральных линий в плазме разряда, основанный на одновременном определении температурного и столкновительного уширения спектральной линии, позволяющий учитывать температуру плазмы и определять вышеуказанные коэффициенты с точностью лучше 10%.

По научной новизне, практической значимости и объему результатов диссертационная работа Михеева П.А. удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям.

Диссертация «Электроразрядные генераторы атомарного йода и метастабильных атомов аргона и криптона для активных сред газовых лазеров и оптические методы исследования таких сред» Михеева Павла Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Заключение принято на заседании Учёного Совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Присутствовало на заседании 9 членов Ученого совета СФ ФИАН. Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № 3/16 от 15 июня 2016 г.

Учёный секретарь СФ ФИАН, д.т.н.



С. И. Ярьско