

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Алексея Олеговича КОЛЕСНИКОВА "Разработка и исследование оптических элементов и спектральных приборов на их основе для вакуумной ультрафиолетовой области спектра", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика

Разработка, проектирование, изготовление и исследование оптических элементов для вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ,  $\lambda < 1000 \text{ \AA}$ ) и мягкой рентгеновской ( $\lambda < 300 \text{ \AA}$ ) областей спектра представляет большой интерес и высокую актуальность для изучения и диагностики спектров лабораторных и астрофизических источников излучения, солнечной атмосферы, лазерной плазмы, высоких гармоник лазерного излучения и т.д. Наиболее эффективными оптическими элементами в данной области длин волн по целому ряду причин являются плоские и вогнутые, т.е. фокусирующие, многослойные периодические и аperiodические структуры (зеркала) и дифракционные решётки, среди которых наибольший интерес представляют сравнительно недавно появившиеся решётки с переменным шагом, так называемые VLS-решётки (varied line-space gratings).

Аperiodические многослойные структуры и VLS-решётки позволяют существенно увеличить спектральный диапазон, в пределах которого коэффициент отражения практически не зависит от длины волны, что важно для многих задач спектроскопии и создания элементов изображающей оптики.

Синтез широкополосных рентгеновских зеркал и плоских или сферических VLS-решёток с заранее заданными параметрами представляет собой достаточно сложную как теоретико-расчётную, так и технологическую проблему. Решению именно этого круга задач и посвящена настоящая диссертационная работа, основная цель которой заключается в разработке новых оптических элементов (сферических VLS-решёток и многослойных широкополосных рентгеновских зеркал нормального падения) для вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областей спектра, в совершенствовании технологии изготовления этих элементов, а также в создании спектральных приборов на их основе для исследования лабораторной плазмы.

Структура диссертации классическая. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 134-х страницах, включает 54 рисунка и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 93 наименования.

**Во введении**, объёмом 19 стр., вначале приведен обзор современного состояния исследований в области создания и использования дифракционных решёток с переменным периодом и широкополосных многослойных рентгеновских зеркал, на

основе которого затем обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов (7 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях) и перечень авторских публикаций (6 статей в рецензируемых журналах, раздел 10.3 в коллективной монографии, 1 патент).

**В первой главе**, объемом 14 стр., которая называется “Решение “обратной” задачи интерференционной литографии для изготовления VLS-решёток”, вначале приводятся основные формулы, которые связывают коэффициенты полинома зависимости частоты штрихов сферической VLS-решётки от координаты вдоль горизонтальной оси, ортогональной центральной нормали, с угловыми и пространственными параметрами схемы интерференционной записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения. Далее строится начальное приближенное аналитическое обращение прямой задачи, после чего находится точное решение “обратной” задачи, которое основано на минимизации некоторого функционала, вычисляемого методом трассировки лучей. В итоге получается искомая зависимость номера штриха решётки от координат точки на апертуре решётки. Окончательная же проверка предложенной схемы записи решетки осуществляется также методом численной трассировки лучей по величине размера спектральных изображений точечного монохроматического источника.

В качестве подтверждения работоспособности данной схемы в заключительной части главы 1 проведено убедительное сравнение результатов расчёта зависимости частоты штрихов от координаты для решётки спектрографа скользящего падения с плоским полем с данными эксперимента по дифракции излучения He-Ne лазера на изготовленной в НПО ГИПО (г. Казань) решётке с заданными параметрами (радиус кривизны сферического зеркала и четыре первых коэффициента в полиноме зависимости частоты штрихов сферической VLS-решётки от координаты).

**Во второй главе**, с названием “Спектрограф скользящего падения с плоским полем для мягкого рентгеновского диапазона” и объемом 29 стр., с использованием уравнений для дифракционной решётки и положений горизонтального и вертикального фокусов дифрагированного излучения, а также условий компенсации меридиональной комы и сферической аберрации, обсуждаются фокусирующие свойства сферических VLS-решёток. Основное внимание уделено реализации таких условий, чтобы излучение падало на плоскую поверхность детектора почти перпендикулярно к ней, что важно для регистрации интенсивности без искажения и поглощения из-за увеличенной длины

пути в мёртвом слое детектора. Предложенный метод расчета оптической схемы спектрографа скользящего падения с плоским полем также активно использует численную трассировку лучей во всём рабочем спектральном диапазоне с поэтапным уменьшением остаточных aberrаций до размеров, не превышающих размеры одной-двух ячеек детектора.

В следующем разделе представлены результаты расчета оптических схем трёх спектрографов с различными рабочими диапазонами длин волн (90 – 250 Å, 50 – 275 Å и 20 – 110 Å, соответственно), разрешающими способностями (~400, ~860 и ~2400), а также с разными размерами (25 см, 50 см и 150 см). Последнее важно для их возможного практического размещения в тех или иных конкретных конструкциях.

Наиболее значимые и интересные результаты приведены в заключительной части 2-й главы по экспериментальной реализации описанного выше второго варианта спектрографа. Дифракционная решётка для прибора была изготовлена в НПО ГИПО методом интерференционной литографии, а возможности спектрографа был проверены при регистрации спектров лазерной плазмы мишеней из фтористого лития и тефлона. Показано, что прибор обладает высокой освещённостью спектральных линий и достаточно высоким спектральным разрешением ( $\geq 750$  по данным для двух близких линий излучения многократно ионизованных ионов фтора), что согласуется с расчётным значением ~880 и подтверждает высокое спектральное разрешение спектрографа.

Приведенная на стр. 63 блок-схема цикла разработки спектрографов скользящего падения с плоским полем наглядно показывает все этапы проведения расчётов, начиная от задания исходных требуемых параметров прибора и первоначальных аналитических расчётов до построения спектрального изображения точечного источника методом трассировки лучей, окончательной оптимизации схемы записи и изготовления VLS-решётки методом интерференционной литографии.

**В третьей главе**, с названием “Широкополосный изображающий спектрограф нормального падения для вакуумной ультрафиолетовой области спектра”, объёмом 31 стр., проведены расчеты для двух пар оптических элементов на основе двух различных схем широкополосных изображающих спектрографов нормального падения для рабочего спектрального диапазона с шириной около октавы и центральной длины волны  $\lambda_0 \sim 1250$  Å. Первая схема представляет собой сферическую VLS-решётку, тогда как вторая схема построена на основе периодической решётки с криволинейными штрихами. В каждой схеме рассмотрены случаи дифракции как во внешнем, так и во внутреннем  $\pm 1$ -м порядках.

В случае сферической VLS-решётки с прямолинейными штрихами используется установка решётки и детектора на оси цилиндрической симметрии решетки. Такая геометрия замечательна тем, что приводит к дифракционному качеству вертикального изображения центральной точки входной щели. Для сферической периодической решётки с криволинейными штрихами детектор и щели установлены на круге Роуланда.

Далее автор проводит детальное сравнение основных характеристик изображающих спектрографов для всех этих четырёх схем, таких как: диапазон длин волн, обратная линейная дисперсия, спектральная разрешающая способность, пространственное разрешение, линейное поле зрения.

Весьма положительным считаю тщательный анализ многочисленных двумерных карт по поиску оптимальных схем, а также подробное обсуждение результатов трассировки лучей. Показано, что схемы на основе сферической VLS-решетки и схемы на основе периодической решётки с криволинейными штрихами в целом обладают достаточно близкими изображающими свойствами с пространственным разрешением на уровне  $\sim 26$  мкм. Однако схемы, работающие в первом внутреннем порядке дифракции ( $m = +1$ ), характеризуются почти на порядок более высокой спектральной разрешающей способностью  $\lambda/\delta\lambda \sim 10000$  по сравнению с  $\lambda/\delta\lambda \sim 1500$  в первом внешнем порядке ( $m = -1$ ), но являются более громоздкими - радиус поверхности решётки  $R \sim 5$  м по сравнению с  $R \sim 1$  м в случае с  $m = -1$ . По ряду технологических причин периодическая решётка с криволинейными штрихами является более универсальной и, кроме того, может использоваться не только в изображающей схеме, но и в любой астигматической оптической схеме, построенной на круге Роуланда.

**В четвёртой главе**, с названием "Расчёт и применение многослойных аперидических Mo/Be-зеркал в области длин волн  $\lambda > 111 \text{ \AA}$ ", объёмом 19 стр., представлены результаты по расчёту широкополосных аперидических зеркал на основе многослойной аперидической структуры Mo/Be с уменьшенным разбросом толщин слоев в структуре, а также по использованию этих зеркал с равномерным отражением в диапазоне длин волн  $111 - 138 \text{ \AA}$  в схеме изображающего дифракционного спектрографа с пропускающей решёткой.

Известно, что в процессе минимизации стандартного функционала среднеквадратичных отклонений расчётного коэффициента отражения от целевого коэффициента вычисляемая структура обычно характеризуется большим разбросом толщин слоёв для каждого материала, в том числе и соседних слоёв, что вносит дополнительные

сложности при её синтезе вследствие плохо контролируемой зависимости плотности напыляемого материала от его толщины (или времени напыления).

В первой части 4-й главы описывается оригинальный метод оптимизации многослойных апериодических структур на максимальное равномерное отражение в широком диапазоне длин волн, который состоит в модификации общепринятого (классического) функционала путем добавления одновременной процедуры уменьшения разброса толщин соседних слоёв, что значительно повышает удобства реального синтеза апериодической многослойной структуры.

Далее автор детально сравнил и обсудил результаты расчётов для 4-х различных структур как без учета сглаживания, так и с вариацией коэффициента и “периода” сглаживания. В качестве начального приближения бралась периодическая структура, а оптимизация проводилась методом наискорейшего спуска. В итоге была продемонстрирована возможность создания широкополосных зеркал нормального падения с равномерным отражением на уровне  $\sim 10 - 15\%$  в диапазоне длин волн  $\lambda \sim 111 - 200 \text{ \AA}$  на основе апериодической многослойной структуры Mo/Be. Включение процедуры сглаживания действительно приводит к уменьшению разброса толщин слоёв для структур, оптимизированных на равномерное отражение в относительно узких спектральных диапазонах, при сохранении уровня плато и хорошей равномерности спектра отражения. Однако с расширением спектрального диапазона коэффициента отражения эффективность процедуры сглаживания снижается.

Во второй части этой главы излагаются полученные в ФИАН результаты по применению широкополосных Mo/Be зеркал в схеме изображающего дифракционного спектрографа с пропускающей решёткой. Использовались три зеркала с почти равномерным отражением на уровне  $\sim 12 - 14\%$  в диапазоне  $111 - 138 \text{ \AA}$ . Сферические подложки с радиусом 1 м были изготовлены в ФИАН, а многослойные апериодические зеркала на основе стековой структура, состоящей из шести нанесенных друг на друга периодических структур, были синтезированы в ИФМ РАН, где также были измерены на рефлектометре спектральные коэффициенты отражения.

В первой серии экспериментов измерения проводились с вольфрамовой лазерно-плазменной мишенью, дающей квазинепрерывный спектр. В результате обработки данных по измерению коэффициентов отражения на рефлектометре в ИФМ РАН и спектра отражения, полученного на дифракционном спектрографе в ФИАНе, было получено отношение чувствительности ПЗС-детектора на кремниевой основе до и после L-края Si, и по нему оценена толщина кремниевого мёртвого слоя ПЗС-матрицы, которая составила  $54 \pm 0.5 \text{ нм}$ . Дисперсия пропускающей решётки определялась по частоте её штрихов  $p = 989 \text{ мм}^{-1}$ , полученных по данным дифракции излучения He-Ne

лазера. Была оценена скважность рабочих штрихов 0.44, а также определен вид и скважность достаточно сложной регулярной поддерживающей структуры пропускающей решётки.

Вторая серия экспериментов проводилась со стигматическим вариантом спектрографа и с использованием линейчатых спектров лазерно-плазменных мишеней LiF и Mg, которые содержат линии в диапазоне 111 – 138 Å. При используемой в эксперименте ширине входной щели 15 мкм и размере ячейки детектора 13 мкм, на длине волны  $\lambda = 125 \text{ Å}$  в центре рабочего диапазона спектральное разрешение составило 0.78 Å, а спектральная разрешающая способность  $\sim 160$ . Далее с использованием метода градиентного спуска была решена обратная задача разделения трёх первых порядков дифракции и восстановлен пространственный профиль распределения интенсивности спектральной линии иона F VII 127.7 Å над мишенью. Пространственное разрешение спектрографа, определённое по ширине границы между светом и тенью, составляет  $\sim 50$  мкм.

К наиболее важным и существенным результатам можно отнести следующие:

1. Разработан метод решения “обратной” задачи интерференционной литографии для схемы записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения, основанный на аналитическом обращении прямой задачи с последующей оптимизацией схемы записи в лучевом приближении.
2. Создание первого отечественного спектрографа скользящего падения с плоским полем на основе сферической VLS-решётки для мягкого рентгеновского диапазона ( $\lambda \sim 50 - 275 \text{ Å}$ ) и его демонстрация в эксперименте с лазерной плазмой.

В целом диссертация А.О. Колесникова производит самое благоприятное впечатление. В первую очередь благодаря своей целостности сочетания расчётов с экспериментами, удобной рубрикации глав на параграфы, чёткости изложения полученных результатов, тщательности описания многочисленных численных параметров, т.е. указания размеров, расстояний, радиусов, углов и т.п., а также приведению большого числа хорошо подобранных графических иллюстраций.

По диссертации можно сделать следующие замечания, часть из которых носит характер пожеланий:

1. К сожалению, из-за полного отсутствия поясняющих рисунков, первая часть Введения, посвященная обзору спектральных приборов на основе существующих решёток, воспринимается крайне тяжело.
2. Ясно, что понятие “плоское поле” при описании спектрографа в главе 2 (см. также

рис. 7 на стр. 42 и особенно рис. 8 на стр. 43) достаточно условное. Желательно было бы привести аналитические оценки и количественные характеристики ширины углового спектра и угла наклона спектральной фокальной кривой.

3. Имеется досадная путаница (опечатки) ссылок на первые внешний ( $m = -1$ ) и внутренний ( $m = +1$ ) порядки отражения (см. стр. 18 в автореферате и стр. 82, 83, 94 в диссертации).

4. Пункты 2 и 3 в разделе “Заключение” на стр. 115 про спектрограф скользящего падения с плоским полем на основе сферической VLS-решётки в значительной мере дублируют друг друга.

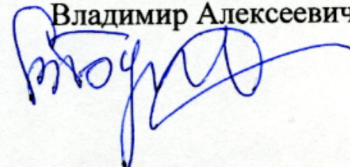
Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация изложена чётко, грамотно и очень аккуратно. Многочисленные тщательно подобранные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные результаты, полученные автором. Все четыре защищаемые положения сформулированы чётко и правильно. Достоверность и новизна результатов, а также обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывают сомнения. Формулировка основных результатов в конце каждой главы хорошо помогает восприятию текста. Автореферат даёт достаточно полное представление о материале диссертации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на представительных совещаниях и конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Считаю, что по объёму полученных результатов, их новизне, актуальности, научной и практической значимости представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 года, а её автор, Алексей Олегович Колесников, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - оптика.

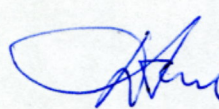
Профессор кафедры физики твердого тела  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова  
доктор физико-математических наук

119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,  
МГУ, физический факультет  
тел. 8(495) 939-12-26, e-mail: vabushuev@yandex.ru  
28 октября 2021 г.

Владимир Алексеевич Бушуев



Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю  
декан физического факультета МГУ,  
профессор




Список основных работ доктора физико-математических наук В.А. Бушуева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Bushuev V.A. Influence of thermal self-action on the diffraction of high-power X-ray pulses // *J. Surf. Investig.* – 2016. – Vol. 10, No. 6. – P. 1179-1186.
2. Kopylov D.A., Svyakhovskiy S.E., Dergacheva L.V., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I., Murzina T.V. Observation of optical second-harmonic generation in porous-silicon-based photonic crystals in the Laue diffraction scheme // *Phys. Rev. A.* – 2016. – Vol. 93, No. 5. – P. 053840.
3. Frank A.I., Kulin G.V., Bushuev V.A. Non-stationary transformation of neutron energy by a moving grating // *Journal of Physics: Conference Series.* 2016. – Vol. 746. – P. 012053.
4. Bushuev V.A., Dergacheva L.V., Mantsyzov B.I. Asymmetric pendulum effect and transparency change of P T -symmetric photonic crystals under dynamical Bragg diffraction beyond the paraxial approximation // *Phys. Rev. A.* – 2017. – Vol. 95, No. 3. – P. 033843.
5. Shabalin A.G., Yefanov O.M., Nosik V.L., Bushuev V.A., Vartanyants I.A. Dynamical effects in Bragg coherent x-ray diffraction imaging of finite crystals // *Phys. Rev. B.* – 2017. – Vol. 96, No. 6. – P. 064111.
6. Tsvetkov D.M., Bushuev V.A., Konotop V.V., Mantsyzov B.I. Broadband quasi- PT -symmetry sustained by inhomogeneous broadening of the spectral line // *Phys. Rev. A.* – 2018. – Vol. 98, No. 5. – P. 053844.
7. Bushuev V.A., Petrov I.A. Analysis of a two-crystal delay line for femtosecond pulses of the X-ray free electron laser // *Resour. Technol.* – 2018. – Vol. 1 – P. 36-46.
8. Bushuev V.A., Tsvetkov D.M., Konotop V.V., Mantsyzov B.I. Unidirectional invisibility and enhanced reflection of short pulses in quasi-PT-symmetric media // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44, No. 23. – P. 5667.
9. Tsvetkov D.M., Bushuev V.A., Mantsyzov B.I. Optical pulse dynamics under quasi-PT-symmetry. // *Phys. Rev. A.* – 2019. Vol. 99, No. 2.- P. 023846.
10. Bushuev V.A., Frank A.I. Depth of Formation of Specular Reflection of X-Rays and Neutrons and its Relationship with the Group Delay Time // *Armen. J. Phys.* – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 218-227.
11. Kulin G.V., Frank A.I., Bushuev V.A., Khaydukov Yu.N., Roshchupkin D.V., Vadilonga S., Sergeev A.P., Non-stationary neutron diffraction by surface acoustic waves // *Phys. Rev. B.* – 2020. Vol. 101, No. 16.- P. 165419.
12. Tsvetkov D.M., Bushuev V.A., and Mantsyzov B.I. Chirped pulse propagation in quasi-PT-symmetric medium with a broadband exceptional point // *Optics Express*, 2021, Vol. 29, No. 10, P. 14548-14560.