

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук

Потёмкина Фёдора Викторовича

на диссертационную работу Шатохина Алексея Николаевича

«Разработка и исследование спектральных приборов на основе плоской аперiodической дифракционной решетки для мягкого рентгеновского диапазона»,
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Интерес к сверхбыстрой спектromетрии с временным разрешением с использованием излучения вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и мягкого рентгеновского (МР) диапазонов значительно возрос за последнее десятилетие в основном из-за разработки новых источников сверхкоротких импульсов на установках класса мега-сайенс, рентгеновских лазеров на свободных электронах (XFEL), а также лабораторных установок, основанных на лазерной плазме, генераторах высоких гармоник (ГВГ), генераторах рентгеновских импульсов аттосекундной длительности из газовой струи, релятивистских колеблющихся зеркалах и электронно-лучевых микроанализаторов с временным разрешением. Быстрый прогресс во всех областях продемонстрировал способность современных приборов даже в лабораториях достигать энергетических диапазонов так называемого «водяного окна» и выше до 1000 эВ с длительностью импульса до нескольких фемтосекунд. В отличие от гигантов XFEL, излучающих в настоящее время фотоны с энергиями до 20–30 кэВ с огромной мощностью в несколько ГВт, лабораторные источники излучают на несколько порядков меньший поток фотонов и, следовательно, нуждаются в чрезвычайно эффективной оптике для сохранения потоков и временных характеристик. К сожалению, решения, доступные в УФ-диапазоне, такие как конические решетки, больше не применимы в диапазоне энергий фотонов выше 200 эВ. Разработка дифракционных решёток, способных эффективно сочетать функции отражения, дисперсии по энергии квантов и фокусировки, до сих пор является важной актуальной задачей, позволяющей создавать спектрометры и монохроматоры в крайне важных ВУФ и МР диапазонах.

Диссертационная работа А. Н. Шатохина «Разработка и исследование спектральных приборов на основе плоской аперiodической дифракционной решетки

для мягкого рентгеновского диапазона» посвящена разработке теоретико-экспериментальных подходов для создания плоских аперiodических отражательных дифракционных решёток (в литературе называемых VLS-решёток) и их применения в сканирующем спектрометре/монокроматоре, работающем в мягком рентгеновском диапазоне, на примере регистрации спектра лазерной плазмы.

Диссертация включает в себя введение, три главы, заключение, список литературы и изложена на 94 страницах машинописного текста. Список литературы насчитывает 62 наименований.

Во *Введении* приведена общая информация о дифракционных решётках с аперiodическими штрихами, работающих в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описаны новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлена информация об апробации результатов исследования и о личном вкладе автора.

Первая глава в первой части содержит подробную информацию о фокусирующих свойствах в зависимости от параметров. Автор акцентирует внимание на том, что, подобрав правильный закон частоты штрихов от координаты, можно добиться, чтобы каждый небольшой участок VLS-решётки компенсировал абберации на выбранной длине волны. Это позволяет сформулировать оригинальный подход к расчёту фокусирующих свойств плоских VLS решёток. Вторая часть посвящена описанию технологий изготовления VLS-решёток, включающих механическую нарезку на гравировальном станке, интерференционную литографию и электронно-лучевую литографию. Демонстрируются и характеризуются впервые созданные в России VLS-решётки.

Во *Второй главе* в первой части описываются основные подходы, проводится расчёт изображающего спектрометра на основе VLS-решётки. Важно отметить, что расчёт ведётся с помощью программы XOP (X-ray Oriented Programs), являющейся хоть и не разработкой автора, но использование которой требует детального понимания всех особенностей изготовления подобных дифракционных решёток. В результате, автором

установлено, что астигматизм можно скомпенсировать полностью на двух длинах волн, а практический стигматизм достигается в широком спектральном диапазоне. Вторая часть посвящена практической реализации такого спектрального прибора. Результатом является создание и апробация оригинального спектрометра на область 125-250 Å на основе фокусирующего сферического Mo/Si зеркала и плоской отражательной VLS-решётки. Установлено, что разрешающая способность VLS-решётки, изготовленной методом электронно-лучевой литографии составляет ~500, а в случае изготовления с помощью интерференционной литографии ~1000. Продемонстрирована возможность использования разработанного спектрального прибора для диагностики плазмы с пространственным разрешением.

В Главе три описывается разработанный сканирующий спектрометр/монокроматор с плоским полем класса Хеттрика-Анвервуда на область длин волн 50-330 Å. Зарегистрированы спектры лазерной плазмы при воздействии мощным сфокусированным излучением ближнего ИК диапазона наносекундной длительности и продемонстрирована разрешающая способность 1300 на длине волны 182 Å.

В *Заключении* автор приводит основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) Обнаружены условия, при которых удаётся скомпенсировать астигматизм на двух длинах волн в мягком рентгеновском диапазоне при дифракции квазигомоцентрического пучка на плоской VLS-решётке.
- 2) Впервые в России рассчитан и реализован первый отечественный сканирующий спектрометр/монокроматор класса Хеттрика-Андервуда на основе плоской отражательной решётки и фокусирующего многослойного рентгеновского зеркала нормального падения. Спектральное разрешение прибора достигает 1300 при ширине рабочего спектрального диапазона в десятки ангстрем, что достаточно и кажется перспективным для использования его в задачах спектроскопии лабораторной плазмы.
- 3) Развиты методы расчёта, оптимизации и конструирования VLS-спектрометров различных типов с плоской VLS-решёткой. Экспериментально показано, что в сравнении с электронно-лучевой литографией, интерференционный метод создания VLS-решёток позволяет получить спектральное разрешение в 1.5-2 раза выше, однако закон изменения частоты штрихов может отличаться от

расчётного, что требует модифицирования схемы спектрометра.

Автор диссертации провёл вдумчивый и подробный анализ полученных экспериментальных результатов по диагностике лазерно-индуцированной плазмы многозарядных ионов, что позволило измерить спектральное разрешение созданного оригинального прибора и подтвердить значимость разработанного подхода для расчёта подобных аperiодических решёток. Результаты и выводы, которые приведены в диссертации, являются достоверными и обоснованными.

Несмотря на то, что рассматриваемая диссертационная работа проведена на высоком научном уровне, она не лишена недостатков:

- 1) Обзор современного состояния по применению VLS-решёток в спектроскопии не затрагивает такой важной и современной темы, как создание спектральной аппаратуры, работающей в мягком рентгеновском диапазоне, но при этом имеющее микронное пространственное и фемтосекундное временное разрешение, что может быть реализовано в комбинации такой решётки и отражающей зонной пластинки.
- 2) Во второй главе при описании технологий создания VLS-решёток вообще ничего не сказано о голографических методах (см. допустим Matthias Burkhardt, Martin Steglich, Michael Helgert, and Dennis Lehr "XUV gratings based on holography", Proc. SPIE 11491, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XV, 1149109 (21 August 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2568754>).
- 3) Третье защищаемое положение недостаточно точно и понятно сформулировано. Из него неясно с каким пространственным разрешением можно производить диагностику плазмы? Также не совсем понятен выбор именно лазерной плазмы для исследования спектральных характеристик созданного спектрального прибора.
- 4) В тексте диссертации ощущается нехватка в сравнении рассматриваемой оригинальной схемы стигматического спектрометра на основе многослойного рентгеновского фокусирующего зеркала нормального падения и плоской аperiодической решётки с аналогичными приборами, реализованными на вогнутых VLS-решётках?
- 5) В диссертации присутствуют опечатки. Так, на стр.24 в формуле пропущен символ «Г».

- 6) В части спектроскопии в мягком рентгеновском диапазоне лазерной плазмы некоторым выводам не достаёт конкретики с указанием конкретных величин рассматриваемых параметров. Так, допустим, на стр.67 автором делается следующее утверждение «Первое, полученный спектр менее яркий, однако присутствует ярко выраженный второй порядок дифракции.» Из приведенных данных на соответствующих графиках так и не становится понятней насколько менее яркий второй порядок дифракции? Также не очень понятно из текста, как профиль штриха может повлиять на яркость? На стр.76 «Входная и выходная щели неподвижны, фокусное расстояние изменяется незначительно в рабочем спектральном диапазоне.», опять же непонятно, что значит «незначительно», каков критерий?
- 7) В части применения разработанного стигматического спектрометра для регистрации изменения плотности электронов в разлетающейся плазме автор не приводит подробное описание возможных механизмов, приводящих к уширению линий $H\beta$ (135 Å) водородоподобного иона $C\ VI$ в лазерной плазме $[CH_2]_n$, фокусируясь только на штарковском механизме.

Указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертации.

Основные результаты диссертации представлены на 15 всероссийских и международных конференциях, и опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах, входящих в базу данных Web of Science, и одной монографии, что соответствует Положению о присуждении учёных степеней.

Автореферат диссертации полно и объективно отражает её содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Диссертация «Разработка и исследование спектральных приборов на основе плоской аperiодической дифракционной решетки для мягкого рентгеновского диапазона» полностью соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Шатохин Алексей Николаевич, без сомнения, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика (физико-математические науки).

Официальный оппонент:

Доцент кафедры общей физики и волновых процессов
Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
кандидат физико-математических наук
Потёмкин Фёдор Викторович



119991 Москва, Ленинские горы, д.1, стр.62

тел.: +7(495) 939-53-18

E-mail: potemkin@physics.msu.ru

«15» сентября 2020 г.

Подпись официального оппонента заверяю:

Декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова
доктор физико-математических наук
профессор
Сысоев Николай Николаевич



Список основных работ кандидата физико-математических наук
Ф.В. Потёмкина по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных
изданиях за последние 5 лет:

1. Migal E. A., Stremoukhov S. Y., Potemkin F. V. Ionization-free resonantly enhanced low-order harmonic generation in a dense gas mixture by a mid-ir laser field // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. — 2020. — Vol. 101. — P. 021401–1–021401–4.
2. Migal E. A., Pushkin A. V., Bravy B.G., Gordienko V.M., Minaev N.V., Potemkin F.V. 3.4-mJ 150-fs fe:znse hybrid mid-ir femtosecond system at 4.4 um for driving extreme nonlinear optics // *Optics Letters*. — 2019. — Vol. 44, no. 10. — P. 2550–2553
3. Migal E. A., Potemkin F. V., Gordienko V. M. Efficient strong-field low-order harmonic generation in xenon microplasma by a tightly focused cr:forsterite laser // *Laser Physics Letters*. — 2019. — no. 16. — P. 045401.
4. A. A. Garmatina, I. A. Zhvaniya, F. V. Potemkin, V. M. Gordienko Generation of x-ray radiation from a plasma in a microchannel of a copper target located in the air under the action of soft-focused femtosecond laser pulses with an intensity of 100 TW/cm^2 // *Quantum Electronics*. — 2018. — Vol. 48, no. 7. — P. 648–652.
5. Potemkin F. V., Mareev E. I., Smetanina E. O. Influence of wave-front curvature on supercontinuum energy during filamentation of femtosecond laser pulses in water // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. — 2018. — Vol. 97. — P. 033801.

...