

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 535-32 + 533.9.082.5

Вишняков Евгений Александрович

**Новые элементы многослойной оптики мягкого рентгеновского
диапазона и их применение в спектроскопии**

Специальность 01.04.05 – оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена в Отделе спектроскопии Отделения оптики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
и на Кафедре электрофизики
Московского физико-технического института
(государственного университета)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Рагозин Евгений Николаевич,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический
институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Отдел
спектроскопии, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бушуев Владимир Алексеевич,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Физический факультет, Кафедра физики твердого тела, профессор

кандидат физико-математических наук
Анциферов Павел Станиславович,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт спектроскопии Российской академии наук,
зав. сектором спектроскопии высокотемпературной плазмы

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики микроструктур
Российской академии наук, г. Нижний Новгород

Защита состоится «30» сентября 2013 года в 12 часов на заседании
Диссертационного совета № Д 002.023.03 при Физическом институте
им. П.Н. Лебедева РАН по адресу:
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « » _____ 2013 года.

Учёный секретарь
Диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Шиканов А. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Мягкий рентгеновский (МР) и вакуумный ультрафиолетовый (ВУФ) диапазоны спектра электромагнитных волн остаются довольно трудными для исследований. Это связано с сильным поглощением такого излучения (в том числе газами) и с низкими коэффициентами отражения от большинства материалов при нормальном падении. В основном речь идёт о МР и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах спектра (условно $5 \text{ \AA} < \lambda < 500 \text{ \AA}$). Например, даже золото при нормальном падении отражает 9 % излучения при $\lambda = 400 \text{ \AA}$, и с уменьшением длины волны коэффициент отражения быстро падает до значений не более 0.01–0.1 % при $\lambda < 120 \text{ \AA}$. Глубина проникновения при этом составляет меньше 0.1 мкм.

С другой стороны, короткие длины волн МР излучения дают возможность достигать принципиально более высокого пространственного разрешения, чем в видимом свете. Поэтому всё большее применение сейчас находит МР и рентгеновская микроскопия. В отличие от электронных микроскопов, которые требуют предварительной обработки образцов, рентгеновский микроскоп может позволить изучать образцы в их естественном состоянии, в том числе и живые биологические объекты. В наши дни изображающая оптика МР диапазона также широко используется в рентгеновской микро- и нанолитографии.

МР-ЭУФ излучение представляет большой интерес для спектроскопии, потому как оно во многих случаях может предоставить уникальную информацию об уровнях энергии многозарядных ионов, а также о К- и L-краях поглощения многих элементов (вместе со структурой примыкающих спектров). В МР диапазоне лежат энергии квантов, испускаемых плазмой с температурой $\sim 100 \text{ эВ}$ и выше, то есть плазмой Солнца, горячих звёзд, а также плазмой токамаков и лазерной плазмой. Это определяет интерес исследователей к МР и ЭУФ излучению при изучении лабораторной и астрофизической плазмы.

Качественный шаг был сделан в МР оптике и спектроскопии, когда в 70-х годах прошлого века были созданы первые многослойные зеркала (МЗ) нормального падения в ВУФ и МР диапазоне [1–3]. МЗ нормального падения позволили создать приборы для регистрации стигматических спектров и построения спектральных изображений без ограничения светосилы, что является важным, а порой и определяющим звеном в развитии многих областей науки, таких, как диагностика плазмы, рентгеновская астрономия, атомная физика, физика твёрдого тела и спектроскопия [4–6].

Сейчас область $\lambda > 125 \text{ \AA}$ освоена довольно хорошо. В ней существует множество различных многослойных покрытий под разные диапазоны, а структуры Mo/Si давно стали технологией. Коэффициент отражения Mo/Si МЗ $R = 70 \%$ на длине волны $\lambda = 135 \text{ \AA}$ позволил проводить работы по проекционной ЭУФ-литографии с пространственным разрешением, не уступающим разрешению более совершенных ВУФ-литографов с рабочей длиной волны $\lambda = 1930 \text{ \AA}$ [7]. Но рабочий диапазон длин волн Mo/Si МЗ ограничен снизу L-краем поглощения кремния ($\lambda = 125 \text{ \AA}$). А для нужд техники и технологии актуально создание отражающих покрытий для МЗ нормального падения в области $\lambda < 125 \text{ \AA}$, в том числе МЗ с широкой спектральной полосой отражения для спектроскопических исследований.

В диапазоне, ограниченном сверху L-краем поглощения кремния ($\lambda = 125 \text{ \AA}$), а снизу K-краем поглощения бора ($\lambda = 65.9 \text{ \AA}$), ранее наиболее перспективными показали себя структуры Mo/Be, Mo/Y и La/B₄C. Но МЗ на основе бериллия неэффективны на длинах волн короче K-края поглощения Be ($\lambda = 111 \text{ \AA}$), а в более коротковолновом диапазоне в настоящее время существуют лишь отдельные пары материалов, используемые в качестве покрытий МЗ, работающих на избранных длинах волн [8, 9].

Интерес к спектроскопическому изучению перезарядки обусловлен квазирезонансным характером этого процесса и относительно большими сечениями ($\sigma \sim 10^{-16} - 10^{-14} \text{ см}^2$). Ионы, получаемые при перезарядке, как

правило, оказываются в возбуждённых состояниях, что может позволить осуществлять селективное заселение уровней многозарядных ионов и получать инверсию на их переходах в МР диапазоне [10–12].

В последнее время всё больше внимания уделяется процессам многоэлектронной перезарядки. В частности, данные астрофизических и пучковых экспериментов [13, 14] свидетельствуют о том, что сечения двухэлектронной перезарядки могут достигать значений $10^{-15} - 10^{-14} \text{ см}^2$, что соответствует одноэлектронному случаю, а сечения трёхэлектронной могут составлять $\sim 20-30\%$ от этого значения. Однако хоть сечения перезарядки неоднократно измерялись в пучковых экспериментах, всё же распределение продуктов реакции по уровням во многих случаях остаётся неизвестным. Поэтому актуально прямое спектроскопическое изучение перезарядки.

Цели работы

Настоящая диссертация посвящена разработке новых многослойных покрытий для элементов отражательной рентгеновской оптики, изучению их оптико-спектральных свойств и применению в спектроскопических задачах. Основными целями данной работы являлись:

- 1) Экспериментальное измерение спектров отражения ряда многослойных зеркал, анализ зарегистрированных спектров и изучение их особенностей.
- 2) Разработка нового класса покрытий для многослойной рентгеновской оптики в области $80-120 \text{ \AA}$, включая расчёты структур и экспериментальное измерение спектров отражения синтезированных зеркал.
- 3) Применение широкополосного аperiodического многослойного зеркала для изучения взаимодействия ионов фтора и лития с атомами неона, включая идентификацию спектральных линий и анализ зарегистрированных спектров.
- 4) Расчёт новых перспективных многослойных покрытий для элементов отражательной рентгеновской оптики в диапазоне $66-130 \text{ \AA}$.

Научная новизна

Впервые предложены периодические и аperiodические многослойные структуры на основе пары Sb/B₄C для работы в диапазоне 80–120 Å. По рассчитанным структурам синтезированы зеркала, показавшие высокую стабильность и перспективность для использования в спектроскопии. При анализе экспериментально зарегистрированных спектров отражения зеркал получены указания на пониженную плотность слоёв сурьмы $\rho(\text{Sb}) = 6.0 \text{ г/см}^3$ и ограничение на толщину переходных слоёв сверху 10 Å.

Впервые широкополосное многослойное зеркало было использовано для спектроскопического изучения взаимодействия многозарядных ионов лития и фтора с атомами неона. При анализе зарегистрированных спектров сделан вывод о наблюдении одно- и многоэлектронной перезарядки ионов фтора на атомах Ne. Впервые эксперименты, проведённые с различными значениями плотности струи Ne, позволили сравнить вклад одномоментной многоэлектронной и последовательной одноэлектронной перезарядки в полное сечение многоэлектронной перезарядки в процессе F VIII + Ne I.

Впервые при расчётах уровней многозарядных ионов фтора с более чем одним возбуждённым электроном обнаружено большое число резонансов с уровнями энергии атомов неона, что качественно объясняет сравнительно большие значения сечений многоэлектронной перезарядки.

Научная и практическая ценность

Разработанные многослойные зеркала на основе Sb/B₄C стали важной альтернативой существующим многослойным покрытиям в области 80–120 Å вследствие своей высокой стабильности. Синтезированные зеркала на основе Sb/B₄C планируется использовать в спектроскопических экспериментах в ФИАН и в JAEA (Japan Atomic Energy Agency, Япония).

Рассчитанные широкополосные зеркала на основе структуры $\text{La/B}_4\text{C}$ в ближайшем будущем могут заполнить нишу технологичных зеркал для спектроскопии в области 66–110 Å. Синтез опытных образцов таких зеркал планируется в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН, г. Нижний Новгород), а их использование будет перспективным в спектроскопических экспериментах, проводимых в Российской Федерации (ФИАН, ИСАН) и за рубежом (JAEA, LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory, США) и др.).

Ряд многослойных зеркал, спектры которых были измерены, был запущен на орбиту в составе спектрогелиографов и телескопов на борту космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН для проведения измерений в рамках эксперимента ТЕСИС в 2009 г. Широкополосное Mo/Si зеркало для области 125–350 Å было использовано для изучения перезарядки и будет использовано в дальнейших спектроскопических экспериментах в ФИАН.

Результаты, полученные при спектроскопическом изучении и анализе спектров перезарядки многозарядных ионов фтора на атомах неона, могут быть использованы при построении программ для теоретического расчёта сечений многоэлектронной перезарядки. Полученные спектроскопические данные также необходимы для понимания общих тенденций перезарядки многозарядных ионов на нейтральных атомах благородных газов и для построения соответствующих теоретических моделей.

Личный вклад автора

Автор участвовал лично во всех описываемых экспериментах, которые проводились в ФИАН. Участие включало планирование экспериментов, юстировку оптических схем и регистрацию экспериментальных спектров с их последующими интерпретацией и анализом. Все теоретические расчёты многослойных структур и их спектров отражения, а также уровней энергии возбуждённых состояний многозарядных ионов, встречаемые в диссертации, выполнены автором лично.

Положения, выносимые на защиту:

1) Предложены и рассчитаны многослойные зеркала на основе новой пары материалов Sb/V₄C для диапазона 80 – 120 Å. Расчёт показал, что периодические зеркала будут наиболее эффективными при максимуме отражения $\lambda_0 = 85 \text{ Å}$ ($R \sim 35 \%$), а аperiodические зеркала Sb/V₄C могут иметь интегральный коэффициент отражения $\sim 1 \text{ Å}$ при равномерном отражении в диапазоне 80 – 120 Å. Экспериментальные измерения показали, что ширина контура отражения периодических многослойных зеркал Sb/V₄C 0.8 Å, а коэффициент отражения $R = 18 \%$. Отличие экспериментального и расчётного коэффициентов отражения объясняется пониженной плотностью слоёв сурьмы до $\rho(\text{Sb}) = 6.0 \text{ г/см}^3$ и наличием межслоевых шероховатостей.

2) При помощи дифракционного спектрографа на основе широкополосного зеркала с рабочим диапазоном 125 – 350 Å зарегистрировано и идентифицировано более 150 спектральных линий в области взаимодействия ионов лития и фтора с газовой струёй неона. Наблюдение излучательных переходов с дважды и трижды возбуждённых состояний ионов фтора в холодной разреженной плазме указывает на заселение этих состояний при перезарядке. Предложены два механизма заселения состояний при многоэлектронной перезарядке: одномоментная многоэлектронная и каскадная одноэлектронная перезарядка. Показано, что заселение состояний с частично или полностью незаполненной 2s-оболочкой в ионах F III–F VI при изменении плотности струи Ne в широком диапазоне указывает на преобладающий вклад одномоментной многоэлектронной перезарядки в общее сечение.

3) Расчёт уровней энергии k -кратно ($k = 1-4$) возбуждённых многозарядных ионов фтора показал наличие большого числа резонансов между уровнями энергии атомов неона и энергиями захвата электронов в возбуждённые состояния ионами фтора. Наличие этих резонансов качественно объясняет

относительно большие значения сечений многоэлектронной перезарядки ($\sigma \sim 10^{-16} - 10^{-15} \text{ см}^2$).

4) Расчёт новых аperiodических многослойных зеркал нормального падения и широкополосных поляризаторов на основе различных структур показал, что в области 80 – 130 Å наиболее перспективны структуры Ag/Y, а самыми перспективными структурами для работы в диапазоне 66 – 110 Å являются аperiodические структуры La/B₄C, максимальное равномерное отражение которых при нормальном падении составляет $R \sim 4.2 \%$ во всём диапазоне оптимизации. Расчёт широкополосных поляризаторов на основе La/B₄C показал, что в диапазоне 66 – 110 Å максимальное равномерное отражение s-поляризованного излучения $R \sim 7.5 \%$ при поляризующей способности 99%.

Апробация работы

Результаты данной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ФИАН, а также на следующих российских и международных конференциях: рабочие совещания «Рентгеновская оптика» (Черноголовка, 2008 г., 2010 г. и 2012 г.), Международные симпозиумы «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2009 г., 2011 г. и 2012 г.), “European Symposium on Optics and Optoelectronics” (ЕОО, Prague, Czech Republic, 2009), XIII Школа молодых учёных «Актуальные проблемы физики» и IV Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований» (Звенигород–Москва, 2010), Международная конференция молодых учёных и аспирантов «ИЭФ-2011» (Ужгород, Украина, 2011 г.), научные конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Москва–Долгопрудный–Жуковский, 2008 г., 2010 г. и 2011 г.).

Публикации по теме диссертации

Результаты настоящей работы изложены в 7 публикациях в ведущих рецензируемых научных журналах, из которых 6 соответствуют списку ВАК, и были доложены в 15 докладах на вышеупомянутых конференциях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём диссертации

Настоящая диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 132 страницы, 44 рисунка и 9 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 136 наименований.

Введение диссертации содержит краткий исторический обзор развития источников и элементов отражающей оптики МР диапазона. Обсуждаются особенности периодических и аperiodических многослойных зеркал и их применения, обосновывая актуальность темы исследований. Формулируются цели работы, её научная новизна и ценность, отмечается вклад автора.

Глава 1 посвящена описанию вакуумной камеры ИКАР и оптико-спектрального комплекса для проведения исследований в МР диапазоне. Описывается лазерно-плазменный источник МР излучения, возникающего при фокусировке импульсов твердотельного лазера (Nd:YAlO₃, 0.5 Дж, 6 нс, 1.08 мкм) на твердотельную или газовую мишень. Дается характеристика используемым рентгенооптическим элементам, которые представлены в комплексе многослойными зеркалами и дифракционными решётками на пропускание, и детекторам МР излучения (ПЗС-матрицам с напылёнными абсорбционными фильтрами и рентгеновской фотоплёнке УФ-4). Кроме элементов оптико-спектрального комплекса, описывается схема включения импульсного газового клапана, позволяющая регулировать давление газа в камере стагнации в диапазоне 10 Торр – 10 атм. Схема регулировки давления стагнации в относительно широком диапазоне реализована автором лично.

Описывается численный метод, используемый для расчёта структур и спектров отражения МЗ, в том числе и аperiodических зеркал (АМЗ) с различной оптимизацией. Структуру АМЗ можно получить путём численной минимизации функционала $F = \int [R(\lambda) - F_{gf}]^{2m} d\lambda$ ($m = 1, 2, \dots$) [15], где спектральный коэффициент отражения АМЗ $R(\lambda)$ рассчитывается по текущему

набору слоёв оптимизируемой структуры, а F_{gf} представляет собой целевую функцию, предопределяющую результат оптимизации. Численная программа, реализующая описанный метод, была модифицирована для возможности учёта образования переходных слоёв в МЗ, в том числе и с заранее неизвестной стехиометрией. Методика учёта влияния переходных слоёв на спектры отражения МЗ проиллюстрирована на примере периодических зеркал на основе Mo/Si (Рис. 1).

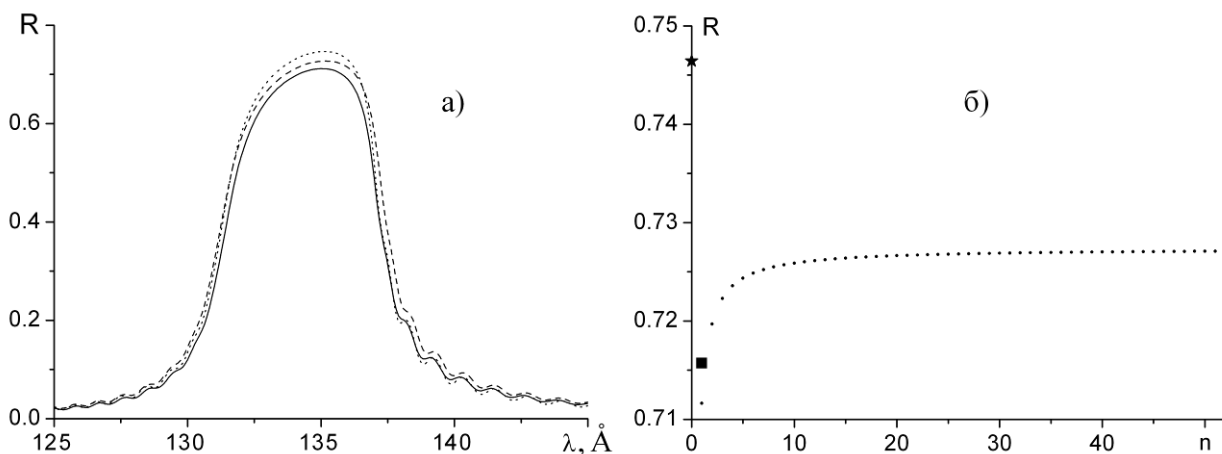


Рис. 1. (а) Расчёт спектра отражения периодического Mo/Si МЗ (150 слоёв) с $\lambda_0 = 135 \text{ \AA}$ без учёта переходных слоев (точки), при учёте переходного слоя с $\varepsilon = (\varepsilon_{Mo} + \varepsilon_{Si})/2$ (сплошная линия), и при учёте плавного перехода ε от ε_{Mo} к ε_{Si} ($n \rightarrow \infty$, пунктир). (б) Коэффициент отражения в максимуме без учёта переходных слоёв (\star), учёт 6 \AA и 12 \AA в форме силицида MoSi_2 (\blacksquare), и учёт плавного перехода ε за n ступеней.

Глава 2 содержит описание измерений спектров отражения ряда МЗ, представленных в Табл. 1. Было испытано семь периодических МЗ (два из которых были двухсекционными), в том числе с покрытиями на основе многослойных структур нового типа (Mg/Si, Al/Zr), и одно широкополосное АМЗ на основе пары Mo/Si. Все МЗ были напылены на вогнутые подложки (сферические или параболические), что позволяло измерять их спектры отражения, используя исследуемые МЗ в качестве фокусирующих элементов дифракционного МР спектрографа с пропускающей решёткой.

Табл. 1. Основные геометрические и структурные характеристики исследуемых МЗ.

№	λ_{\max} (Å)	Материал	Форма	Радиус кривизны (мм)	Число слоёв	Период d (Å)
1	132/172	Mo/Si, Al/Zr	парабол.	3250	100, 100	68, 87
2	192	Mo/Si	сферич.	1612	80	98
3	132	Mo/Si	парабол.	3250	100	68
4	304	Mo/Si	парабол.	1200	24	164
5	304	Mo/Si	парабол.	1000	30	166
6	304	Mg/Si	парабол.	3250	80	157
7	172/304	Al/Zr, Mg/Si	парабол.	3250	100, 80	87, 157
8	AMЗ	Mo/Si	сферич.	1000	80	–

Спектрограф для измерения спектров отражения МЗ собирался в вакуумной камере ИКАР и включал в себя входную щель, исследуемое МЗ, широкоапертурную дифракционную решётку на пропускание и детектор (Рис. 2). В качестве источника МР излучения использовалась лазерная плазма, образованная при фокусировке лазера на вольфрамовую мишень.

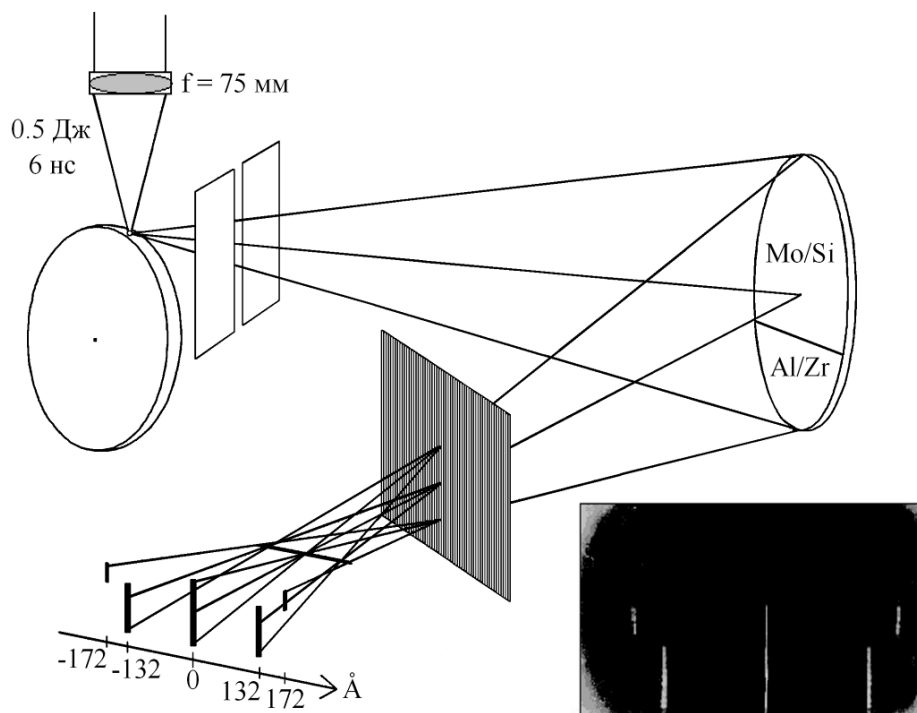


Рис. 2. Схема дифракционного МР спектрографа с исследуемым вогнутым МЗ в качестве фокусирующего элемента, и спектр отражения двухсекционного МЗ (Mo/Si и Al/Zr).

Малые размеры лазерно-плазменного источника (~ 0.05 мм) дают возможность исследовать однородность многослойного покрытия МЗ по их апертуре, поскольку каждый участок (1–3 мм) входной щели формирует свою горизонтальную полосу спектрального изображения на определенной высоте на детекторе. На Рис. 3 приведены спектры отражения МЗ, в которых были обнаружены небольшие неоднородности покрытия по апертуре.

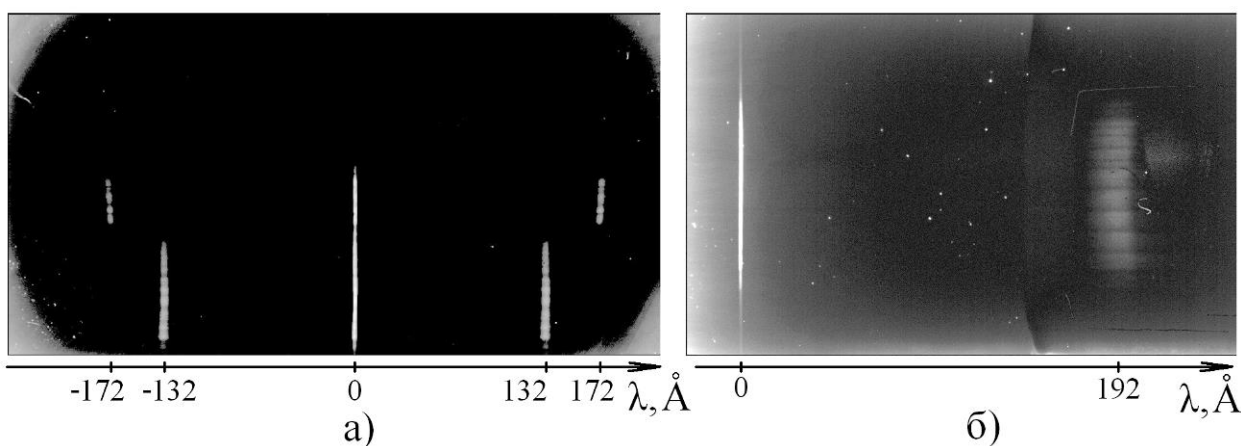


Рис. 3. Спектры отражения МЗ с неоднородностями многослойного покрытия по апертуре. а) Двухсекционное с покрытиями Mo/Si (132 Å) и Al/Zr (172 Å); б) Mo/Si, $\lambda = 192$ Å.

Структуры Mg/Si представляют отдельный интерес, потому как ранее их не синтезировали из-за сильной взаимной диффузии слоёв МЗ друг в друга. Исследованные МЗ синтезированы группой Н. Н. Салащенко в ИФМ РАН с использованием дополнительных барьерных слоёв Cr и V_4C , которые выполняют разделительную функцию и предохраняют слои Mg и Si от взаимной диффузии [16]. На Рис. 4 приведены расчётные спектры отражения Mo/Si и Mg/Si МЗ в сравнительно широком спектральном диапазоне. На Рис. 4а сравниваются спектры периодических МЗ, а на Рис. 4б спектры отражения перспективных АМЗ, рассчитанных на максимальное равномерное отражение в диапазоне 251 – 310 Å. Из Рис. 4а видно, что структуры Mo/Si обладают интенсивным интерференционным максимумом второго порядка вблизи $\lambda \sim 160$ Å в спектре отражения, а в случае структур Mg/Si он мал. Использование широкополосного лазерно-плазменного источника излучения позволяет выявить указанные особенности спектров отражения и оценить их вклад в интегральный по спектру отражённый сигнал.

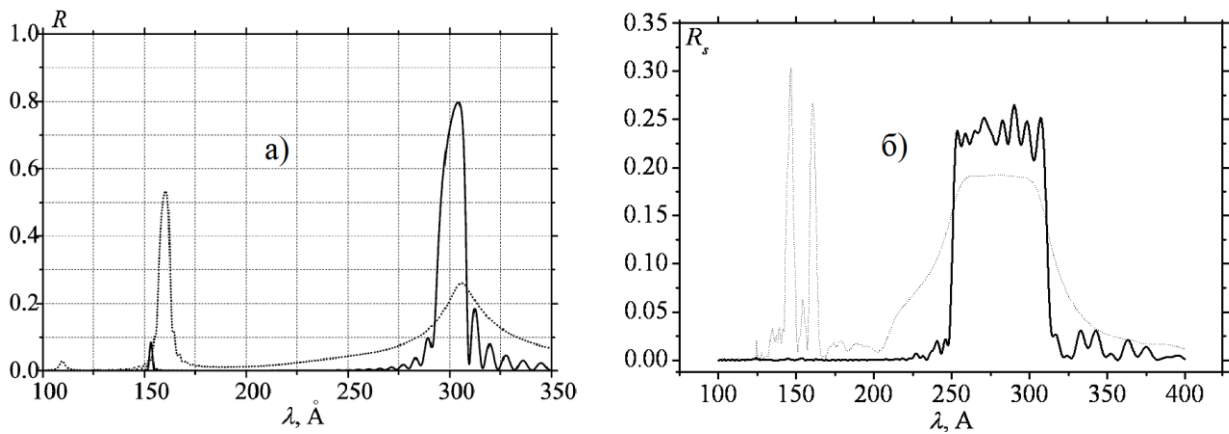


Рис. 4. Расчётные коэффициенты отражения МЗ: (а) с максимумами вблизи $\lambda_0 = 304 \text{ \AA}$, (б) АМЗ для области 251 – 310 \AA . Пунктирная линия – Mo/Si, сплошная линия – Mg/Si.

Измерения спектрального коэффициента отражения лабораторного Mo/Si АМЗ, оптимизированного на максимальное равномерное отражение в области 125–250 \AA , позволили оценить вариации коэффициента отражения АМЗ в области оптимизации значением $\pm 15\%$. Анализ зарегистрированных и расчётных спектров отражения показал, что данное АМЗ целесообразно использовать для построения дифракционного МР спектрографа с рабочим диапазоном 125 – 350 \AA . Регистрация спектра отражения АМЗ на ПЗС с различными напылёнными фильтрами (Al и Zr/Si) позволила обнаружить проявление тонкой структуры $L_{2,3}$ -края поглощения Al и Al_2O_3 в спектре, зарегистрированном на ПЗС с Al фильтром, по величине зарегистрированных особенностей при этом были оценены толщины слоёв Al и Al_2O_3 в Al фильтре: 0.1 и 0.01 мкм. Спектры отражения АМЗ, зарегистрированные на ПЗС с различными фильтрами, изображены на Рис. 5.

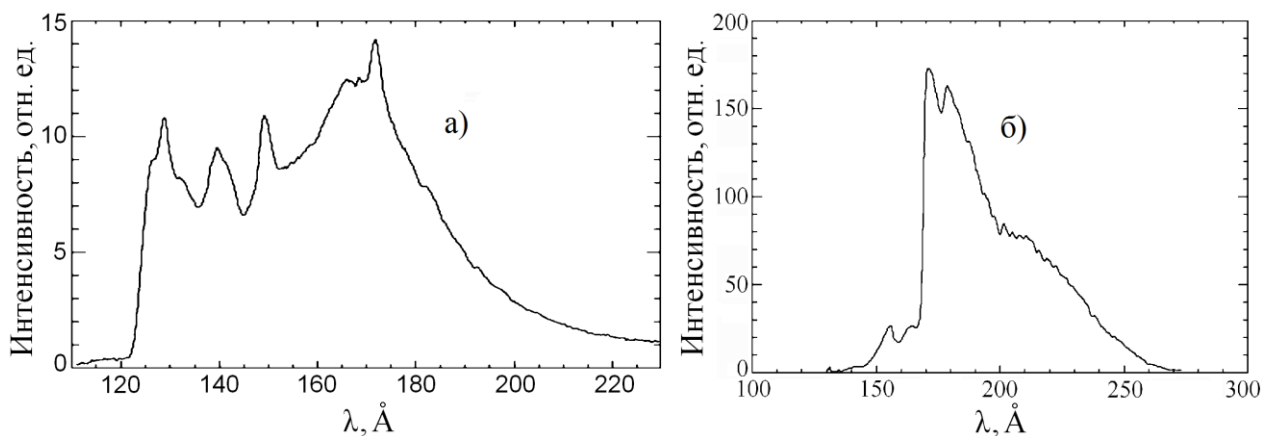


Рис. 5. Спектр отражения АМЗ, снятый на ПЗС с (а) Zr/Si фильтром, (б) Al фильтром.

Глава 3 посвящена разработке новых типов многослойных покрытий для работы в области 66–130 Å. Для синтеза была выбрана пара Sb/V₄C, расчётные коэффициенты отражения периодических структур на основе которой в области 80–120 Å достигают 30–40 %. Расчёт показал, что наибольший коэффициент отражения будет у периодических МЗ на основе Sb/V₄C при $\lambda_0 \approx 85$ Å. По выполненным расчётам ряд таких МЗ был синтезирован в НТУ «Харьковский политехнический институт». Два МЗ были направлены в ФИАН для измерения спектрального коэффициента отражения при помощи лазерно-плазменного источника МР излучения, а ещё два МЗ были отправлены в Центр рентгеновской оптики в Беркли (Center for X-ray Optics, LBNL, Berkley, USA) для абсолютных измерений коэффициента отражения МЗ на синхротроне ALS (Beam line 6.3.2).

На Рис. 6 представлен зарегистрированный при помощи лазерно-плазменного источника излучения спектр отражения синтезированных МЗ Sb/V₄C, малая спектральная ширина которого (0.8 Å) говорит о высокой степени однородности многослойного покрытия по апертуре МЗ и вглубь структуры. Все МЗ с первым слоем V₄C на подложке продемонстрировали высокую стабильность, а МЗ с первым слоем Sb отслоились по апертуре через несколько месяцев после изготовления.

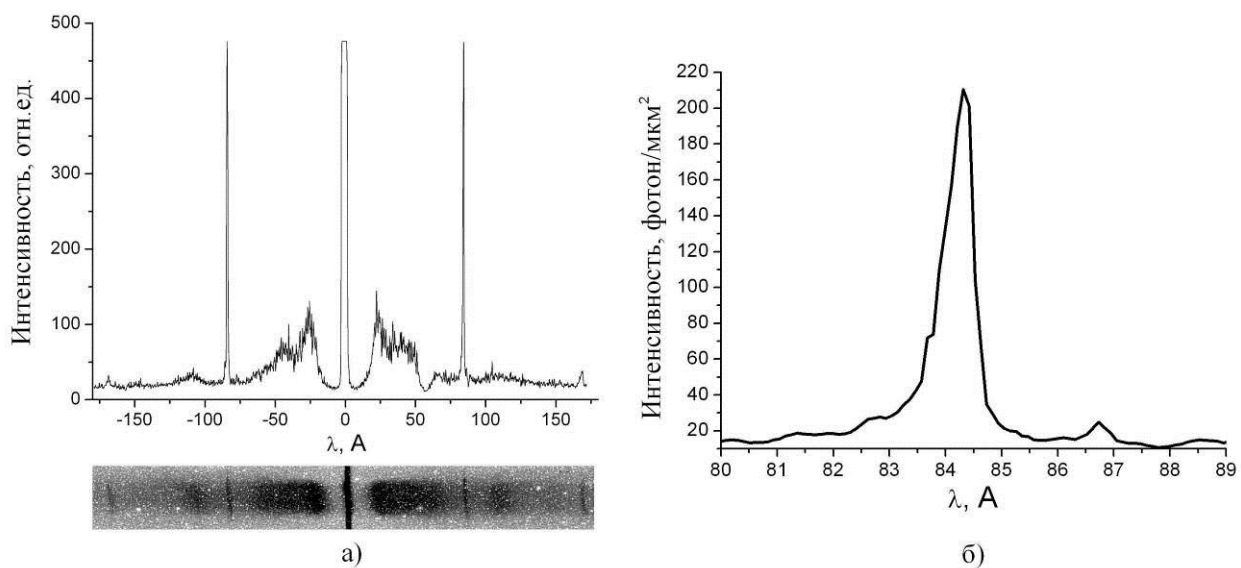


Рис. 6. Спектр отражения периодических МЗ на основе Sb/V₄C, зарегистрированный при помощи лазерно-плазменного источника. (а) Обзорный спектр, (б) первый порядок.

Измеренный в Беркли коэффициент отражения МЗ составил 18.0 % для $N = 300$ слоёв структуры и 19.6 % для $N = 600$. Это вдвое меньше значения 35 %, полученного в теоретическом расчёте, поэтому проводится обсуждение факторов, влияющих на снижение реального коэффициента отражения МЗ. Среди обсуждаемых факторов основной вклад вносят два: наличие в МЗ межслоевых шероховатостей на уровне $\sigma = 4.0 \text{ \AA}$, и снижение плотности слоёв сурьмы при магнетронном распылении до значения $\rho(\text{Sb}) = 6.0 \text{ г/см}^3$. На пониженную плотность сурьмы указывает расчёт, результат которого приведён на Рис. 7: при табличной плотности $\rho(\text{Sb}) = 6.7 \text{ г/см}^3$ насыщение коэффициента отражения периодических зеркал в максимуме происходит быстрее, чем при $\rho(\text{Sb}) = 6.0 \text{ г/см}^3$. И расчёт с $\rho(\text{Sb}) = 6.7 \text{ г/см}^3$ не может объяснить увеличение коэффициента отражения МЗ с 18.0 % до 19.6 % при увеличении числа слоёв структуры от $N = 300$ до 600 (Рис. 7б). Ещё одним фактором, влияющим на снижение коэффициента отражения периодических МЗ в максимуме, может быть наличие переходных слоёв. Расчёт показывает, что с увеличением толщины переходного слоя коэффициент отражения МЗ уменьшается нелинейно, но после учёта первых двух факторов появляется ограничение на максимальную толщину переходного слоя в структурах $\text{Sb/B}_4\text{C}$: её величина не превосходит 10 \AA .

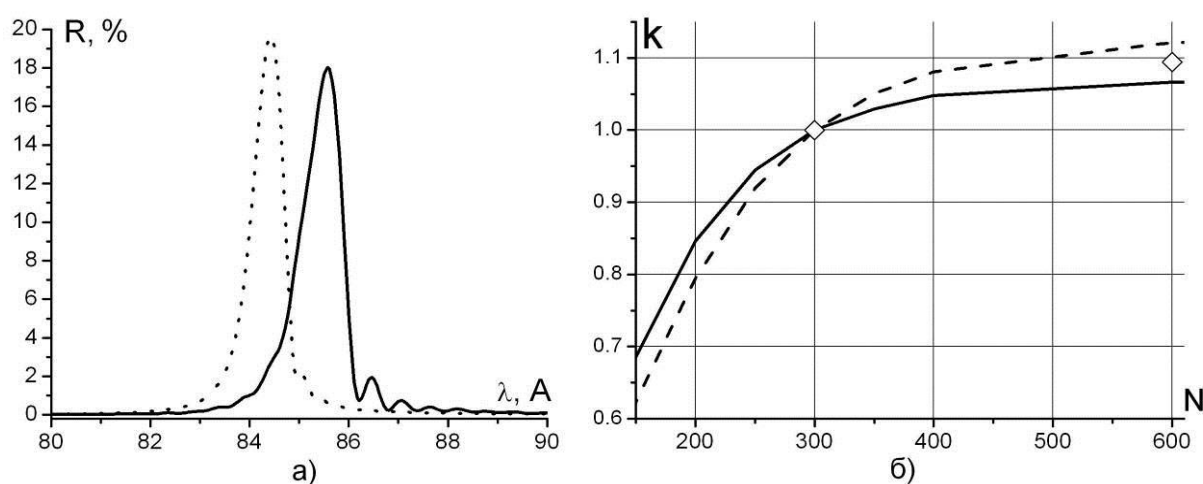


Рис.7. (а) Эксперимент. спектры отражения МЗ с $N = 300$ (сплошная линия) и МЗ с $N = 600$ (точки); (б) зависимость нормированного коэффициента отражения периодических МЗ $\text{Sb/B}_4\text{C}$ от числа слоёв: для $\rho(\text{Sb}) = 6.7 \text{ г/см}^3$ (сплошная) и для $\rho(\text{Sb}) = 6.0 \text{ г/см}^3$ (пунктир), ромбы – экспериментальные данные. R нормирован на единицу при $N = 300$ слоёв.

Были рассчитаны три АМЗ на основе Sb/B_4C , оптимизированные на максимальное равномерное отражение в диапазонах 100–120 Å, 90–100 Å и 95–105 Å, соответственно. Все три АМЗ в настоящее время синтезированы в НТУ «ХПИ», а спектр отражения первого из них измерен с использованием лазерно-плазменного источника излучения. Результат измерения говорит о хорошем соответствии реальной полосы отражения расчётной 100–120 Å, средний коэффициент отражения в области оптимизации при этом составил ~ 2.5 %, что примерно вдвое меньше расчётного значения (как и в случае периодических МЗ). Интегральный коэффициент отражения АМЗ ≈ 0.5 Å.

Проведённые расчёты структур на основе различных пар материалов в диапазоне 66–130 Å показали, что в диапазоне 80–130 Å пары Ag/Y и Pd/Y наиболее перспективны по своим оптическим константам (их расчётные средние коэффициенты отражения в области оптимизации превышают 7 %), а в диапазоне 66–110 Å наиболее перспективными являются структуры La/B_4C . На Рис. 8 представлены расчётные спектры трёх АМЗ нормального падения со средними коэффициентами отражения 4.2 %, 4.6 % и 7.2 %.

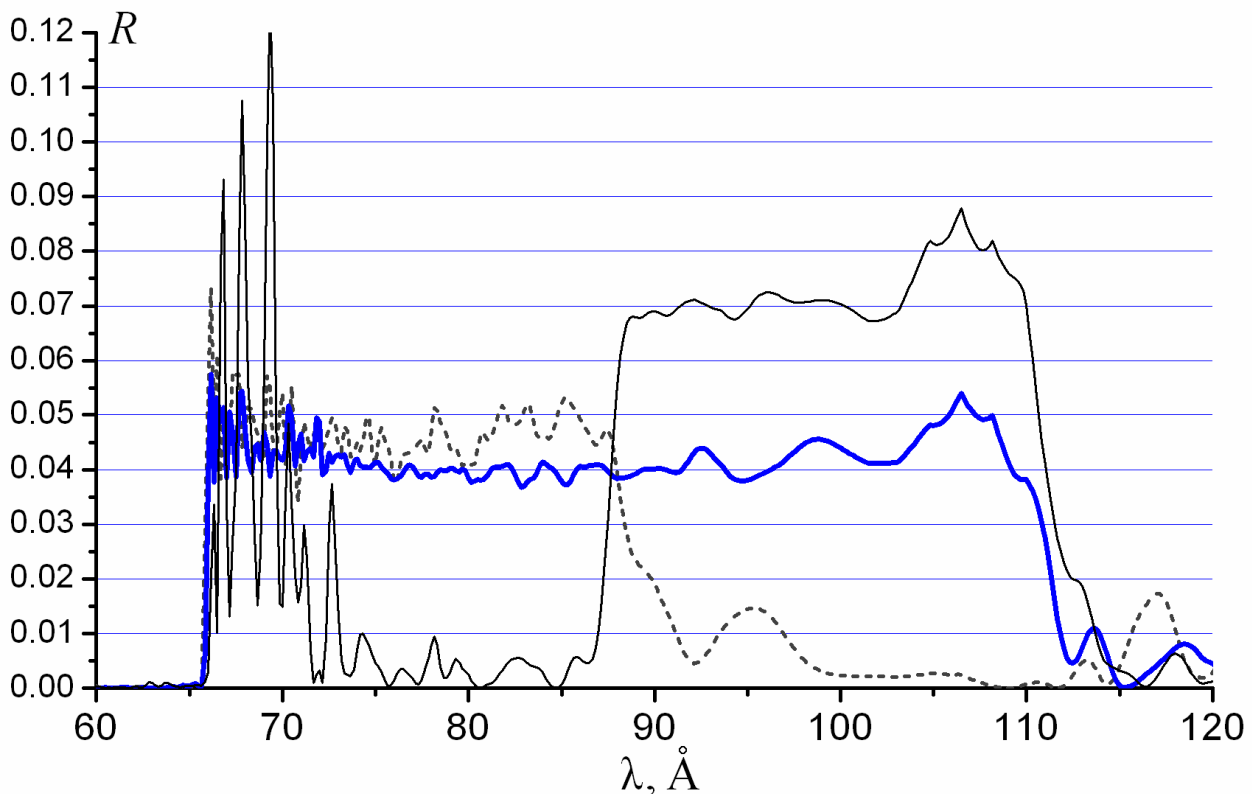


Рис. 8. Расчёт АМЗ на основе La/B_4C для диапазонов 66 – 88 Å, 66 – 110 Å и 88 – 110 Å.

На основе всех обсуждаемых структур ($\text{Sb}/\text{B}_4\text{C}$, Ag/Y , Pd/Y и $\text{La}/\text{B}_4\text{C}$) были рассчитаны многослойные зеркала-поляризаторы, работающие при углах падения $\alpha \approx 45^\circ$. Рассчитанные структуры имеют коэффициенты отражения для s-поляризованного излучения $\sim 10\%$ при поляризующей способности 98% и выше в диапазонах оптимизации. Наиболее высокий средний коэффициент отражения из рассчитанных структур у Ag/Y (17% в диапазоне 90–130 Å при $\alpha = 44^\circ$) при поляризующей способности 99.4%.

Глава 4 посвящена спектроскопическому изучению взаимодействия многозарядных ионов фтора и лития с атомами неона. По результатам анализа зарегистрированных спектров сделан вывод о перезарядке ионов лития и фтора на атомах неона в импульсной газовой струе. Многозарядные ионы лития и фтора образовывались в лазерной плазме, которая затем направлялась на импульсную струю неона, отстоящую от мишени LiF на расстояние ~ 1 см (Рис. 9). Регистрация спектров происходила с помощью широкополосного дифракционного МР спектрографа с АМЗ на основе пары Mo/Si в качестве фокусирующего элемента. Протяжённое по вертикали поле зрения спектрографа позволяло одновременно получать спектральную и пространственную картину взаимодействия по скрещенным осям, при этом одновременно регистрировался и спектр, излучаемый в области генерации плазмы, и линии из области взаимодействия «плазма–газ» (Рис. 10).

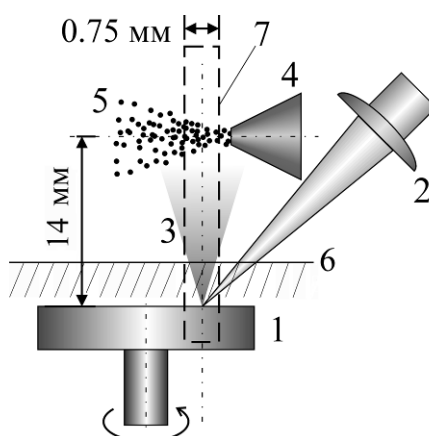


Рис. 9. Относительное расположение струи Ne (5) и конуса разлёта лазерной плазмы (3). 1 – мишень LiF , 2 – линза и фокусируемый ею лазерный импульс, 4 – импульсный газовый клапан, 6 – уровень электромагнитного прерывателя, 7 – поле зрения спектрографа.

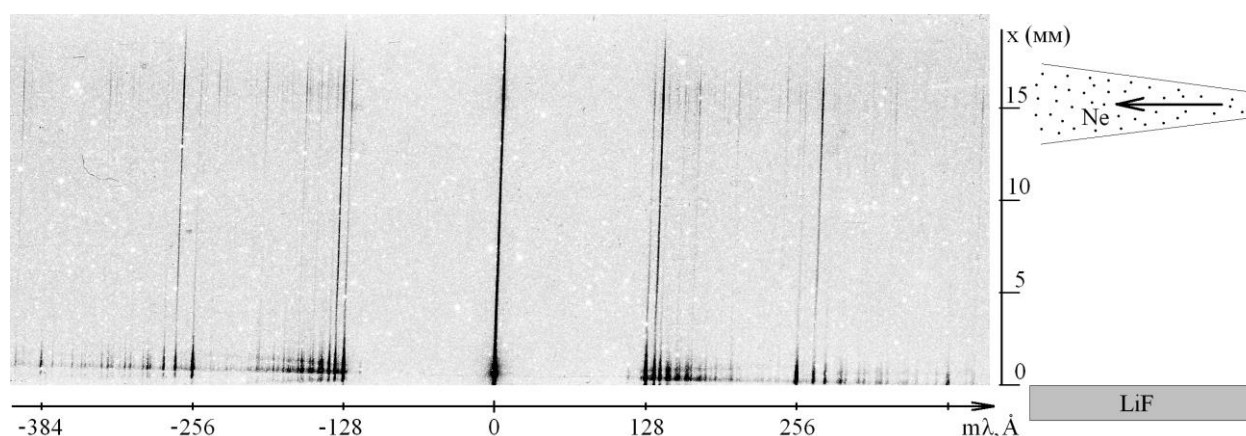


Рис. 10. Пример спектрограммы, содержащей одновременно и спектр излучения лазерной плазмы вблизи мишени LiF, и линии, излучаемые в области взаимодействия «плазма–газ».

В области взаимодействия было обнаружено и идентифицировано более 150 спектральных линий в диапазоне 125–350 Å. Зарегистрирован ряд спектральных линий, соответствующих кратности перезарядки $k > 1$. Это переходы из состояний ионов с частично или полностью незаполненной 2s-оболочкой и более чем одним возбужденным электроном (Табл. 2). Заселение таких состояний в холодной разреженной плазме без учёта перезарядки невозможно.

Табл. 2. Наиболее яркие линии в области взаимодействия с кратностью перезарядки $k > 1$.

λ (Å)	Ион	Регистрируемый радиационный переход	Кратность перезарядки	Вероятный акцептор
129.5	F VI	$2p^2 - 2p4s$	2	F VIII
132.5	F V	$2s2p^2(^4P) - 2s2p(^3P^0)4d(^4D^0)$	2	F VII
136.9	F V	$2s2p^2(^4P) - 2p^2(^3P)3p(^4D^0)$	3	F VIII
138.2	F V	$2s2p^2 - 2s2p(^3P^0)4s$	2	F VII
145.2	F V	$2s2p^2(^2D) - 2s2p(^3P^0)4d(^2D^0)$	2	F VII
147.9–148.1	F V	$2s2p^2(^gP^0) - 2s2p(^3P^0)3p(^2D)$	2	F VII
158.5	F V	$2s2p^2(^2D) - 2s2p(^1P^0)3d(^2F^0)$	2	F VII
161.2–161.5	F VI	$2p^2(^3P) - 2p(^2P^0)3s(^3P^0)$	2	F VIII
208.5	F IV	$2s2p^3(^3P^0) - 2s2p^2(^2D)3d(^3S)$	3	F VII

Было предложено два механизма заселения состояний с частично или полностью незаполненной 2s-оболочкой: последовательная одноэлектронная и одномоментная многоэлектронная перезарядка. Показано, что проведение

экспериментов с различными значениями плотности газовой струи могут позволить выделить преобладающий из предложенных механизмов. Опыты, проведённые с пониженной на порядок плотностью струи Ne, указывают на основной вклад одномоментной многоэлектронной перезарядки в общее сечение многоэлектронной перезарядки.

Расчёты уровней энергии k -кратно возбуждённых многозарядных ионов F показали наличие большого числа резонансов между потенциалами k -кратной ионизации Ne I и энергиями захвата k электронов в возбуждённые состояния некоторыми ионами фтора. Наличие этих резонансов качественно объясняет сравнительно большие сечения многоэлектронной перезарядки ($\sigma \sim 10^{-16} - 10^{-15} \text{ см}^2$). Их необходимо учитывать в теоретических моделях.

В **Заключении** диссертации излагаются основные результаты работы, после чего формулируются положения, выносимые на защиту.

Материалы настоящей диссертации неоднократно докладывались на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в работах:

1. **Е. А. Вишняков**, К. Н. Медников, А. А. Перцов, Е. Н. Рагозин, А. А. Рева, А. С. Ульянов, С. В. Шестов. «Измерение спектров отражения многослойных зеркал в мягкой рентгеновской области спектра при помощи широкополосного лазерно-плазменного источника излучения». *Квантовая электрон.*, **39** (5), 474–480 (2009).
2. E. N. Ragozin, K. N. Mednikov, A. A. Pertsov, A. S. Pirozhkov, A. A. Reva, S. V. Shestov, A. S. Ul'yanov, **E. A. Vishnyakov**. “Spectroscopic characterization of novel multilayer mirrors intended for astronomical and laboratory applications”. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7360**, 73600N-1–12 (2009).
3. И. Л. Бейгман, **Е. А. Вишняков**, М. С. Лугинин, Е. Н. Рагозин, И. Ю. Толстихина. «Перезарядка многозарядных ионов фтора и лития на атомах Ne». *Квантовая электрон.*, **40** (6), 545–550 (2010).
4. **Е. А. Вишняков**, М. С. Лугинин, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин, С. А. Старцев. «Апериодические многослойные зеркала нормального падения на основе сурьмы для области спектра 8 – 13 нм». *Квантовая электрон.*, **41** (1), 75–80 (2011).

5. И. Л. Бейгман, **Е. А. Вишняков**, М. С. Лугинин, Е. Н. Рагозин, И. Ю. Толстихина. «Спектроскопическое исследование перезарядки многозарядных ионов фтора на атомах неона (область длин волн 125 – 350 Å)». *Uzhhorod Univ. Sci. Herald. Ser. Phys.*, **30**, 203–214 (2011).
6. **Е. А. Вишняков**, Ф. Ф. Каменец, В. В. Кондратенко, М. С. Лугинин, А. В. Панченко, Ю. П. Першин, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин. «Аперриодические многослойные структуры в оптике мягкого рентгеновского излучения». *Квантовая электрон.*, **42** (2), 143–152 (2012).
7. **Е. А. Вишняков**, Д. Л. Воронов, Э. М. Гулликсон, В. В. Кондратенко, И. А. Копылец, М. С. Лугинин, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин, А. Н. Шатохин. «Многослойные зеркала нормального падения на основе Sb/B₄C для диапазона $80 < \lambda < 120 \text{ \AA}$ ». *Квантовая электрон.*, **43** (7), (2013).

Список цитируемой литературы

1. E. Spiller. “Low-Loss Reflection Coatings Using Absorbing Materials”. *Appl. Phys. Lett.*, **20** (9), 365–367 (1972).
2. E. Spiller. “Reflective Multilayer Coatings for the Far UV Region”. *Appl. Opt.*, **15** (10), 2333–2338 (1976).
3. А. В. Виноградов, Б. Я. Зельдович. «О многослойных зеркалах для рентгеновского и далёкого ультрафиолетового диапазона». *Оптика и спектроскопия*, **42** (4), 709–714 (1977).
4. J. H. Underwood, D. T. Attwood. “The Renaissance of X-ray Optics”. *Phys. Today*, **37** (4), 44–51 (1984);
Дж. Х. Андервуд, Д. Т. Аттвуд. «Возрождение рентгеновской оптики». *УФН*, **151** (1), 105–117 (1987).
5. А. В. Виноградов, И. В. Кожевников. «Оптика мягкого рентгеновского диапазона: состояние и проблемы». *Труды ФИАН*, **196**, 4–17 (1989).
6. А. В. Виноградов, И. В. Кожевников. «Многослойные рентгеновские зеркала». *Труды ФИАН*, **196**, 62–102 (1989).
7. P. Naulleau, K. A. Goldberg, E. H. Anderson, D. Attwood, P. Batson, J. Bokor, P. Denham, E. Gullikson, B. Harteneck, B. Hoef, K. Jackson, D. Olynick, S. Rekawa, F. Salmassi, K. Blaedel, H. Chapman, L. Hale, P. Mirkarimi, R. Soufli, E. Spiller, D. Sweeney, J. Taylor, C. Walton, D. O’Connell,

- D. Tichenor, C. W. Gwyn, P.-Y. Yan, G. Zhang. “Sub-70 nm Extreme Ultraviolet Lithography at the *Advanced Light Source* Static Microfield Exposure Station Using the Engineering Test Stand Set-2 Optic”. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20** (6), 2829–2833 (2002).
8. А. В. Виноградов. «Многослойная рентгеновская оптика». *Квантовая электрон.*, **32** (12), 1113–1121 (2002).
9. М. М. Барышева, А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало. «Прецизионная изображающая многослойная оптика для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазона». *УФН*, **182** (7), 727–747 (2012).
10. Л. П. Пресняков, В. П. Шевелько. «О возможности создания инверсной заселённости в атомных пучках при перезарядке протонов на атомах». *Письма в ЖЭТФ*, **13**, 286–288 (1971).
11. А. В. Виноградов, И. И. Собельман. «К проблеме лазерных источников излучения в далёкой ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра». *ЖЭТФ*, **63**, 2113–2120 (1972).
12. Л. П. Пресняков, А. Д. Уланцев. «Перезарядка многозарядных ионов на атомах». *Квантовая электрон.*, **1**, 2377–2385 (1974).
13. J. B. Greenwood, I. D. Williams, S. J. Smith, A. Chutjian. “Measurement of Charge Exchange and X-ray Emission Cross Sections for Solar Wind – Comet Interactions”. *Astrophys. J.*, **533**, L175–L178 (2000).
14. J. B. Greenwood, I. D. Williams, S. J. Smith, A. Chutjian. “Experimental Investigation of the Processes Determining X-ray Emission Intensities from Charge-Exchange Collisions”. *Phys. Rev. A*, **63**, 062707 (2001).
15. Н. Н. Колачевский, А. С. Пирожков, Е. Н. Рагозин. «Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аperiодических многослойных структур». *Квантовая электрон.*, **30** (5), 428–434 (2000).
16. С. Ю. Зуев, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко. «Элементы отражающей оптики на основе Mg и Al для задач рентгеновской астрофизики». *Нанопизика и наноэлектроника* (XII Международный Симпозиум 10–14 марта 2008 г., г. Н. Новгород), **1**, 227–228 (2008).