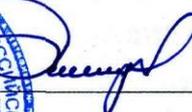


УТВЕРЖДАЮ

Врио ректора федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования
«Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева»




В.Д. Богатырев

25 _____ 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Самарского филиала
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им П.Н.
Лебедева Российской академии наук
(СФ ФИАН)




В.С. Казакевич

"23" _____ 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН) и федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Диссертация Чернышова Александра Константиновича «Оптические системы на основе диодных лазеров для управления пространственными и спектральными характеристиками излучения и контроль параметров лазерных пучков» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, выполнена в Самарском филиале ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН) и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре физики.

Соискатель, Чернышов Александр Константинович, 1962 года рождения, в 1987 году окончил с отличием Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-физический институт по специальности «Физика твёрдого тела». В 1998 году защитил диссертацию «Исследование особенностей согласования волнового фронта полупроводникового лазера с внешними оптическими элементами» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика» в диссертационном совете, созданном на базе Самарского государственного университета. С 1987 года работает в СФ ФИАН, в настоящее время в должности старшего научного сотрудника лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем

(ЛМАЛС).

Научный консультант – доктор физико-математических наук Аязов Валерий Николаевич работает в должности профессора кафедры физики Самарского университета и, по совместительству, в должности ведущего научного сотрудника лаборатории химических и электроразрядных лазеров СФ ФИАН. Тема диссертационной работы и научный консультант утверждены Ученым советом СФ ФИАН, протокол № 8 от 13 сентября 2017 года.

По результатам рассмотрения диссертации Чернышова А.К. «Оптические системы на основе диодных лазеров для управления пространственными и спектральными характеристиками излучения и контроль параметров лазерных пучков», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, на совместном заседании Ученого Совета СФ ФИАН (протокол № 4 от 22 мая 2019 года) и кафедры физики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» принято следующее заключение.

1. Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа является *завершенной*.

Тема диссертационной работы признана *актуальной*. Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в большинстве приложений излучение диодных лазеров необходимо фокусировать в пятно минимальных размеров, коллимировать в параллельные пучки большой протяженности или трансформировать в пространственные моды с заданными характеристиками. При этом для обеспечения высокой эффективности преобразования относительно маломощных диодных лазеров необходимо учитывать особенности пространственных характеристик их выходного излучения. В первую очередь к числу таких особенностей следует отнести эллиптичность поперечного сечения и астигматичный волновой фронт. Влияние особенностей пространственных характеристик пучков диодных лазеров относительно мало исследованы в приложении к следующим актуальным направлениям.

Для зондирования охлажденных нейтральных атомов в оптических стандартах частоты и детекторах гравитационных волн требуются лазерные пучки с предельно «плоскими» волновыми фронтами (ВФ). Это связано с тем, что остаточная кривизна ВФ и паразитные аберрации высоких порядков в сочетании с движением, даже охлажденных атомов, могут приводить к сдвигам фазы и частоты, тем самым ограничивать точность атомных интерферометров и

оптических стандартов частоты на их основе. По оценкам для достижения точности на уровне $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-14}$ в оптическом стандарте на атомах кальция необходимо сформировать зондирующий лазерный пучок диаметром 4 мм с остаточной кривизной волнового фронта $|R| > 300\text{ м}$. Очевидно, что получение столь «плоских» лазерных пучков не возможно без приборов, позволяющих проводить абсолютные измерения кривизны волнового фронта и оценивать уровень остаточных aberrаций высоких порядков.

Создание полупроводниковых инжекционных лазеров, излучающих в зеленой-, синей- и ультрафиолетовой частях оптического спектра, является одним из основных направлений развития оптоэлектроники. В настоящий момент промышленно освоенные диодные лазеры для этих диапазонов ограничены по доступным длинам волн и уровням выходной мощности, что стимулирует развитие альтернативных подходов. В частности, широко используется генерация второй гармоники в нелинейных кристаллах, которые для повышения коэффициента преобразования помещают в оптический интерферометр с высокой добротностью. При этом необходимо обеспечить пространственное согласование входного эллиптического лазерного пучка с аксиально-симметричной собственной модой интерферометра.

В качестве источников перестраиваемого зондирующего излучения в спектроскопии широко используют диодные лазеры, которые обладают уникальным сочетанием свойств, предоставляющим большие диагностические возможности. Однако обычные диодные лазеры с резонаторами, образованными сколотыми гранями кристалла, склонны к генерации на нескольких продольных модах со спектральной шириной отдельной моды порядка 100 МГц. Одним из подходов, позволяющих улучшить спектральные характеристики диодного лазера до приемлемого уровня, является использование дополнительного внешнего резонатора. В настоящее время продолжаются поиски новых конфигураций внешних резонаторов диодных лазеров, которые сочетают большой диапазон спектральной перестройки, узкую ширину линии генерации и оптическое качество выходного пучка.

За последнее десятилетие устойчивый прогресс в области физики и технологии полупроводниковых материалов обеспечил создание мощных диодных лазеров с широким полосковым контактом, линеек и стеков на их основе. Однако качество выходных пучков у подобных лазерных излучателей заметно хуже дифракционного. В этом случае для формирования дифракционно-ограниченных пространственных мод искаженное излучение мощных диодных лазеров используют для оптической накачки лазерных систем

с хорошим оптическим качеством выходных пучков.

Перспективными лазерными системами с оптической накачкой являются лазеры на метастабильных инертных газах, предложенные и экспериментально апробированные несколько лет назад. Новая лазерная система интересна тем, что потенциально позволяет путем простого масштабирования создать лазер мегаваттного уровня с хорошим качеством пучка и излучением на длинах волн, попадающих в окна прозрачности атмосферы. К настоящему моменту, лазерная генерация продемонстрирована на метастабильных Ne^* , Ar^* , Kr^* и Xe^* . Важно отметить, что сопоставимые (по мощности) лазеры на парах щелочных металлов имеют многочисленные технические проблемы, связанные с химической агрессивностью усиливающей среды, что понижает надежность и безопасность работы таких систем. Таким образом, лазерная среда с метастабильными атомами инертных газов и оптической накачкой представляет большой практический интерес и требует внимательного изучения. В частности для спектрального согласования между излучением оптической накачки и линией поглощения метастабилей инертного газа необходимо учитывать величины столкновительных сдвигов и уширений линий поглощения, которые используются для оптической накачки метастабильных атомов инертных газов.

В диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Создание установки для измерения астигматизма волновых фронтов диодных лазеров, обеспечивающей минимальное влияние эллиптичности лазерного пучка на результаты измерений. Исследование связи пространственных характеристик излучения с волноводными свойствами лазерной структуры.
2. Разработка метода и создание установки для абсолютной калибровки датчика волнового фронта Шака-Гартмана с помощью сферических волновых фронтов. Оптимизация процедуры формирования лазерных пучков с радиусами кривизны волнового фронта $R \geq 300\text{м}$.
3. Повышение до 70% эффективности ввода излучения диодного лазера в накопительный кольцевой интерферометр за счет разработки алгоритмов оптимизации параметров системы согласования.
4. Исследование влияния кривизны волнового фронта возвращаемого лазерного поля на уровень оптической обратной связи диодного лазера с внешним резонатором. Оптимизация на этой основе конфигурации внешнего резонатора диодного лазера для получения диапазона непрерывной спектральной перестройки более 10 ГГц.

5. Измерение с точностью не менее чем 10% коэффициентов столкновительного уширения и сдвига спектральных линий для перехода $(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$ метастабильных атомов Ag и Kr, нарабатываемых в плазме высокочастотного разряда.

2. Достоверность полученных автором результатов подтверждается физической адекватностью используемых компьютерных моделей, воспроизводимыми данными экспериментов, и согласованностью между полученными результатами и данными из доступной 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. Установка для измерения астигматического расстояния диодных лазеров с инструментальной погрешностью ± 2 мкм в диапазоне 2-200 мкм с независимой регистрацией одномерных перетяжек по осевому распределению интенсивности в области фокусировки и скомпенсированным вкладом эллиптичности лазерного пучка в систематическую погрешность измерений.

2. Метод абсолютной калибровки датчика Шака-Гартмана с помощью эталонных сферических волновых фронтов, позволяющий достичь точности измерений кривизны фронта на уровне $0.5 \times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

3. Метод оптимизации анаморфотной оптической системы для ввода излучения диодного лазера в накопительный кольцевой интерферометр с эффективностью 82%, учитывающей пространственное рассогласование мод и потери на отражение.

4. Спектрально перестраиваемые источники когерентного излучения:

на основе диодного лазера с протяженным анаморфотным внешним резонатором, обеспечивающий перестройку в интервале 20 ГГц около 840 нм с шириной линии генерации $\Delta\nu_{\text{дл}} \sim 25$ МГц и мощностью в одночастотном режиме ~ 15 мВт;

на основе квантово-размерного диодного лазера с коротким внешним резонатором, образованным тандемным резонансным отражателем, обеспечивающим перестройку в интервале 100 ГГц около 830 нм с шириной линии генерации $\Delta\nu_{\text{дл}} \sim 200$ МГц и мощностью в одночастотном режиме ~ 5 мВт.

5. Измеренные с 10% точностью коэффициенты ударного уширения (ξ) и сдвига (β) перехода $(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$ в аргоне и криптоне для чистых газов и смесей (в 10^{-19} ГГц·см³):

$\xi_{\text{Ar-Ar}} = 2.7 \pm 0.1;$	—	$\xi_{\text{Ar-Ne}} = 1.49 \pm 0.03;$	$\xi_{\text{Ar-He}} = 3.4 \pm 0.1;$
$\beta_{\text{Ar-Ar}} = -2.05 \pm 0.05;$	—	$\beta_{\text{Ar-Ne}} = -0.51 \pm 0.05;$	$\beta_{\text{Ar-He}} = 0.60 \pm 0.03;$
—	$\xi_{\text{Kr-Ar}} = 3.3 \pm 0.1;$	$\xi_{\text{Kr-Ne}} = 1.49 \pm 0.05;$	—
$\beta_{\text{Kr-Kr}} = -1.4 \pm 0.1;$	$\beta_{\text{Kr-Ar}} = -2.07 \pm 0.08;$	$\beta_{\text{Kr-Ne}} = -0.65 \pm 0.01;$	$\beta_{\text{Kr-He}} = 0.51 \pm 0.04.$

5. Полнота изложения результатов работы в публикациях

Соискатель имеет 40 опубликованных работы по теме диссертации, в том числе 34 публикации в научных журналах из списка ВАК РФ, 6 работ в материалах и трудах Международных и Всероссийских конференций. Суммарный объем публикаций составляет 26.4 печ. листов, личный вклад автора 16.3 печ. листов. Опубликованные работы достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты, а также основные аспекты их практического применения. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо при его определяющем личном участии. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

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

1. Chernyshov, A.K. Measurement of pressure shift and broadening for Ar and Kr $4s[3/2]_2 - 4p[5/2]_3$ transition in rare gases using diode-laser spectroscopy / A.K. Chernyshov, P.A. Mikheyev, N.I. Ufimtsev // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2019. – V.222-223. – P.84-88.
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 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. Wilper, G. Improvement of the fractional uncertainty of a neutral-atom calcium optical frequency standard to 2×10^{-14} / G. Wilper, C. Degenhardt, T. Binnewies, A. Chernyshov, F. Riehle, J. Helmcke, U. Sterr // Applied Physics B. – 2003. – V. 76. – P.149-156.
4. Chernyshov, A. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute

measurements of wavefronts / A. Chernyshov, U. Sterr, F. Riehle, J. Helmcke, J. Pfund // Applied Optics. – 2005. – V. 44, № 30. – P.6419-6425.

5. Величанский, В.Л. Влияние кривизны волнового фронта на характеристики инжекционного лазера с внешним резонатором / В.Л. Величанский, А.К. Чернышов // Квантовая электроника. – 1996. - Т.23, №3. - С.233-237.

6. Котова, С.П. Влияние астигматизма на согласование лазерного диода с внешним резонатором / С.П. Котова, А.К. Чернышов, Г.Н. Чернышова // Квантовая электроника. – 1993. – Т.20, №5. – С.509-512.

7. Chernyshov, A.K. Efficient second harmonic generation of a diode laser using ring cavity with a KNbO₃ crystal / A.K. Chernyshov, E.A. Chernyshova // Physics of Wave Phenomena. - 2011. - V. 19, № 4. - P.244-250.

8. Chernyshov, A.K. Diode-laser derivative spectroscopy without lock-in amplifier / A.K. Chernyshov, E.A. Chernyshova // Physics of Wave Phenomena. - 2011. - V. 19, № 2. - P.89-92.

9. Чернышов, А.К. Калибратор длин волн для диапазона 0.6-1.4 мкм на основе стартеров люминисцентных ламп / А.К. Чернышов // Приборы и техника эксперимента. – 2018. - №1. – С.141-144.

10. Чернышов, А.К. Спектрально перестраиваемый жидкокристаллический поляризационный изолятор для диодных лазеров / А.К. Чернышов, С.П. Котова // Приборы и техника эксперимента. – 2006. - № 1. – С.100-103.

11. Чернышов, А.К. Диодный лазер с внешним сдвоенным отражателем для газоанализа / А.К. Чернышов, П.А. Михеев, Н.Н. Лунев // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2018. – Т.3. – С.28-33.

12. Чернышов, А.К. Термометрия газоразрядной ячейки калибратора оптических длин волн / А.К. Чернышов, П.А. Михеев // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2018. – Т.10. – С.9-14.

13. Чернышов, А.К. Внешний резонатор с цилиндрической линзой для полосковых астигматичных лазерных диодов / А.К. Чернышов, Г.Н. Чернышова // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 1997. - №5-6. - С.47-54.

14. Величанский, В.Л. Преобразование эллиптического пучка излучения инжекционного лазера в аксиально-симметричный пучок / В.Л. Величанский, А.К. Чернышов А.К. // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 1996. – №3-4. – С.38-45.

15. Чернышов, А.К. Влияние длины внешнего резонатора на спектр лазерного диода с направляющим эффектом усиления / А.К. Чернышов, С.П. Котова // Краткие сообщения по физике. - 1993. - № 5-6. - С.8-12.

16. Chernyshov, A.K. Characterization and spatial matching of laser diode beams / A.K. Chernyshov, S.P. Kotova, V.L.Velichanskii // Journal of Russian Laser Research. – 2002. – V.23, №2. – P.132-147.

17. Velichanskii, V.L. Method of measuring the astigmatic distance of laser diodes / V.L.Velichanskii, A.S. Zibrov, S.P. Kotova, G.T. Pak, A.K. Chernyshov // Journal of Soviet Laser Research. – 1991. - V.12, № 4. - P.341-352.

18. Чернышов, А.К. Перестраиваемая конверсия излучения диодного лазера в моды Эрмита-Гаусса и Лагерра-Гаусса / А.К. Чернышов // Известия РАН. Серия Физическая. – 2011. – Т.75, № 12. – С.1698-1703.

19. Величанский, В.Л. Влияние асимметрии ближнего поля полупроводникового лазера на измерение астигматического расстояния / В.Л. Величанский, А.С. Зибров, С.П. Котова, Г.Т. Пак, А.К. Чернышов А.К. // Письма в ЖТФ. - 1991. - Т.17, вып.4. - С.50-53.

20. Гильдина, А.Р. Коэффициенты столкновительного уширения линий аргона и криптона в неоне / А.Р. Гильдина, П.А. Михеев, А.К. Чернышов, Н.И. Уфимцев, В.Н. Аязов // Физическое образование в вузах. – 2016. – Т.22, №1С. – С.40С-41С.

21. Гильдина, А.Р. Коэффициенты столкновительного уширения аргона и криптона в низкотемпературной плазме / А.Р. Гильдина, П.А. Михеев, А.К. Чернышов, Н.И. Уфимцев, В.Н. Аязов // Фотоника. – 2017. – Т.65, №51. – С.44-51.

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

- The International Quantum Electronics Conference, IQEC/LAT 2002 (Moscow, Russia, 22–28.06.2002),
- The 10th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (Moscow, Russia, 06–10.07.2015).

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

– метод измерения небольших ($\sim \lambda_{дл}$) астигматических расстояний с коррекцией систематической погрешности, вносимой эллиптичностью оптического пучка диодного лазера;

– метод абсолютной калибровки датчика волнового фронта Шака-Гартмана с помощью сферического волнового фронта.

– метод одновременного измерения коэффициентов столкновительного

уширения и сдвига спектральных линий метастабильных атомов в плазме электрического 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

– разработанная методика позволяет объективно подтверждать наличие или отсутствие рефрактивного волновода, сформированного скачком показателя преломления в лазерной структуре слоев, что необходимо для оптимизации технологических процессов изготовления диодных лазеров и обоснованного выбора образцов излучателей;

– с помощью датчика Шака-Гартмана стал возможен контроль волновых фронтов с 300м радиусами кривизны у колиммированных лазерных пучков, что позволит увеличить точность стандартов частоты на охлажденных атомах;

– измерены коэффициенты столкновительного уширения и сдвига спектральных линий для перехода $(n+1)s[3/2]_2 \rightarrow (n+1)p[5/2]_3$ метастабильных атомов Ag и Kг с точностью не хуже чем 10%.

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. Разработка и создание измерительно-диагностического комплекса для контроля пространственных характеристик выходного излучения диодных лазеров будет способствовать достижению важных практических результатов в приложениях, где определяющим фактором является высокое оптическое качество лазерного пучка. В частности, формированию зондирующих лазерных пучков с радиусом кривизны волнового фронта $|R| > 300m$, что позволит повысить точность оптических стандартов частоты на охлажденных атомах до уровня $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-14}$.

На основе квантово-размерного диодного лазера с тандемным интерферометром в качестве дополнительного внешнего резонансного отражателя создан компактный источник когерентного излучения с диапазоном непрерывной перестройки ~ 100 ГГц для молекулярной спектроскопии.

Разработан метод измерения коэффициентов столкновительного уширения

и сдвига спектральных линий в плазме высокочастотного разряда, основанный на сопоставлении расчетного и измеренного значений давления в ячейке и учитывающий температуру газа, что позволяет определять вышеуказанные коэффициенты с точностью лучше 10%.

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

Диссертация «Оптические системы на основе диодных лазеров для управления пространственными и спектральными характеристиками излучения и контроль параметров лазерных пучков» Чернышова Александра Константиновича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Заключение принято на совместном заседании Учёного Совета Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (протокол № 4/19 от 22 мая 2019 г.) и кафедры физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Присутствовало на заседании 15 чел. Результаты голосования: «за» - 15, «против» - 0, «воздержались» - 0.

Заведующий кафедрой физики
Самарского университета, д.ф.-м.н.,
профессор

Учёный секретарь СФ ФИАН,
д.т.н.



И.П. Завершинский

С. И. Яресько