

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки

Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)

Доктор физ.-мат. наук, профессор

Задков В.Н.



2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе

Шатохина Алексея Николаевича

**«Разработка и исследование спектральных приборов на основе плоской
аперiodической дифракционной решетки для мягкого рентгеновского
диапазона»,**

представленной на соискание учёной степени

кандидата физико – математических наук по специальности

01.04.0.5 - оптика.

Диссертационная работа Шатохина Алексея Николаевича посвящена исследованию физических принципов и практической разработке новых спектральных приборов для мягкого рентгеновского диапазона. Актуальность этих исследований связана с задачами спектроскопии многозарядных ионов, диагностики плотной горячей плазмы, а также практическими приложениями для нанолитографических технологий. Основным объектом исследований - отражательные плоские дифракционные решётки с переменным шагом. Автором диссертации продемонстрировано понимание принципов действия таких решёток, рассчитаны и построены два новых спектральных прибора на их основе, с помощью этих приборов получены спектры лазерной плазмы.

Значимость диссертационной работы заключена в существенном шаге развития спектральной техники очень трудного для исследований диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Описанные методы расчёта и разработанные на их основе приборы позволят получить новые результаты, важные для практических применений. Содержание диссертационной работы не вызывает сомнений в достоверности приведённых результатов.

Структурно диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Введение содержит литературный обзор по тематике решёток с переменным шагом, из которого вытекают цели и задачи диссертационной работы. Сформулированы основные результаты и положения, выносящиеся на защиту.

В первой главе излагается общая теория решёток с переменным шагом, объясняется компенсация астигматизма монохроматического изображения на одной длине волны. Рассматриваются два метода изготовления таких решёток – электронно лучевая и интерференционная литографии. Обсуждаются проблемы методов. Описываются конкретные образцы решёток, сделанных согласно расчётам автора.

Вторая глава посвящена разработке и экспериментальному тестированию стигматического спектрометра, в котором помимо решётки с переменным шагом применяется аperiодическое многослойное сферическое зеркало нормального падения, отражающее излучение в диапазоне 12.5 -25 нм. Зеркало формирует сходящийся пучок излучения, близкий к гомоцентрическому, который диспергируется решёткой. Автором показано, что в случае падения на решётку с переменным шагом слабоастигматического сходящегося пучка возможна компенсация астигматизма монохроматического изображения источника для двух длин волн в пределах рабочего диапазона. В результате фактически во всём рабочем диапазоне расфокусировка из – за остаточного астигматизма не превышает размера одного пикселя CCD матрицы (13 мкм). Разработанная схема прибора была протестирована с использованием лазерной плазмы в качестве источника. Автор сумел подобрать геометрию спектрометра таким образом, что в плоскости детектора было одновременно сфокусировано изображение входной щели в направлении дисперсии и источник излучения в направлении перпендикулярном плоскости дисперсии, несмотря на то, что источник находился в 30 мм за щелью. Было продемонстрировано спектральное разрешение $\frac{\lambda}{\delta\lambda} \cong 1000$ и пространственное разрешение 20-30 мкм. При

использовании полиэтиленовой мишени для создания лазерной плазмы обнаружено уширение линии H_{β} иона CVI, зависящее от расстояния до мишени. Оно было интерпретировано как Штарковское уширение, дающее для электронной плотности плазмы значение $N_e = 4.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ вблизи мишени.

В третьей главе рассказывается ещё об одном спектральном приборе, реализованном с помощью решётки с переменным шагом – сканирующем спектрометре/монохроматоре. Свойство изучаемой решётки изменять форму кривой фокусировки здесь используется для реализации схемы монохроматора с постоянным углом отклонения. Входная щель фокусируется сферическим зеркалом скользящего падения, при этом удастся подобрать геометрические параметры схемы таким образом, что при вращении решётки расфокусировки изображения спектральных линий на выходной щели практически не происходит. Схема была реализована практически, вместо выходной щели использовалась CCD матрица. В качестве источника излучения использовалась лазерная плазма. Было показано, что разрешающая способность спектрометра $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$ в диапазоне 100 – 300 Ангстрем превышает 1000 и при сканировании спектра вращением решётки остаётся неизменной.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

К содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. Разрешающая способность спектрометров определяется фактически по качеству изображения спектральных дублетов «на глаз». Такая процедура не может считаться адекватной, количественная оценка разрешения должна вытекать из количественной обработки спектрограмм. Так, в качестве возможной методики могло применяться измерение ширины одиночных линий с последующим вычислением величины $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$.
2. При анализе Штарковского уширения линии H_{β} иона CVI не был проанализирован вклад различных механизмов в полную ширину линий. Видимые ширины этой линии на расстояниях 200-500 мкм от поверхности мишени сравнимы с аппаратной, вклад Допплеровского разлётного уширения также может быть сравним с видимой шириной. В результате электронная плотность плазмы, измеренная в указанном диапазоне расстояний, является сильно завышенной.

3. Глава 3, Рис. 3.7. Идентификация линии около 181.1 А как группы линий кислорода вызывает сомнение. Согласно базе данных NIST в этой области есть две линии иона О IV из перехода 2p-5d с длинами волн 181.15 А и 182.276 А. Они явно не попадают на имеющийся на спектрограмме максимум. Либо на рисунке неточно указана шкала длин волн, либо эта линия не принадлежит кислороду.
4. В тексте диссертации присутствуют опечатки и неудачные формулировки. Несколько примеров:
- Стр.32. В правой части формулы 1.28 должны стоять не φ, ψ а φ_0, ψ_0 . И для компенсации астигматизма надо положить $L_2 = L_1$.
- Стр. 56, 2 абзац 2 строка – опечатка $\psi_0 \rightarrow \varphi_0$
- Стр. 62 5 строка. Радиус равен 1 метру, а не 10.
- На Стр. 37 говорится о величине «отклонения номера штриха Δn_w ». Реально имеется в виду отклонение координаты штриха, выраженное в периодах решётки.

В целом диссертация Шатохина Алексея Николаевича представляет завершённое научное исследование, в которое вложено много труда, и которое несмотря на отмеченные недостатки заслуживает положительной оценки. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы и представлены на конференциях. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание. Результаты работы могут быть использованы в Институте спектроскопии РАН, Государственном Научном Центре РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований и других исследовательских центрах, занимающихся изучением плотной горячей плазмы.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация Шатохина Алексея Николаевича соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по действующему "Положению о присуждении ученых степеней", утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации № от 24.09.2013г., а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико – математических наук по специальности 01.04.05 Оптика.

Диссертационная работа Шатохина А.Н. заслушана на семинаре отдела атомной спектроскопии Института Спектроскопии РАН. Отзыв на диссертацию составлен ведущим научным сотрудником отдела атомной спектроскопии Института Спектроскопии

РАН, Павлом Станиславовичем Анциферовым и одобрен на семинаре отдела атомной спектроскопии Института Спектроскопии РАН 07 сентября 2020 года.

Ведущий научный сотрудник

отдела атомной спектроскопии ИСАН

кандидат физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии

Российской академии наук (ИСАН),

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.

Телефон: 8(495) 850-18-19

e-mail: ants@isan.troitsk.ru



/Анциферов Павел Станиславович/

Главный научный сотрудник

и исполняющий обязанности заведующего

отдела атомной спектроскопии ИСАН,

доктор физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии

Российской академии наук (ИСАН),

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.

Телефон: 8(495) 851-02-25

e-mail: ryabtsev@isan.troitsk.ru



/Рябцев Александр Николаевич/

Подписи сотрудников ИСАН П.С. Анциферова
и А.Н. Рябцева заверяю.

Учёный секретарь ИСАН, кандидат

физико-математических наук



/Перминов Евгений Борисович/

Список основных работ сотрудников ведущей организации Института спектроскопии РАН по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Абраменко Д Б, Анциферов П С, Астахов Д И, Виноходов А Ю, Вичев И Ю, Гаязов Р Р, Грушин А С, Дорохин Л А, Иванов В В, Ким Д А, Кошелев К Н, Крайнов П В, Кривокорытов М С, Кривцун В М, Лакатош Б В, Лаш А А, Медведев В В, Рябцев А Н, Сидельников Ю В, Снегирёв Е П, Соломянная А Д, Спиридонов М В, Цыгвинцев И П, Якушев О Ф, Якушкин А А. Плазменные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографии и сопутствующих технологических процессов (к 50-летию Института спектроскопии РАН)// УФН, 2019 – № 189 – 323–334
2. Torretti F., Windberger A., Ryabtsev A., Dobrodey S., Bekker H., Ubachs W., Hoekstra R., Kahl E. V., Berengut J. C., Crespo López-Urrutia J. R., and Versolato O. O.. Optical spectroscopy of complex open-4d-shell ions Sn^{7+} – Sn^{10+} //Phys. Rev. A, 2017 – № 95 – 042503
3. Windberger A.; Torretti F.; Borschevsky A.; Ryabtsev A.; Dobrodey S.; Bekker H.; Eliav E.; Kaldor U.; Ubachs W.; Hoekstra R.; Lopez-Urrutia J. R.; Versolato O. O.. Analysis of the fine structure of Sn^{11+} - Sn^{14+} ions by optical spectroscopy in an electron-beam ion trap//Phys. Rev. A, 2016 – № 94 – 012506
4. Abramenko D. B., Antsiferov P. S., Dorokhin L. A., Medvedev V. V., Sidelnikov Y. V., Chkhhalo N. I., & Polkovnikov V. N.. Single-channel method for measuring the reflectance spectra of grazing incidence mirrors in the extreme ultraviolet range//Optics letters, 2019 – № 44(20) – 4949-4952.
5. Antsiferov P. S., Dorokhin L. A., & Krainov P. V. Grazing incidence off Rowland spectrometer with shifted slit //Review of Scientific Instruments, 2016 – № 87(5) – 053106.
6. Grigoryev S. Yu., Lakatos B. V., Krivokorytov M. S. et al.. Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse // Physical Review Applied, 2018 – №10 (6) – 064009.
7. Antsiferov P. S., Dorokhin L. A., and Koshelev K. N.. Extreme ultraviolet radiation of transient plasma in fast conical discharge // Phys. Rev. E, 2019 – №100 – 023204
8. Van Der Horst R. M., Beckers J., Osorio E. A., Astakhov D. I., Goedheer W. J., Lee C. J., Ivanov V. V., Krivtsum V. M., Koshelev K. N., Lopaev D. V., Bijkerk F. and Banine V. Y.. Exploring the electron density in plasma induced by EUV radiation: I. Experimental study in hydrogen.// Journal of physics D: applied physics, 2016 – № 49(14) – 145203.
9. Astakhov D. I., Goedheer W. J., Lee C. J., Ivanov V. V., Krivtsun V. M., Koshelev K. N., Lopaev D. V., Van Der Horst R. M., Beckers J., Osorio E. A. and Bijkerk F.. Exploring the electron density in plasma induced by EUV radiation: II. Numerical studies in argon and hydrogen. //Journal of physics D: applied physics, 2016 – № 49(29) – 295204.
10. Виноходов А. Ю., Кривокорытов М. С., Сидельников Ю. В., Кривцун В. М., Медведев В. В., Кошелев К. Н.. Яркий источник ЭУФ излучения на основе лазерной плазмы при использовании капельной жидкометаллической мишени. //Квантовая электроника, 2016 –№ 46:5 – 473–480