

К 90-ЛЕТИЮ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН (ФИАН)

ОБОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Рентгеновская и вакуумная
ультрафиолетовая спектроскопия в ФИАНе

Е.Н. Рагозин

Последняя треть XX века была отмечена быстрым развитием рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии многозарядных ионов. В Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) эти работы начались как исследования рентгеновского излучения Солнца и излучения многозарядных ионов в лазерной плазме. В дальнейшем к ним добавилось исследование быстрых электрических разрядов и работы по рентгеновской/ВУФ оптике. Постановка многих работ мотивировалась также необходимостью спектроскопической диагностики высокотемпературной плазмы и возможностью создания лазеров мягкого рентгеновского (МР) диапазона на переходах многозарядных ионов. Методы МР/ВУФ спектроскопии нашли применение при разработке новых рентгенооптических элементов и схем дифракционных спектрометров. В обзоре отмечены основные участники таких исследований и основные вехи развития спектроскопических исследований в вакуумной области спектра в ФИАНе начиная с середины 1960-х годов, кратко отражено развитие используемой экспериментальной техники. Обзор не претендует на полноту, а отбор цитируемых материалов отражает научные интересы автора.

Ключевые слова: вакуумная спектроскопия, рентгеновское излучение Солнца, лазерная плазма, многозарядные ионы, вакуумный спектрометр, X-пинч, рентгеновская оптика, многослойное зеркало, VLS-решётка, проекционная рентгеновская литография, призменный рентгеновский спектрограф

PACS numbers: 01.65.+g, 07.60.-j, 07.85.Nc

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.07.039501>

Содержание

1. Введение. ФИАН — полифизический институт (881).
 2. С.Л. Мандельштам — инициатор рентгеновской спектроскопии Солнца (881).
 3. Рентгеновская астрономия Солнца при И.И. Соболевмане (883).
 4. Работы группы В.А. Бойко (884).
 5. Рентгеновская и вакуумная ультрафиолетовая спектроскопия лазерной плазмы в подразделениях И.И. Соболевмана (885).
5.1. Спектроскопия 3–3 переходов Ne-подобных ионов.
 6. X-пинч (888).
 7. Оптика мягкого рентгеновского диапазона (890).
7.1. Широкополосные многослойные зеркала на основе аперийодических многослойных структур. 7.2. VLS-решётки.
 8. Призменная рентгеновская спектроскопия (894).
 9. Заключение (895).
- Список литературы (895).

Е.Н. Рагозин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: ragozinen@lebedev.ru

Статья поступила 3 мая 2023 г.,
после доработки 3 июля 2023 г.

1. Введение.

ФИАН — полифизический институт

Физический институт им. П.Н. Лебедева Академии Наук СССР (ФИАН) виделся С.И. Вавилову, первому его директору, как полифизический институт, в котором могли бы возникать и развиваться новые направления современной физики. В большой степени становлению новых научных направлений и диверсификации исследований за последние шесть десятилетий способствовало создание квантовых генераторов электромагнитного излучения, мазеров и лазеров, за что советские учёные Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, вместе с Ч. Таунсом (США), были удостоены Нобелевской премии по физике (1964 г.). Как показано в настоящем обзоре, мощные импульсные лазеры сыграли и продолжают играть важную роль в развитии рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии и физике многозарядных ионов, а также в прикладных направлениях: разработке рентгеновской/ВУФ оптики и создании оптико-спектральных приборов для вакуумного диапазона электромагнитного спектра.

2. С.Л. Мандельштам — инициатор
рентгеновской спектроскопии Солнца

Исследование коротковолнового излучения Солнца было начато по инициативе Сергея Леонидовича Ман-

дельштама¹, заведующего Лабораторией спектроскопии ФИАН. Сергей Леонидович внимательно следил за развитием исследований коротковолновой ультрафиолетовой радиации Солнца, отмечая их первостепенную важность "как для физики Солнца, так и для физики Земли" [1, 2]. В СССР изучение коротковолновых участков спектра, поглощаемых земной атмосферой, началось после того, как стало возможным выносить аппаратуру за пределы земной атмосферы с помощью ракетно-космической техники. В 1965 г. были начаты эксперименты по получению спектров с помощью дифракционных решёток и брэгговских кристаллов. Первая фотография рентгеновского спектра вплоть до 9,5 Å была получена в 1965 г. при запуске дифракционного спектрографа на высотной ракете [3, 4].

Дальнейшие исследования спектров были выполнены в 1969–1983 гг. с помощью фотоэлектрических спектрометров с брэгговскими кристаллами, устанавливаемых на 10 космических аппаратах (спутниках серии Интеркосмос, геофизических ракетах Вертикаль), запуск которых был осуществлён в рамках программы международного сотрудничества "Интеркосмос" [5, 6]. В этих экспериментах были зарегистрированы солнечные спектры до длины волны 1,7 Å с разрешающей способностью до 10⁴. Общее научное руководство измерениями солнечного излучения осуществлялось С.Л. Мандельштамом. Спектрометры на область длин волн 5–20 Å и брэгговские кварцевые спектрометры на интервал длин волн 1,7–1,95 Å были разработаны под руководством И.А. Житника. Помимо С.Л. Мандельштама и И.А. Житника, в состав группы входили И.Л. Бейгман, Л.А. Вайнштейн, Б.Н. Васильев, В.Д. Иванов, В.В. Крутов, И.П. Тиндо и А.И. Шурыгин. Использовались кристаллы берилла (для регистрации линий иона NeIX), кварца (MgXII), ADP (SiXIII, MgXI), Si (SiXIV), Ge (SiXIV) и NH₄AP (MgXI) [6].

Результаты этих экспериментов докладывались на Научных сессиях Отделения общей физики и астрономии (ОФАиА) и Отделения ядерной физики АН СССР 29–30 сентября 1971 г., ОФАиА 23 апреля 1975 г. и ОФАиА 31.01.–01.02.1979 г. [7–9]. В первом докладе [7] представлен участок спектра рентгеновской вспышки 16.11.1970 г. вблизи 1,8 Å с линиями He- и Li-подобных ионов железа и отмечалось, что спектры ионов FeXXIII–FeXXV на лабораторных установках надёжно ещё не получены. Поэтому линии идентифицировались путём сравнения с результатами теоретических расчётов длин волн, выполненных У.И. Сафроновой. В дальнейшем [8, 9] рентгеновские спектры Солнца сопоставлялись со спектрами малоиндуктивного вакуумного разряда и лазерной плазмы (рис. 1). Речь шла, в частности, о возбуждении спектров многозарядных ионов железа в вакуумной искре [10], криптона в области 65–110 Å [11] и ионов серы SIX, SX в области 175–265 Å [12] в тэта-пинче. Для регистрации спектров использовался отечественный спектрограф скользящего падения ДФС-6.

Следует отметить, что в НИИхимфото были разработаны отечественные фотоматериалы для регистрации ВУФ и рентгеновского излучения. В ФИАНе их исследованию, а также сравнению с зарубежными ана-

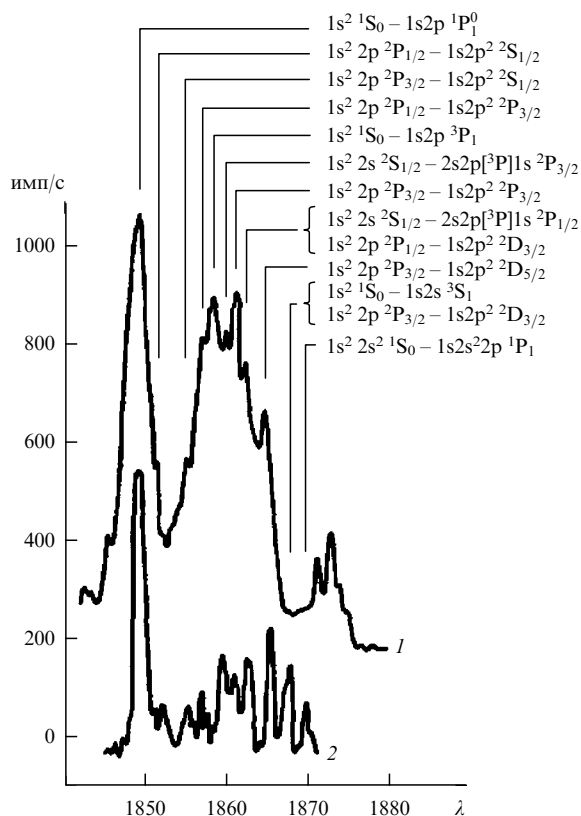


Рис. 1. Спектры железа в области резонансной линии FeXXV. 1 — денситограмма лабораторного спектра. 2 — рентгеновская вспышка на Солнце (16.11.1970 г., 01h₀₁mUT, "Интеркосмос-4") [8]. Длины волн указаны в единицах 10⁻³ Å.

логами, была посвящена серия работ В.Г. Мовшева, А.Н. Рябцева и Н.К. Суходрев [13–18]. Исследовалась зависимость характеристических кривых от угла падения излучения на эмульсионный слой, с помощью ионизационной камеры была проведена абсолютная калибровка чувствительности фотоплёнок УФ-2Т (производство НИИхимфото) и SC-5 (Кодак–Патэ) в диапазоне 460–1500 Å, а также фотоплёнок УФ-2Т, УФ-Р и SC-5 в диапазоне 1,5–23,6 Å. Было установлено, что отступления от закона взаимозаменяемости в эмульсии на основе AgBr перестают проявляться, когда энергия фотонов превышает 8–11 эВ.

Было также отмечено, что "одним из наиболее удачных источников возбуждения спектров для наших целей следует считать лазерную искру, образующуюся на мишени в вакууме" [8].

Использование лазерной плазмы как источника линейчатых и непрерывных спектров многозарядных ионов восходит к середине 1960-х гг. По-видимому, первыми работами в данном направлении стали работы Илера и Вейслера [19] и Бриана Фосетта и др. [20]. Первыми фиановскими работами стали совместные работы Лаборатории спектроскопии и Лаборатории квантовой радиофизики, руководимой Николаем Геннадиевичем Басовым [21, 22]. В этих работах использовался неодимовый лазер с энергией импульса 10 Дж длительностью по полувисоте 15 нс. Модуляция добротности осуществлялась ячейкой Керра. Для регистрации спектров применялся вакуумный спектрограф ДФС-6 с решёткой ра-

¹ Свой первый зачёт "по базе" в 1968 г. автор обзора сдавал С.Л. Мандельштаму, тогда заведующему Кафедрой оптики МФТИ, в ФИАНе.

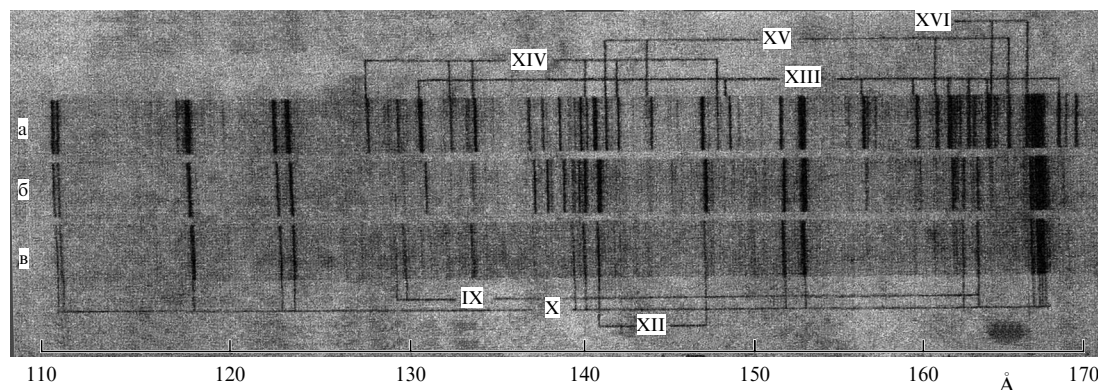


Рис. 2. Спектрограммы кальция при различных условиях фокусировки лазерного пучка. Диаметр фокального пятна: (а) 0,1 мм, (б) 2 мм, (в) 6 мм [22].

диусом 1 м, установленной под скользящим углом 8° . Были получены линейчатые спектры ионов $\text{AlVI} - \text{AlXI}$ и спектры ионов $\text{CaXII} - \text{CaXVI}$, относящиеся к переходам типа $2s^2 2p^n - 2s 2p^{n+1}$ ($n = 1 - 4$) в интервале 120–240 Å. Ряд линий кальция был идентифицирован впервые (рис. 2).

3. Рентгеновская астрономия Солнца при И.И. Сوبельмане

В 1968 г. был создан Институт спектроскопии (ИСАН) в составе ОФАиА АН СССР. Основателем Института и его директором в течение первых 20 лет стал С.Л. Мандельштам. Вместе с ним в ИСАН перешла и часть его учеников (Э.Я. Кононов, А.Н. Рябцев). С.Л. Мандельштам оставался также заведующим Лабораторией спектроскопии ФИАН до 1984 г. В ИСАНе спектроскопия многозарядных ионов получила широкое развитие в рамках Отдела атомной спектроскопии. Значительная часть современных данных о длинах волн и уровнях энергии многозарядных ионов была получена в работах сотрудников ИСАН.

В 1984 г. руководство Лабораторией спектроскопии перешло к Игорю Ильичу Сובельману. Под его руководством "Космическое направление" продолжило успешное развитие. В связи с этим следует упомянуть прежде всего о спектральных приборах на космических аппаратах серии КОРОНАС (комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности солнца), разработанных под руководством И.А. Житника и С.В. Кузина. Первый из них, "КОРОНАС-И", был запущен в 1994 г. и проработал на орбите до 2001 г. Тогда же, в 2001 г., был запущен следующий спутник, "КОРОНАС-Ф", который закончил работу в декабре 2005 г. В феврале 2009 г. начал успешно работать спутник КОРОНАС-Фотон с фиановской аппаратурой. Аппаратура СПИРИТ и ТЕСИС, установленная на спутниках КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-Фотон, представляла собой многоканальные телескопы-коронаграфы ВУФ-диапазона спектра для регистрации солнечной короны в диапазонах 175 Å (FeIX-XII) и 304 Å (HeII) с помощью многослойных рентгеновских зеркал (рис. 3, 4) [23], а также спектрогелиографы на те же диапазоны спектра. Идея такого спектрогелиографа была высказана ещё в конце 1980-х гг. в связи с возможностью построения

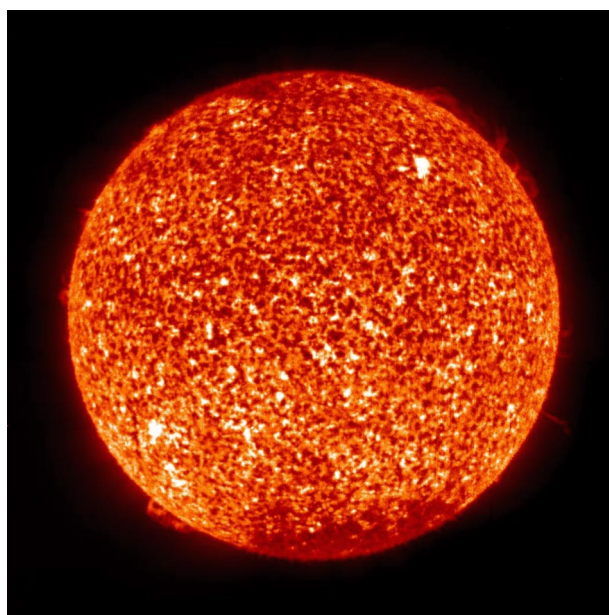


Рис. 3. Снимок спокойного Солнца, сделанный в резонансной линии иона HeII 304 Å (телескоп с многослойным зеркалом Mg/Si , синтезированным в ИФМ РАН) с борта спутника Земли 1 марта 2009 г. Угловое разрешение составляет 1,7" [23].

диспергированных спектральных изображений Солнца [24, 25]. Его оптическая схема (рис. 5а) включает в себя плоскую дифракционную решётку скользящего падения и фокусирующее многослойное зеркало нормального падения. Из-за того что скользящий угол дифракции во внутреннем порядке в несколько раз превышает скользящий угол падения, диспергированные изображения Солнца в отдельных спектральных линиях оказываются сильно сжатыми в направлении дисперсии. Пример такой спектрогелиограммы приведён на рис. 5б [26]. Разработчики летного варианта спектрогелиографа дали ему шутливое название "огурцграф"².

² Интересно, что спектрогелиограф S082A с решёткой нормального падения в схеме Водсворта, работавший на космической станции Skylab в 1973–1974 гг., получил шутливое прозвище overlapper. Причиной послужило то обстоятельство, что изображения солнечного диска в линиях, отличающихся менее чем на 26 Å, частично накладывались друг на друга.

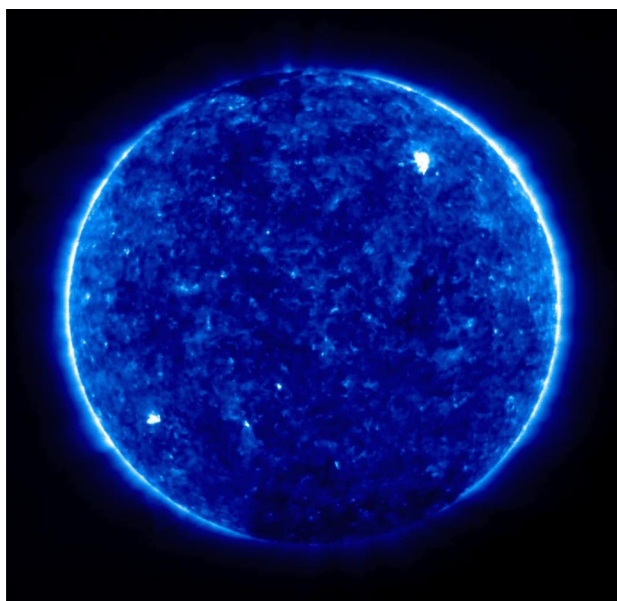


Рис. 4. Изображение Солнца (многослойное зеркало Al/Zr, ИФМ РАН) в линии Fe IX (171 Å), сделанное с борта спутника Земли 1 марта 2009 г. [23].

4. Работы группы В.А. Бойко

Лазерная плазма многократно применялась в ФИАНе в работах по рентгеновской и ВУФ спектроскопии, а в дальнейшем и в работах по рентгеновской оптике. В 1970-е годы в Лаборатории квантовой радиофизики изучались рентгеновские и ВУФ спектры многозарядных ионов, возбуждаемые мощными импульсами лазерного излучения. Сотрудник ИСАНА Е.В. Аглицкий в те годы был прикомандирован к ФИАНу и участвовал в ряде пионерских работ. Следует отметить работу Е.В. Аглицкого, В.А. Бойко, С.М. Захарова и Г.В. Склизкова по наблюдению штарковского уширения линий 520,6 Å (переход $4 \rightarrow 3$) и 3434 Å ($8 \rightarrow 7$) в ионе CVI, позволившему оценить ход N_e на расстояниях 0,1–0,25 мм от мишени по линии 520,6 Å и на расстояниях 0,8–1,4 мм по линии 3434 Å [27]. Для наблюдения этого эффекта лазерная плазма отображалась на щель спектрографа нормального падения ДФС-29 с помощью зеркала с иридиевым покрытием. В работе [28] при помощи кристаллического спектрографа была зарегистрирована спектрограмма, содержащая около 40 линий высокоионизованного железа в диапазоне 10–18 Å.

В начале 1970-х годов в группу В.А. Бойко (Лаборатория квантовой радиофизики) вошли С.А. Пикуз и А.Я. Фаенов. В работе [29] были получены спектры H- и He-подобных ионов Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti и V в диапазоне 2–18 Å и идентифицированы диэлектронные сателлиты резонансных линий H- и He-подобных ионов, отвечающие переходам типа $n p n' - 1 s n' 1'$ и $1 s 2 p n l - 1 s^2 n l$ (рис. 6). Всего было измерено 180 спектральных линий, причём точность измерения длин волн составила 0,002 Å в области $\lambda \sim 10$ Å и 0,0005 Å для $\lambda \sim 2,5$ Å. Энергия лазерного импульса составляла ~ 50 Дж при длительности на полувысоте $\sim 1,8$ нс и расходимости в пределах 3×10^{-4} рад. Использовался бесщелевой спектрограф с выпуклым кристаллом слюды, что позволяло получать обзорные спектры в диапазоне 0,5–19 Å (рис. 7). В ка-

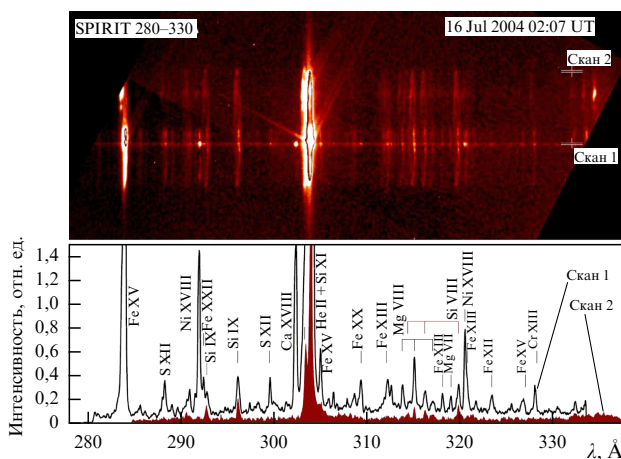
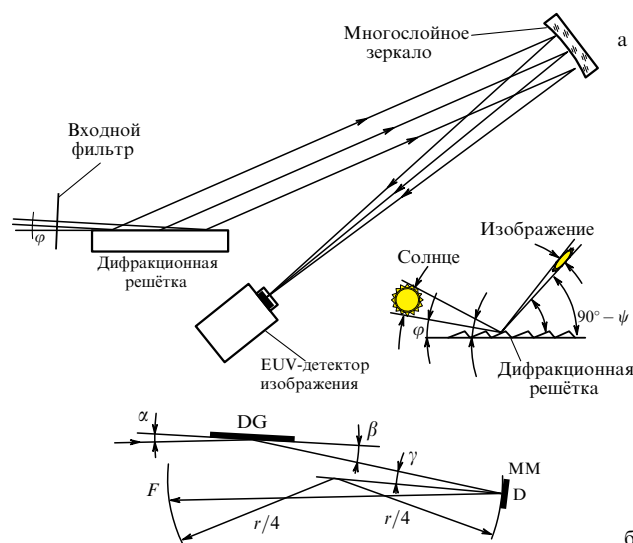


Рис. 5. (а) Элементы бесщелевого спектрогелиографа СПИРИТ на борту спутника КОРОНАС-Ф [26] и его схематическое изображение с фокусирующим многослойным зеркалом нормального падения и плоской дифракционной решёткой скользящего падения. (б) Спектрогелиограмма в диапазоне 280–330 Å (16 июля 2004 г.) [26]. Вверху: спектральные изображения Солнца в линиях, сжатые в направлении дисперсии во внутреннем порядке дифракции из-за "углового уменьшения" решётки в этом направлении. Внизу: спектры, полученные сканированием на уровне, включающем область вспышки (скан 1, класс вспышки X1.3), и в области спокойного Солнца (скан 2).

честве мишеней использовались NaCl, Mg, Al, SiO₂, P, S, KCl, CaO, Ti и V.

Плодотворная работа группы, основу которой составляли В.А. Бойко, С.А. Пикуз и А.Я. Фаенов, продолжалась в течение ряда лет. Вот лишь некоторые работы этой научной группы. Были получены в лазерной плазме и идентифицированы переходы типа $2p^5 - 2p^4 3d$ в ионах $[F]_{Y, Mo}$, т.е. во фтороподобных ионах YXXXI и MoXXXIV в областях длин волн около 5,4 Å и 4,5 Å соответственно [30]. Удалось наблюдать сателлиты перехода $1s^2 1S_0 - 1s 3p 1P_1$ (Ly_{β}) в He-подобных ионах элементов Mg, Al, Si, P, S, Cl и K [31]. Предпринимались усилия по измерению электронной плотности N_e по штарковскому уширению переходов серии Лаймана H-подобных ионов, по отношению интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий He-подобного иона и по отношению интенсивностей других спектральных линий [32].

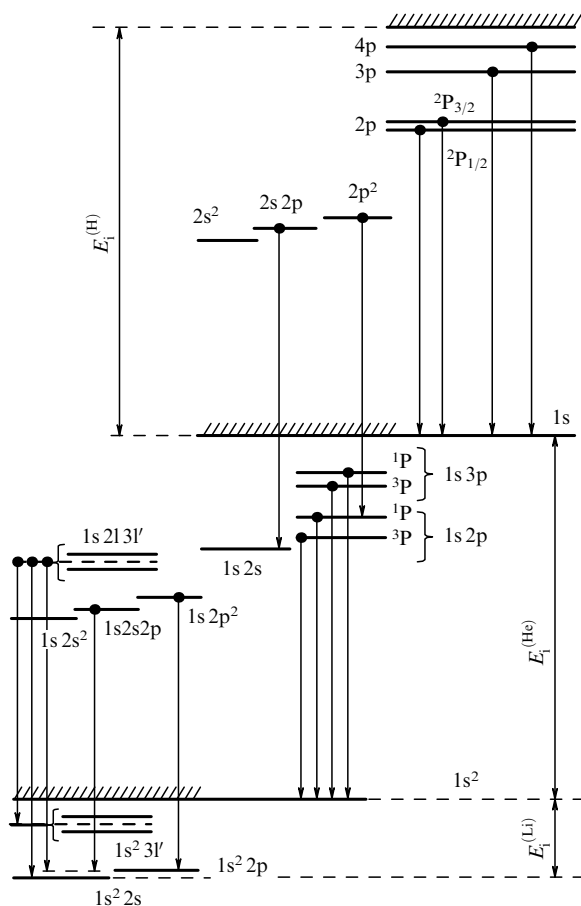


Рис. 6. Схема уровней H-, He- и Li-подобных ионов, между которыми наблюдаются наиболее интенсивные переходы [29].

5. Рентгеновская и вакуумная ультрафиолетовая спектроскопия лазерной плазмы в подразделениях И.И. Соболяна

Работы по спектроскопии многозарядных ионов в лазерной плазме в то время проводились также в секторе И.И. Соболяна лаборатории КРФ, большая часть сотрудников которого позднее, в 1984 г., перешла в Лабораторию спектроскопии вместе с И.И. Соболяном. Следует отметить доверительные отношения и атмосферу взаимопомощи между сотрудниками И.И. Соболяна. Особенно хочется отметить роль И.Л. Бейгмана, А.В. Виноградова, Б.Я. Зельдовича и Е.А. Юкова, всегда доброжелательно консультировавших экспериментаторов по вопросам теории.

Для регистрации спектров многозарядных ионов, в том числе с пространственным разрешением, В.А. Чирков применил светосильный фокусирующий спектрограф по схеме Иоганна (рис. 8) [33]. Особенность этой схемы в том, что регистрируемый диапазон спектра зависит от положения источника относительно круга Роуланда, ширины линий в гораздо меньшей степени зависят от размера источника, а высокая светосила позволяет регистрировать рентгеновский спектр при весьма умеренной интенсивности/энергии облучения.

Спектры многозарядных ионов не раз использовались для спектроскопической диагностики плазмы. С помощью отношений интенсивностей, чувствительных

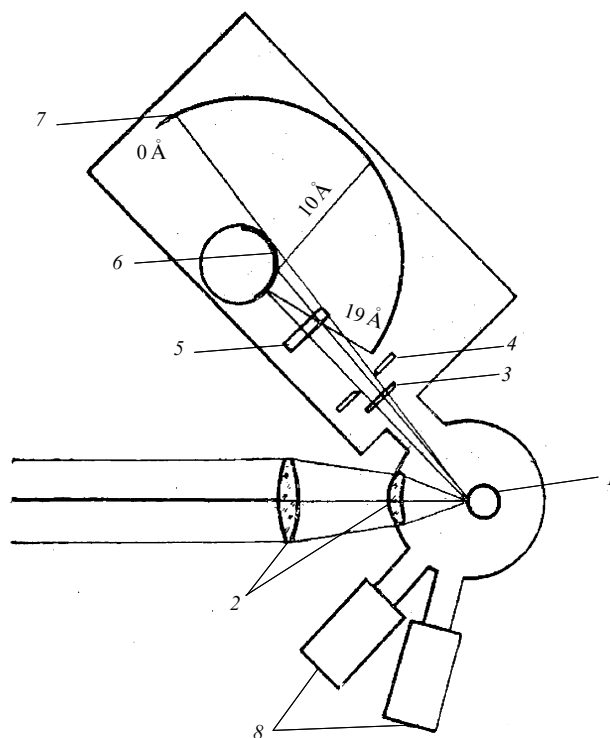


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1 — мишень; 2 — двухкомпонентный объектив ($f = 7,5$ см); 3 — фильтр (5 мкм лавсан, 0,1 мкм алюминий); 4 — ограничивающая диафрагма; 5 — щель для разделения дорожек при фотографировании нескольких спектров; 6 — кристалл слюды; 7 — фотоплёнка; 8 — каналы регистрации непрерывного рентгеновского излучения [29].

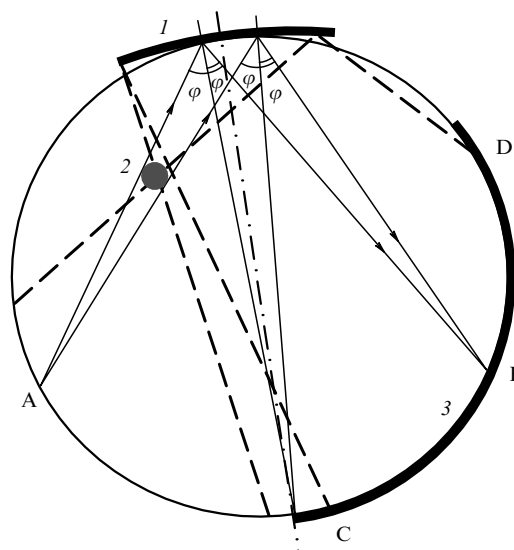


Рис. 8. Схема хода лучей в спектрографе: 1 — кристалл слюды; 2 — лазерная плазма; 3 — фотоплёнка; лучи, продолжения которых сходятся в точке А, фокусируются в точке В на фотоплёнке; CD — область плёнки, на которую фотографируется спектр [33].

к плотности, температуре и ионному составу, в оптически тонкой плазме можно определить/оценить указанные характеристики. Штарковское уширение линий, в частности оптически тонких линий серии Бальмера и Пашена, даёт надёжные измерения плотности. Доплеровское уширение линий характеризует макроскопическое движение плазмы (в большинстве наблюдаемых облас-

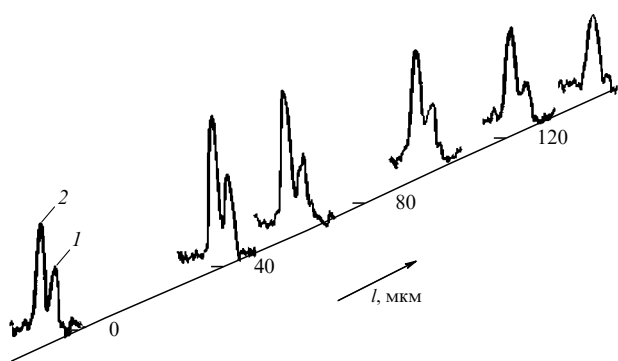


Рис. 9. Микроденситограммы спектральных линий $2p^5 2P_{1/2} \rightarrow 2s2p^4 2P_{3/2}$ ($\lambda = 121,97 \text{ \AA}$) и $2s2p^4 4P_{3/2} \rightarrow 2s^2 2p^3 4S_{3/2}$ ($\lambda = 121,83 \text{ \AA}$) иона FeXX в лазерной плазме на различном удалении от поверхности мишени. Чувствительный к плотности переход типа $2p^5 \rightarrow 2s2p^4$ (1) при удалении от мишени ослабевает значительно быстрее, чем переход типа $2s2p^4 \rightarrow 2s^2 2p^3$ (2) [35].

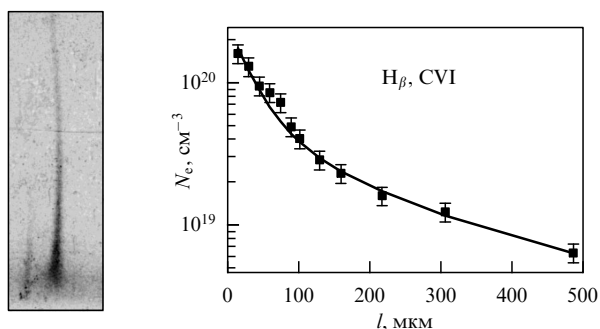


Рис. 10. Линия H_β ($\lambda = 135 \text{ \AA}$) иона CVI в лазерной плазме. Штарковское уширение зависит от расстояния до углеродной мишени. Справа — профиль N_e , определённый по уширению бальмеровских линий [36].

тей лазерной плазмы "разлётное" доплеровское уширение преобладает над тепловым). Используя отечественный спектрограф скользящего падения ($R = 1 \text{ м}$, $\alpha = 8^\circ$), Е.Н. Рагозин получал спектры многозарядных ионов в области $\lambda < 300 \text{ \AA}$ с целью определения параметров плазмы. Так, по отношению интенсивностей переходов типа $(2p^6 \rightarrow 2s2p^5)/(2s2p^5 \rightarrow 2s^2 2p^4)$ в О-подобных ионах и $(2p^5 \rightarrow 2s2p^4)/(2s2p^4 \rightarrow 2s^2 2p^3)$ в N-подобных можно оценить электронную плотность [34, 35] (рис. 9). По штарковскому уширению переходов серии Бальмера H_α , H_β и H_γ водородоподобного иона CVI была определена усреднённая электронная плотность [36] (рис. 10). Бесщелевой вариант спектрографа ДФС-6 использовался для получения диспергированных спектральных изображений лазерной плазмы, что давало возможность определить размер области свечения/существования иона той или иной кратности ионизации, а также угол разлёта [37]. По "разлётному" доплеровскому уширению была оценена скорость плазмы (рис. 11). Эксперименты показали, что N_e в (адиабатической) точке Жуге по крайней мере в шесть раз ниже критической плотности $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для излучения неодимового лазера. Из этого, а также из совокупности других данных вытекало, что на критической поверхности имеет место скачок разрежения [38, 39]. В основе указанного эффекта лежит то обстоятельство, что предельный поток электронной теплопроводности при-

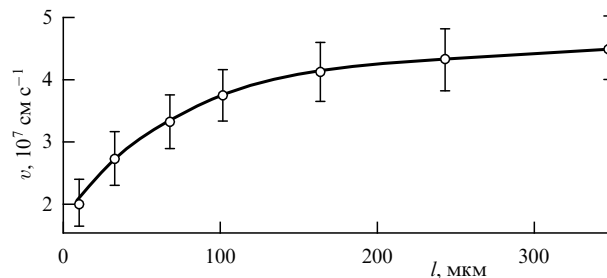


Рис. 11. Зависимость скорости плазмы в кальциевом факеле от расстояния до мишени, определённая по доплеровскому уширению переходов иона CaXIII при $q_L \sim 10^{13} \text{ Вт см}^{-2}$ [38].

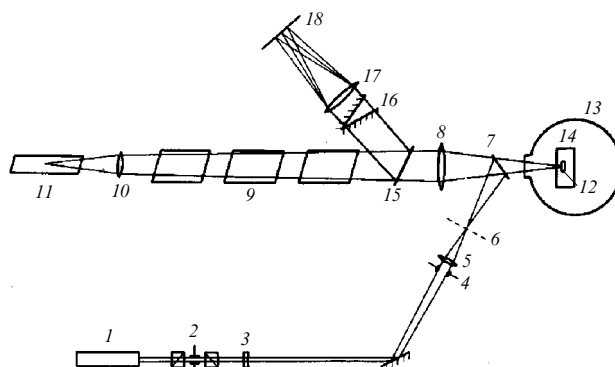


Рис. 12. Схема установки: 1 — задающий генератор; 2 — электрооптический затвор; 3 — отрицательная линза; 4 — диафрагма; 5 — инжекторная линза; 6 — фокальная плоскость линзы 5, сопряжённая с поверхностью мишени 12; 7, 15 — делители пучка; 8, 17 — идентичные линзы; 9 — три усилительных каскада $\varnothing 45 \text{ мм}$; 10 — линза; 11 — кювета с CCl_4 ; 13 — вакуумная камера; 14 — рентгеновский спектрограф; 16 — зеркальный клин; 18 — фокальная плоскость линзы 17 [41].

близительно на полтора порядка ниже так называемого свободномолекулярного потока тепла и не способен обеспечить околосвуковое течение в надкритической плазме. Такой вывод был сделан для интенсивностей менее $10^{14} \text{ Вт см}^{-2}$.

Помимо традиционной схемы лазера задающий генератор + усилители, использовалась схема с обращением волнового фронта при ВРМБ с компенсацией абераций оптических элементов (рис. 12). Было экспериментально показано, что при этом диаметр области существования ионов высокой кратности уменьшается, а концентрация энергии в фокальном пятне увеличивается [40, 41]. В данной экспериментальной схеме были получены рентгеновские спектры многозарядных ионов магния и железа с пространственным разрешением в направлении нормали к мишени при помощи спектрографа Иоганна с кристаллом слюды [33]. На рисунке 13 приведены участки спектрограммы магния с указанием спектральных линий. Наблюдаемое отношение интенсивностей компонент тонкой структуры резонансной линии иона MgXII говорит о меньшей оптической толщине плазмы в данных спектральных линиях, чем обычно наблюдается при фокусировке линзой. Такой факт также свидетельствует о малом поперечном размере лазерной плазмы.

Используя наносекундный неодимовый лазер с энергией $\sim 10 \text{ Дж}$ для регистрации спектров лазерной плазмы, А.П. Шевелько применил светосильный фокусирующий спектрограф Гамоша с кристаллом слюды (рис. 14 —

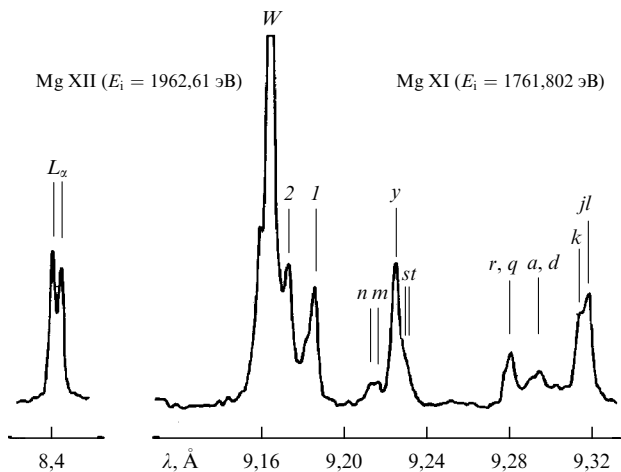


Рис. 13. Участок спектрограммы магния во втором порядке отражения кристалла. *W* и *y* — резонансная и интеркомбинационная линия иона MgXI; *m*, *n*, *s*, *t*, *r*, *q*, *a*, *d*, *k*, *j*, *l*, *l* и *2* — спутники резонансной линии иона MgXI, начинающиеся с автоионизационных уровней иона MgX; *Lα* — резонансный дублет иона MgXII [41].

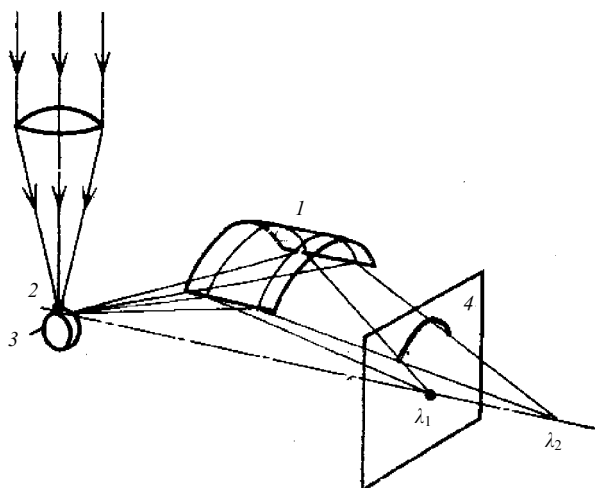


Рис. 14. Схема рентгеновского спектрографа Гамоща ($\lambda_1 > \lambda_2$): 1 — кристалл слюды; 2 — лазерная плазма; 3 — мишень; 4 — плоскость фотоплёнки [42].

17) [42, 43], причём плазма располагалась на оси цилиндра, а плоскость детектора могла располагаться как перпендикулярно оси спектрографа, так и на его оси. В последнем случае "светосила" схемы Гамоща максимальна. При таком расположении детектора размер спектрального изображения обычно совпадает с размером источника, что отличает схему от схемы Иоганна. Детектором излучения служила рентгеновская фотоплёнка, а в дальнейшем и ПЗС-линейка [44]. Интересно, что наряду с природным кристаллом в спектрографе удаётся использовать многослойную структуру, в частности структуру W/V_4C с периодом 12 Å, нанесённую на поверхность кристалла [45] (рис. 18).

В совместной работе Лаборатории спектроскопии и Лаборатории люминесценции исследовался спектр магниевой плазмы, возбуждаемый импульсами пикосекундного рубинового лазера [46]. Лазер состоял из генератора с самосинхронизацией мод и усилителя, работавших при низкой (100 К) температуре. Это позволило получить короткий пуг, состоявший из одного-трёх импульсов дли-

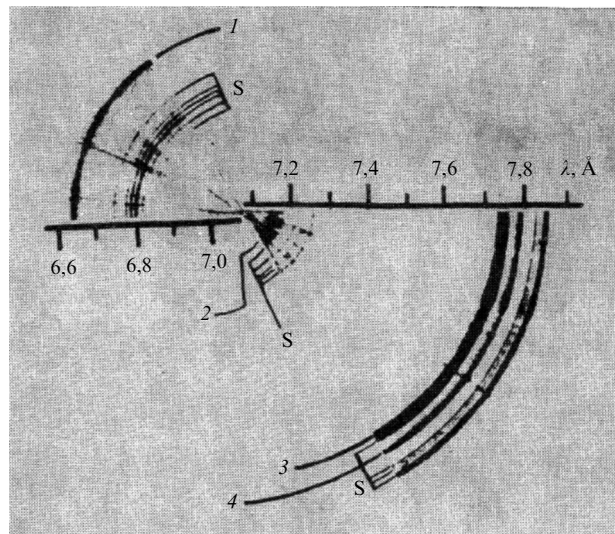


Рис. 15. Спектр излучения алюминиевой лазерной плазмы в области 6,5–8,0 Å ($E_L = 5$ Дж): 1 — AlXII ($1s^2 1S_0 - 1s3p^1P_1$); 2 — AlXIII ($1s^2 S_{1/2} - 2p^2 P_{3/2,1/2}$); 3 — AlXII ($1s^2 1S_0 - 1s2p^1P_1$); 4 — AlXII ($1s^2 1S_0 - 1s2p^3P_1$); S — спутники [42].

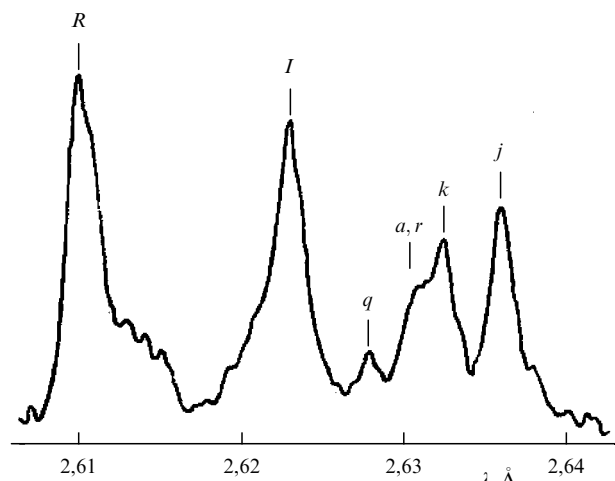


Рис. 16. Денситограмма спектра излучения иона TiXXI в лазерной плазме ($E_L = 25$ Дж): *R* — $1s^2 1S_0 - 1s2p^1P_1$; *I* — $1s^2 1S_0 - 1s2p^3P_1$; *j* — $1s^2 2p^2 P_{3/2} - 1s2p^2 D_{3/2}$; *q* — $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 2s2p(^3P)1s^2 P_{3/2}$ [42].



Рис. 17. Спектрограф Гамоща с детектором (ПЗС-линейкой) на оси цилиндра [44].

тельностью 10–20 пс с энергией до 0,5 Дж. Использовался спектрограф Гамоща, причём рентгеновская фотоплёнка ориентировалась перпендикулярно его оси. За одну-две лазерные вспышки регистрировались резонансная и интеркомбинационная линии He-подобного иона магния, её спутники, а также резонансная линия H-подобного иона (рис. 19, 20). При увеличении числа вспышек наблюдались линии $1s^2 - 1snp$ ($n = 3 - 8$) He-подобного иона. Отмечено,

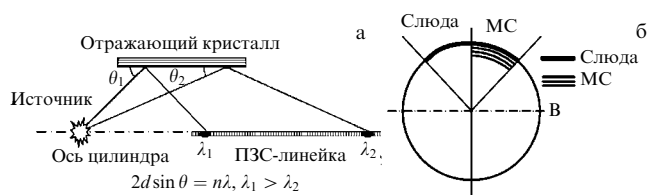


Рис. 18. (а) Схема рентгеновского фокусирующего спектрометра Гамаша в плоскости, проходящей через ось спектрометра, и (б) геометрия относительных измерений коэффициента отражения кристалла слюды и многослойной структуры (МС), нанесённой на внутреннюю поверхность слюды (В — положение фокальной плоскости) [45].

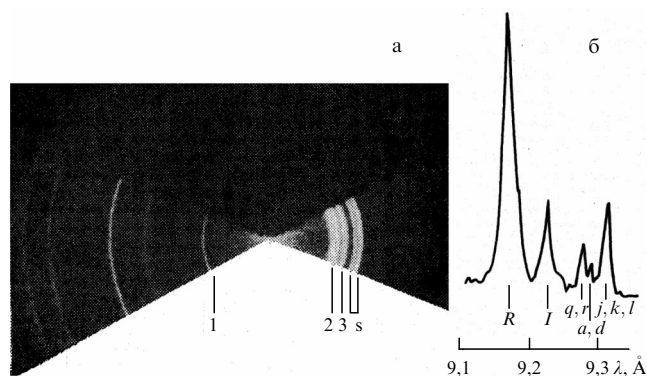


Рис. 19. (а) Спектр излучения ионов MgXII, MgXI и MgX в области 7,4–9,5 Å и (б) денситограмма спектра излучения ионов MgXI и MgX [46].

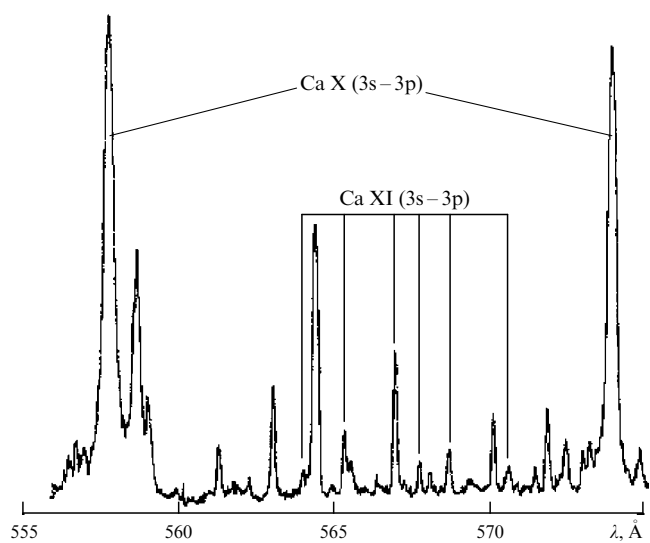


Рис. 20. Участок спектра кальциевой мишени вблизи резонансных линий Na-подобного иона CaX с указанием линий Ne-подобного иона CaXI [52].

что электронная температура, оцениваемая из соображений кинетики наработки H-подобного иона (700 эВ), оказалась существенно выше, чем T_e , определённая по отношению интенсивности резонансной линии Ne-подобного иона к интенсивности сателлитов j, k, l , возбуждаемых в результате диэлектронной рекомбинации.

5.1. Спектроскопия 3–3 переходов Ne-подобных ионов

В середине 1970-х годов А.Н. Жерихин, К.Н. Кошелев, В.С. Летохов (ИСАН) и А.В. Виноградов, И.И. Собель-

ман, Е.А. Юков (ФИАН) сформулировали подход к созданию лазеров в далёкой ВУФ (мягкой рентгеновской) области спектра на переходах многозарядных Ne-подобных ионов в плазме [47, 48]. В первой работе предлагалось создавать инверсию заселённости при быстром (пикосекундном) нагреве предварительно созданной плазмы (двухступенчатый нагрев плазмы). Во второй было показано, что значительная инверсия возникает и в квазистационарном режиме. Оба подхода оказались востребованы и легли в основу всех успешных работ по созданию лазеров на переходах многозарядных ионов в мягкой рентгеновской области спектра, первой из которых следует считать работу лаборатории в Ливерморе [49].

На тот момент переходы между уровнями конфигураций $2p^5 3l$ Ne-подобных ионов были частично изучены лишь для первых членов изоэлектронной последовательности неона. Так, благодаря работе Н.Р. Garnir et al. [50] в 1978 г. стали частично известны длины волн и уровни энергии для иона SVII: были идентифицированы 16 линий в диапазоне 600–1500 Å, и 22 из 26 уровней энергии конфигураций $2p^5 3s$, $2p^5 3p$ и $2p^5 3d$ были присвоены значения энергии. Большинство этих линий наблюдались в экспериментах пучок–фольга с недостаточным спектральным разрешением.

Для получения и регистрации спектров иона SVII в ФИАНе была использована лазерная плазма и спектрограф нормального падения ДФС-29. В совместной с сотрудниками ИСАН (Э.Я. Кононов, А.Е. Крамида, Л.И. Подобедова) работе [51] было идентифицировано 23 новых линии, в четырёх случаях изменена классификация линий, присвоенная Н. Garnir, а точность измерений длин волн была увеличена на порядок величины. Впервые найдены четыре уровня энергии из 26; 10 уровней энергии уточнены на 100–1500 см^{-1} , а энергии ещё шести уровней уточнены на 20–40 см^{-1} .

В дальнейшем были исследованы спектры, обусловленные переходами между уровнями конфигураций $2p^5 3s$, $2p^5 3p$ и $2p^5 3d$ в Ne-подобных ионах CIVIII, KX и CaXI [52, 53]. При расшифровке спектра CaXI важную роль сыграла превосходная спектрограмма, полученная в ИСАНе на вакуумном спектрографе нормального падения с решёткой 1200 мм^{-1} с $R = 6,65 \text{ м}$ (см. рис. 20). В общей сложности в спектрах лазерной плазмы было идентифицировано более 130 линий.

В ходе продвижения вдоль изоэлектронной последовательности Ne I использовался эффективный приём для предсказания длин волн 3–3 переходов. Он опирается на теоретические расчёты уровней энергии и состоит в экстраполяции или интерполяции приведённой разности между теоретической и экспериментальной энергиями перехода. В качестве теоретических значений использовались расчёты по теории возмущений с разложением по степеням $1/Z$, опубликованные в работах [54, 55].

6. X-пинч

С.А. Пикуз, уже будучи сотрудником Отдела физики высоких плотностей энергии, предложил и реализовал конфигурацию в сильноточном ($> 100 \text{ кА}$) импульсном вакуумном диоде, получившую название X-пинч [56, 57] (рис. 21). Она представляет собой две (или несколько) тонкие проволоочки, пересекающиеся в одной точке. Замечательная особенность X-пинча состоит в том, что

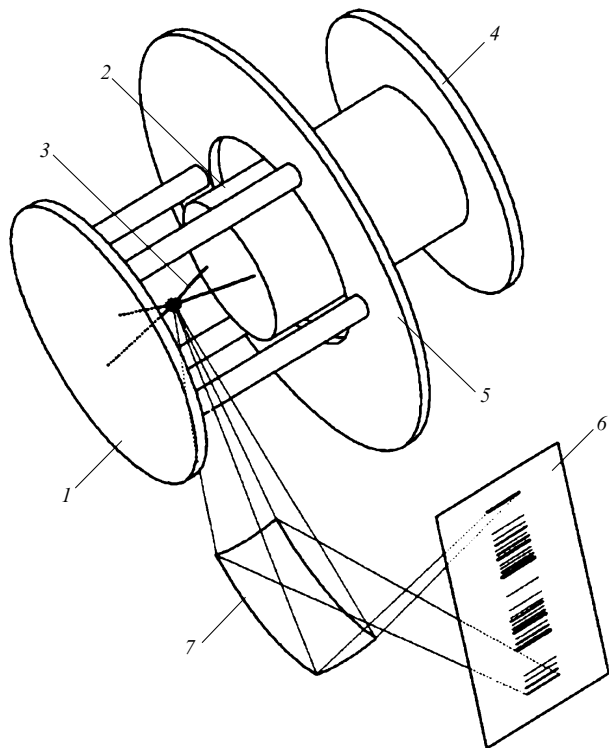


Рис. 21. Схема эксперимента (X-пинч): 1 — анод; 2 — катод; 3 — молибденовые проволочки; 4 — высоковольтный электрод; 5 — заземлённый электрод; 6 — рентгеновская фотоплёнка; 7 — сферически изогнутый кристалл слюды [57].

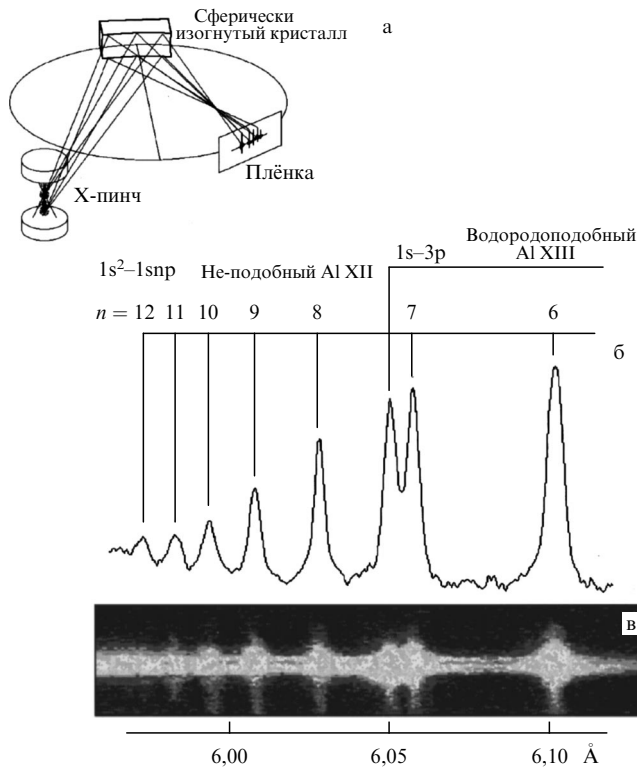


Рис. 22. (а) Схема эксперимента (X-пинч); (б) спектр алюминиевой плазмы, зарегистрированный с помощью сферического кристаллического спектрометра с однокоординатным пространственным разрешением с кристаллом слюды [59]; (в) — фрагмент спектрограммы.

имплозия плазмы (пинчевание) происходит в фиксированной точке, в месте пересечения проволочек, что позволяет проводить диагностику с высоким пространственным и временным разрешением. По существу, X-пинч представляет собой точечный наносекундный источник рентгеновского и ВУФ-излучения высокой яркости, спектральный состав которого зависит от материала проволочек. По оценкам авторов, в пинче достигается плотность $N_e \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$.

Концепция X-пинча породила цикл работ по исследованию его характеристик и возбуждаемых в нём специфических спектров многозарядных ионов. Часть работ была выполнена совместно с сотрудниками ВНИИФТРИ, Корнельского университета, лабораторий в Ливерморе и Лос Аламосе и др. [57–61]. Так, в работе [57] были получены и исследованы спектры Na- и Mg-подобных ионов молибдена MoXXXII и MoXXXI в диапазоне 4,4–5,0 Å. Были идентифицированы спутники резонансных линий Ne-подобного иона MoXXXIII , возбуждаемые при захвате электрона на автоионизационные уровни энергии $2l^7 3l' 3l''$ иона MoXXXII и уровни $2l^7 3l' 3l'' 3l'''$ иона MoXXXI . В работе [58], эксперименты которой с алюминиевой проволочкой были выполнены в Корнельском университете, наблюдались спутники резонансной линии Ne-подобного иона в Li-, Be-, B- и C-подобных ионах алюминия. В работе [59] удалось наблюдать в лазерной плазме и в плазме X-пинча линии, отвечающие переходам $1s^2 \ ^1S_0 - 1snp \ ^1P_1$ ($n = 6 - 12$) в Ne-подобном ионе AlXII (рис. 22). Прецизионные измерения длин волн ридберговских линий позволили определить энергию основного состояния иона с относительной точностью $\sim 5 \times 10^{-5}$ (2085,98 ± 0,10 эВ).

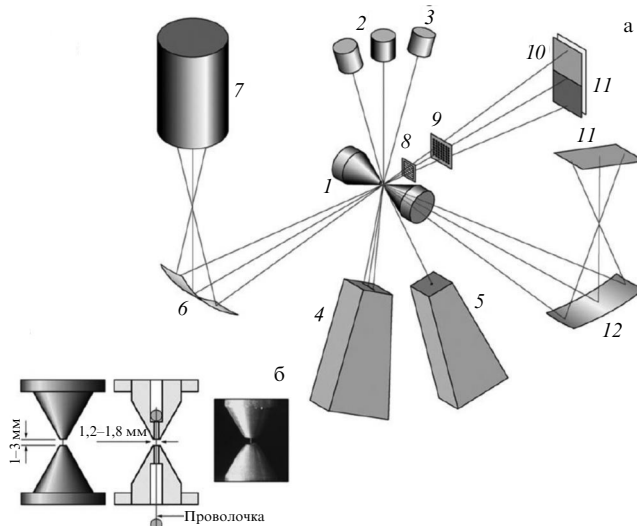


Рис. 23. (а) Регистрация излучения гибридного X-пинча: 1 — гибридный X-пинч; 2 — фотодиоды; 3 — рентгеновский дифракционный детектор; 4 — интегральная по времени щелевая камера; 5 — интегральная по времени камера-обскура; 6 — кристалл; 7 — электронно-оптическая камера; 8, 9 — изображаемые объекты; 10 — фильтры; 11 — пластинки для регистрации изображения; 12 — сферически изогнутый кристалл спектрографа. (б) Гибридный X-пинч с коническими электродами и его поперечное сечение [61].

В дальнейшем проводились исследования пинча с одной проволочкой, соединяющей два конических электрода (рис. 23). Такая конфигурация получила название гибридный X-пинч [61]. По многим своим характеристикам гибридный X-пинч не уступает стандартному X-пинчу, но значительно проще в работе.

7. Оптика мягкого рентгеновского диапазона

Благодаря развитию высоких технологий в последней четверти XX века стали возможны разработки новых рентгенооптических элементов. Речь идёт о френелевских линзах, асферической зеркальной оптике, многослойных рентгеновских зеркалах, пропускающих дифракционных решётках с высокой частотой линий, отражательных решётках с шагом, изменяющимся на апертуре по заданному закону, и других элементов. Их появление значительно расширило возможности эксперимента в вакуумной области спектра и привело к изменениям, которые справедливо называются революцией в рентгеновской оптике. Пионером в данном направлении в ФИАНе стал А.В. Виноградов, опубликовавший теоретическую статью совместно с Б.Я. Зельдовичем [62]. А.В. Виноградов сумел заинтересовать этой тематикой группу в Харьковском политехническом институте (ХПИ), руководимую А.И. Федоренко и В.В. Кондратенко, где развили технологию синтеза многослойных зеркал. В России исследования и разработки многослойной оптики и других рентгенооптических элементов исключительно успешно развивались в Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород) под руководством Н.Н. Салашенко. Группа Е.Н. Рагозина сотрудничала с обоими коллективами, пока было возможно.

Во второй половине 1980-х гг. А.В. Виноградовым, совместно с Н.Н. Зоревым, была высказана пионерская идея использовать рентгеновское излучение для проекционной микролитографии с применением зеркальной рентгеновской оптики, в том числе многослойных зеркал нормального падения [63, 64]. Было указано, что "...применение элементов рентгеновской оптики, производство которых вполне обеспечивается современным уровнем технологии, позволяет обеспечить производство микроструктур с размерами элементов порядка десятков нанометров..." [64]. Эта тематика тесно примыкает к вакуумной спектроскопии и в большой степени опирается на её достижения.

Как известно, лазерная плазма может быть источником как преимущественно линейчатого излучения, так и квазинепрерывного излучения, когда речь идёт о мишени с достаточно высоким атомным номером. Последнее обстоятельство было использовано для определения контура резонансного отражения многослойных зеркал (МЗ). Начало таких работ было положено в начале 1990-х гг. в Отделе спектроскопии в интересах космических исследований, совместно с коллективом, руководимым И.А. Житником. Для этого использовалась схема спектрографа с пропускающей решёткой и фокусирующим МЗ нормального падения [65] (рис. 25, 26). В дальнейшем такая схема многократно использовалась для оценки МЗ и их однородности по апертуре (см., например, [66–68]).

Оценивалось также качество изображения, создаваемого фокусирующим МЗ нормального падения, и было экспериментально продемонстрировано субсекундное угловое разрешение на длине волны 17,5 нм (рис. 27) [69, 70].

Максимум коэффициента отражения периодического бинарного МЗ А/В реализуется на длине волны λ_0 , удовлетворяющей условию Брэгга–Вульфа $m\lambda_0 \simeq 2dn\cos\theta$, где d — период многослойной структуры, т.е. сумма толщин слоёв материалов А и В в периоде, n — среднее

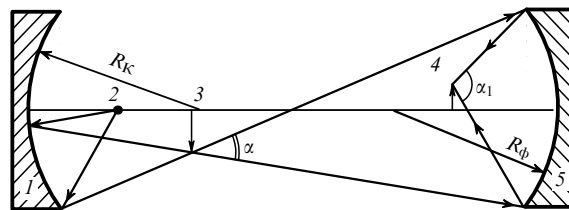


Рис. 24. Простейшая схема проекционной рентгеновской литографии. 1 — многослойное сферическое зеркало-конденсор; 2 — источник рентгеновского излучения; 3 — шаблон; 4 — рентгенорезист; 5 — фокусирующее многослойное сферическое зеркало [64].

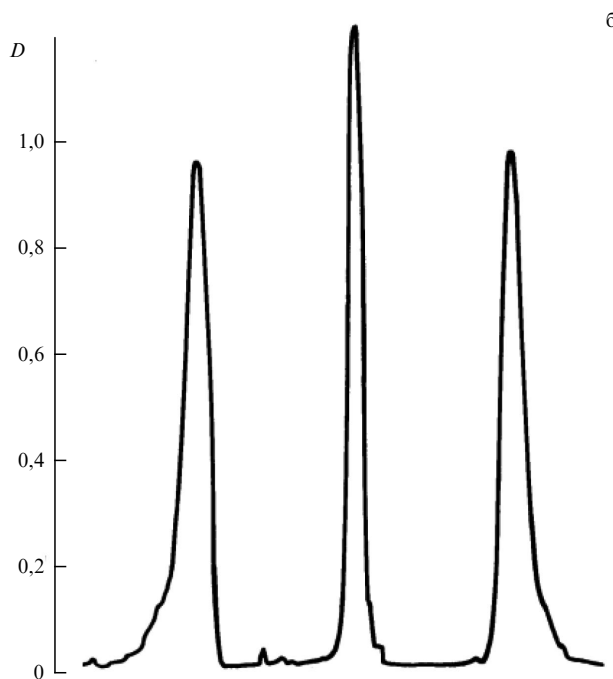
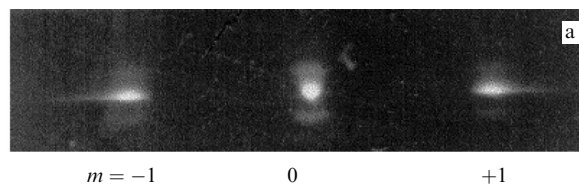


Рис. 25. Спектральный контур отражения вогнутых многослойных зеркал Mo/Si ($\lambda_0 = 19,5$ нм, $\Delta\lambda_{1/2} = 2,1$ нм), определённый с помощью лазерноплазменного источника излучения в схеме спектрографа со свободновисящей дифракционной решёткой [65].

по периоду значение показателя преломления, θ — угол падения излучения, отсчитываемый от нормали, а m — порядок интерференции. Обычно относительная ширина (FWHM) резонансного контура отражения $\delta\lambda_{1/2}/\lambda \sim 0,1-0,01$. Поэтому спектральная селективность (разрешающая способность) такого зеркала находится в пределах 10–100, да и то при условии отсечения излучения в крыльях контура отражения и в других интерференционных максимумах. Используя фокусирующие МЗ совместно со свободновисящей пропускающей решёткой, удаётся реализовать разрешающую способность 200–300, ограниченную, как правило, регулярностью линий решётки. Наконец, при использовании фокусирующих МЗ совместно с плоской отражательной решёткой дости-

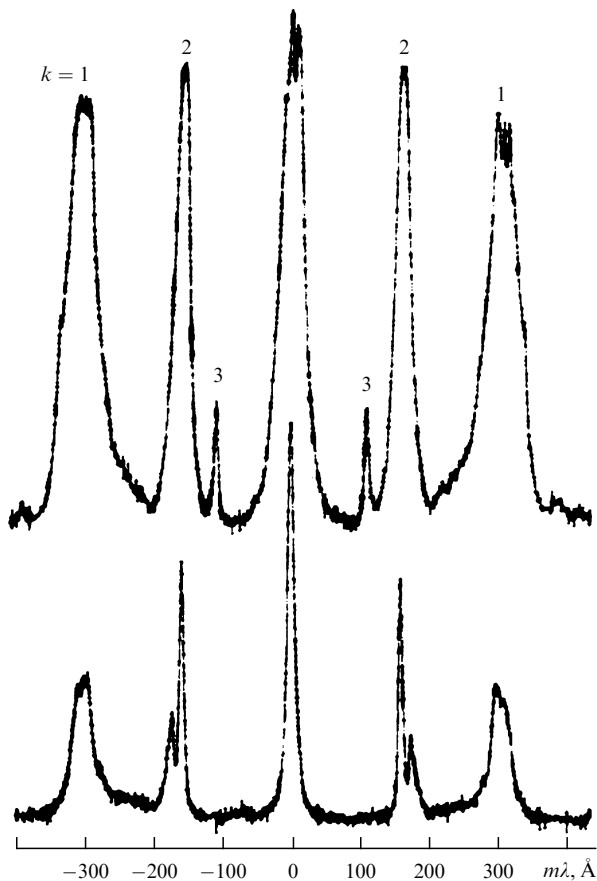


Рис. 26. Обзорная микроденситограмма спектра, отражённого от вогнутого многослойного зеркала Mo/Si с максимумом в первом интерференционном порядке отражения на длине волны 306 Å. Вверху: непосредственно от зеркала; внизу: с использованием алюминиевого фильтра толщиной 0,2 мкм. Цифры при максимумах указывают интерференционный порядок отражения [67].

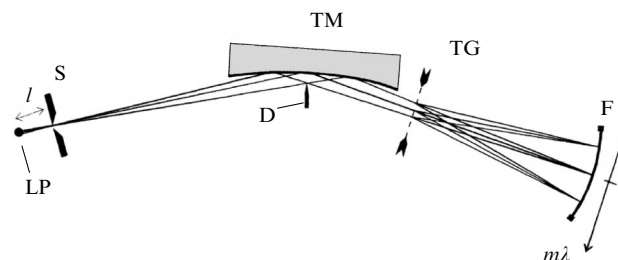


Рис. 28. Схема обзорного квазистигматического спектрографа для мягкого рентгеновского диапазона: LP — лазерная плазма; S — входная щель; TM — тороидальное зеркало скользящего падения; D — диафрагма; TG — свободновисящая пропускающая решётка; F — рентгеновская фотоплёнка; l — расстояние LP–S, согласуемое с углом скользящего падения и радиусами зеркала для достижения стигматизма [74].

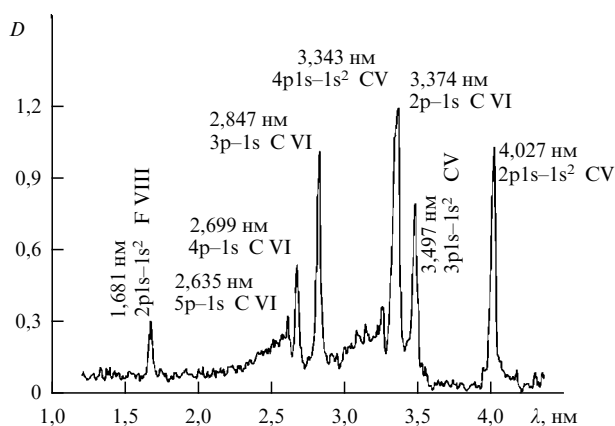


Рис. 29. Коротковолновая часть спектрограммы тефлоновой мишени, зарегистрированная в схеме, изображённой на рис. 28 (угол скольжения: 4°; частота линий пропускающей решётки: 5000 мм⁻¹). Спектр возбуждался лазерными импульсами: 0,1 Дж, 5 нс, 0,54 мкм [74].

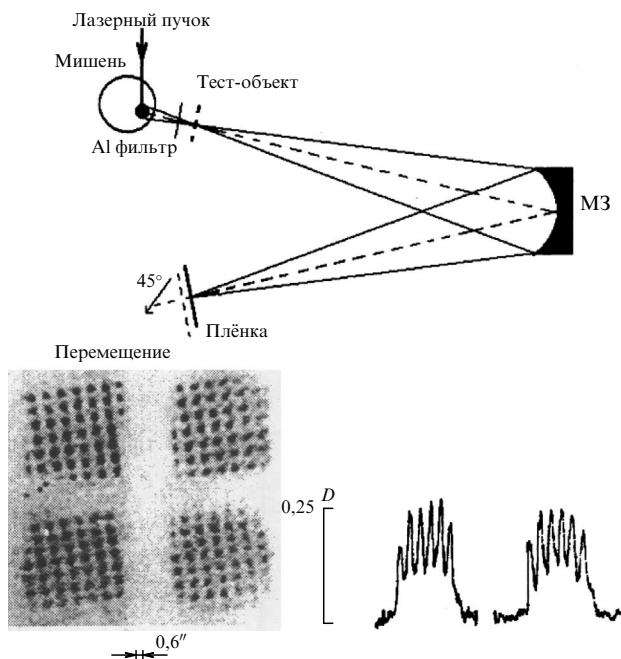


Рис. 27. Демонстрация углового разрешения свыше 1'' при фотографировании двумерного тест-объекта с помощью слаботороидального ($R_s = 1620$ мм, $R_m = 1621$ мм) многослойного зеркала Mo/Si с максимумом отражения на длине волны 175 Å [69].

гается разрешающая способность $10^3 - 10^4$ и более, причём в стигматическом спектрографе [71–73].

Во многих случаях требуется получить спектр в относительно широком диапазоне, а не в пределах резонансного контура отражения МЗ. Это достигается в обзорном спектрографе с тороидальным зеркалом скользящего падения и свободновисящей пропускающей решёткой (рис. 28, 29) [74].

7.1. Широкополосные многослойные зеркала на основе аперриодических многослойных структур

Периодическое МЗ реализует максимум коэффициента отражения на фиксированной длине волны, удовлетворяющей условию Брэгга – Вульфа. Аперриодическая многослойная структура может удовлетворять и другим критериям. К очевидным полезным критериям относятся, например: 1) максимальный интегральный коэффициент отражения на заданном интервале длин волн или углов падения; 2) то же, но с учётом функции источника; 3) отражение аттосекундных импульсов излучения с сохранением их формы/длительности; 4) максимальный равномерный коэффициент отражения на заданном интервале длин волн [75–78]. Последний критерий особенно полезен при создании широкополосного спектрографа. Многослойная структура находится при численном решении обратной задачи многослойной оптики.

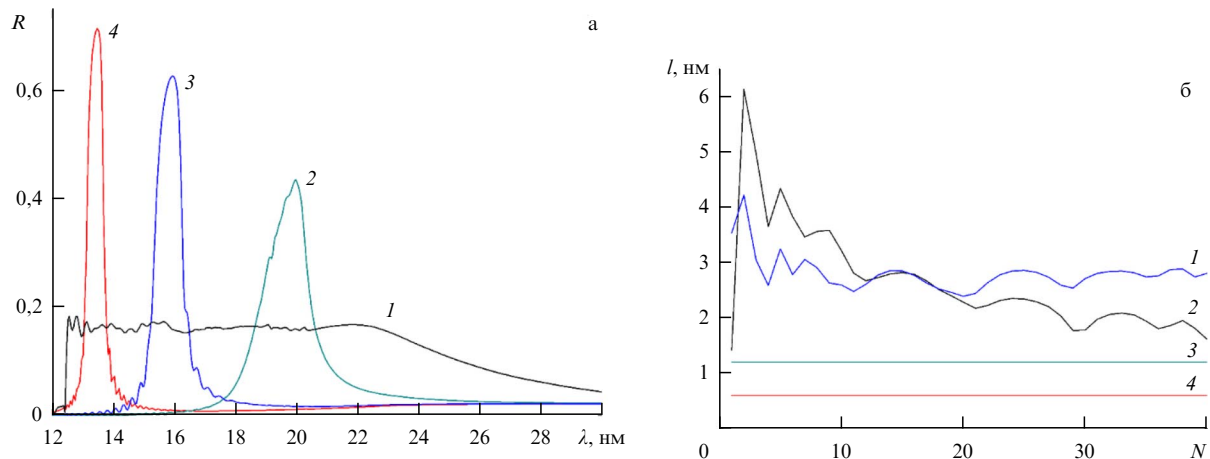


Рис. 30. (а) Расчётный коэффициент отражения аperiodического МЗ при нормальном падении в области 12–30 нм (кривая 1). Для сравнения показаны коэффициенты отражения периодических МЗ, с максимумами отражения на длинах волн 20 (2), 16 (3) и 13,5 нм (4). (б) Толщины слоёв Mo (1), Si (2) и переходных слоёв Mo на Si (3) и Si на Mo (4) аperiodического МЗ, оптимизированного на максимальное равномерное отражение в интервале 12,5–25 нм. Нумерация слоёв идёт вглубь, от поверхности к подложке [78, 80].

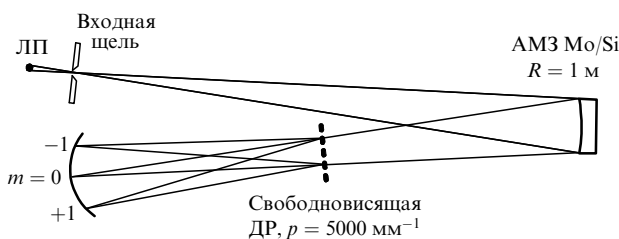


Рис. 31. Стигматический широкополосный спектрограф с аperiodическим многослойным зеркалом Mo/Si. Покрываете нанесено в лаборатории проф. В.В. Кондратенко (Харьковский политехнический институт) [78–80].

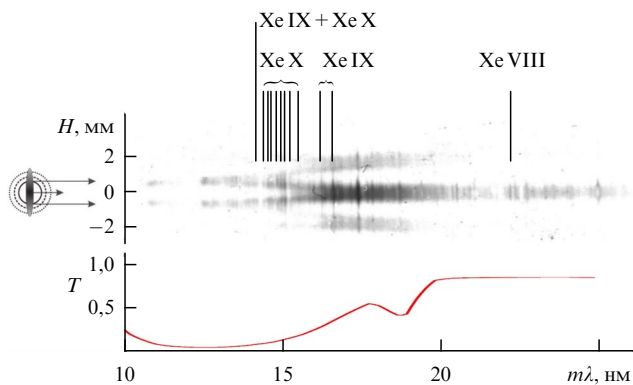


Рис. 32. Спектр с пространственным разрешением плазмы, возбуждаемой в импульсной струе Xe. Указаны некоторые линии, принадлежащие ионам Xe VIII–Xe X. Слева символическое изображение поперечного сечения струи Xe с лазерной плазмой веретенообразной формы. Стрелки указывают направление наблюдения. На графике внизу: пропускание условного слоя нейтрального Xe толщиной 0,5 мм с плотностью $2,2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Излучение из центральной (по высоте) области плазмы проходит через слой холодной плазмы наибольшей толщины и испытывает наибольшее поглощение, что обуславливает "выедание" центральной (по высоте) части в спектре и "расщепление" коротковолновой части спектра по высоте [81].

Первая аperiodическая структура Mo/Si была рассчитана на максимальное равномерное отражение в диапазоне 125–250 Å при почти нормальном падении ($\theta = 5^\circ$), а широкополосные многослойные зеркала были

нанесены на вогнутые подложки в лаборатории В.В. Кондратенко в ХПИ (рис. 30) [79, 80]. В дальнейшем они неоднократно использовались в физических экспериментах в схеме стигматического спектрографа (рис. 31) со свободностоящей пропускающей решёткой: для регистрации спектра лазерно-плазменного источника излучения на импульсной струе ксенона (рис. 32) [81]; регистрации линейчатого излучения, возникающего при перезарядке ионов BV и CVI на атомах струи благородного газа (He, Ne, Xe) [82]; регистрации мягкого рентгеновского излучения, генерируемого при отражении фемтосекундного ИК лазера от встречной релятивистской плазменной волны электронной плотности [83] и др.

7.2. VLS-решётки

В последние годы в Отделе спектроскопии ФИАН начаты разработки спектрометров на основе отражательных решёток с шагом, изменяющимся на апертуре по заданному закону, — так называемых VLS-решёток (Varied Line-Space gratings) (рис. 33) [84, 85]. При разработке VLS-спектрометра учитывается специфика научной задачи, источника и детектора излучения. Параметры VLS-решётки определяются схемой спектрометра, и их набор индивидуален для каждого типа прибора.

Создание VLS-решёток, наряду с многослойными зеркалами, свободностоящими пропускающими решётками, френелевскими зонными пластинками и т.п., стало частью ренессанса рентгеновской оптики. В настоящее время VLS-решётки широко применяются за рубежом в разнообразных специализированных спектрометрах для исследования эмиссионных спектров лазерной плазмы и плазмы быстрых электрических разрядов, астрофизике, в каналах синхротронного излучения, метрологии, рефлектометрии, рентгеновском флуоресцентном анализе и микроскопии с использованием синхротронов, лазеров на свободных электронах и других источников излучения, при анализе биологических объектов и пр. Важная особенность спектрометров на основе VLS-решёток состоит в том, что спектр формируется на плоской поверхности. Это делает их совместимыми с современными твердотельными детекторами с электрическим считыванием изображения и плоской чувствительной поверх-

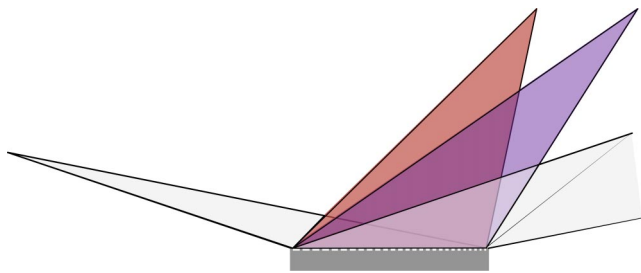


Рис. 33. Символическое изображение работы решётки с шагом, монотонно изменяющимся на апертуре по заданному закону (VLS-решётки). Частоту штрихов удобно описывать полиномом $p(y) = p_0 + p_1y + p_2y^2 + p_3y^3 + \dots$ [85].



Рис. 34. Широкополосный изображающий спектрограф с разрешением 26 мкм (Mo/Si: 12,5–30 нм, Mo/Ве: 11–14 нм; $\lambda/\delta\lambda \sim 1000$). Зеркало Mo/Ве синтезировано в ИФМ РАН [86–90].

ностью, в частности, с матричными приборами с зарядовой связью (ПЗС).

Комбинация широкополосного фокусирующего МЗ нормального падения и плоской VLS-решётки скользящего падения даёт стигматический спектрограф высоко-

го разрешения, рабочий диапазон которого совпадает со спектральной полосой отражения МЗ. Было реализовано две версии такого прибора [86–90]: с МЗ на основе аperiodических структур Mo/Si (125–250 Å) (рис. 34, 35) и Mo/Ве (110–140 Å); структура Mo/Ве была синтезирована в ИФМ РАН. Наряду со спектральным разрешением, прибор даёт пространственное разрешение в направлении, скрещенном по отношению к направлению дисперсии, и пригоден для диагностики плазмы и других источников ВУФ излучения, причём разрешение определяется размером ячейки детектора.

На основе сферических VLS-решёток скользящего падения были реализованы спектрографы с плоским полем на области 50–275 и 25–140 Å, совместимые с современными ПЗС-детекторами (рис. 36) [89, 91]. Как и в случае со стигматическим спектрографом, спектральное разрешение определяется детектором излучения и численно равно произведению обратной линейной дисперсии на удвоенный размер ячейки детектора. Недавно по договору с Институтом прикладной физики РАН (Нижний Новгород) был создан транспортабельный вариант спектрографа с плоским полем на оба указанных диапазона, оснащённый двумя сменными VLS-решётками с $p_0 = 1200$ и 2400 мм^{-1} [92].

Был реализован сканирующий спектрометр/монокроматор скользящего падения с постоянным углом отклонения по схеме Хеттрика–Андервуда на область 5–30 нм, состоящий из сферического зеркала и плоской VLS-решётки [93]. Сканирование по длинам волн осуществляется простым поворотом VLS-решётки, фокусное расстояние при этом остаётся неизменным. Была также разработана оригинальная концепция одноэлементного монохроматора высокого разрешения с постоянным углом отклонения с плоской VLS-решёткой, в котором сканирование осуществляется трансляцией VLS-решётки вдоль её поверхности [94]. Новый подход пригоден для монохроматизации как близкорасположенного источника (например, лазерной плазмы), так и удалённого

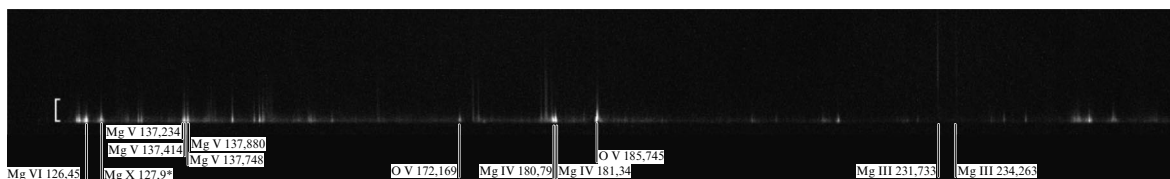


Рис. 35. Спектр магниевой плазмы с пространственным разрешением в направлении нормали к мишени. На правом краю спектра виден участок 125–128 Å во втором порядке дифракции. Скобка слева указывает масштаб 0,5 мм по вертикали [86].

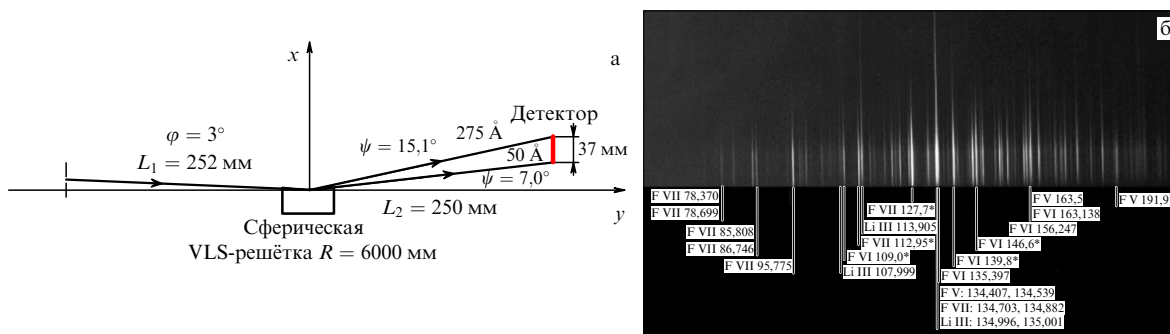


Рис. 36. Спектрографы с плоским полем в области 50–275 Å с решёткой, у которой частота штрихов изменяется от 1060 до 1360 мм^{-1} , или в области 25–140 Å с решёткой, у которой частота штрихов изменяется от 2100 до 2700 мм^{-1} [89, 91, 92].

(источник на орбите синхротрона). Был также проведён сравнительный анализ различных схем монохроматоров, пригодных для измерения коэффициентов отражения и пропускания рентгенооптических элементов в МР диапазоне [95].

Одним из результатов научной деятельности стала разработка основ технологии изготовления VLS-решёток методом интерференционной литографии совместно с ОАО ХолоГрэйт (С. Петербург) и НПО ГИПО (г. Казань). Фотолитографическому процессу предшествует расчёт схемы записи, обеспечивающей требуемое распределение частоты интерференционных полос на поверхности заготовки (решение обратной задачи интерференционной литографии). При записи использовалось излучение с длиной волны 0,488 мкм (ХолоГрэйт) и 0,53 мкм (ГИПО). Были изготовлены плоские VLS-решётки с частотой штрихов в центре $p_0 = 600 \text{ мм}^{-1}$ и сферические VLS-решётки ($R = 6000 \text{ мм}$, $p_0 = 1200$ и 2400 мм^{-1}). Все решётки были успешно испытаны в работе в спектрографах при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в лазерной плазме.

Таким образом, в ФИАНе освоены методы расчёта, оптимизации и конструирования VLS-спектрометров различного типа, включая аналитические расчёты и построение спектральных изображений методом численной трассировки лучей. Накопленный опыт позволяет создавать специализированные VLS-спектрометры, учитывающие специфику научной задачи и источника МР-излучения. Накоплен опыт создания образцов VLS-спектрометров "в железе", включая юстировку в видимом диапазоне и окончательную юстировку при регистрации линейчатых спектров многозарядных ионов в плазме. Продемонстрированы возможности спектрометров для диагностики плазмы.

8. Призменная рентгеновская спектроскопия

По мере уменьшения длины волны и приближения к жёсткому рентгеновскому диапазону поглощение в материалах убывает, и оказывается возможным использовать рефракцию для разложения излучения в спектр. В жёстком рентгеновском диапазоне более длинноволновое излучение испытывает преломление на больший угол, в отличие от видимого диапазона. Идея использовать призму как дисперсионный рентгенооптический элемент, насколько мне известно, принадлежит А.Г. Турьянскому [96–98]. Он применил алмазную призму (рис. 37, 38) для разложения в спектр первичного полихроматического излучения микрофокусной рентгеновской трубки с медным анодом; для измерения спектров пропускания излучения, прошедшего через образец бромнафталина ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Br}$) (рис. 39) и другие объекты; исследования ондуляторного излучения на синхротроне ESRF и пр. [99]. Была обоснована эффективность её применения для непрерывного мониторинга гармоник рентгеновского лазера на свободных электронах (рис. 40).

Критически важными условиями для разложения в спектр рентгеновской призмой являются: минимальное отклонение преломляющей грани от плоскости, шероховатость поверхности менее 1 нм и малое ослабление излучения в материале призмы. Удовлетворяющая всем этим требованиям призма была впервые изготовлена в ФИАНе в лаборатории А.А. Гиппиуса в 2000 г. из природного монокристалла якутского алмаза (см. рис. 38).

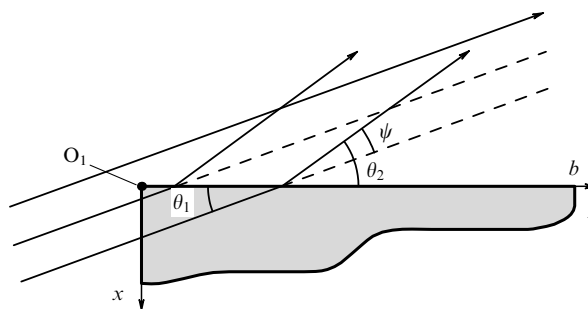


Рис. 37. Геометрия хода излучения при падении анализируемого пучка на базовую поверхность алмаза изнутри [97].

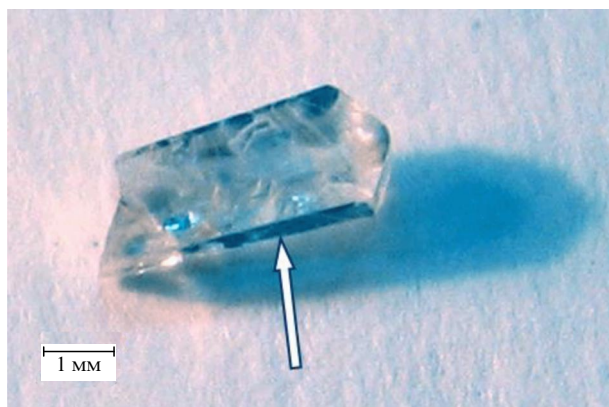


Рис. 38. Изготовленная в ФИАНе из якутского алмаза рентгеновская призма. Стрелкой показано направление ввода разлагаемого в спектр первичного пучка. (Фотография призмы предоставлена А.Г. Турьянским.)

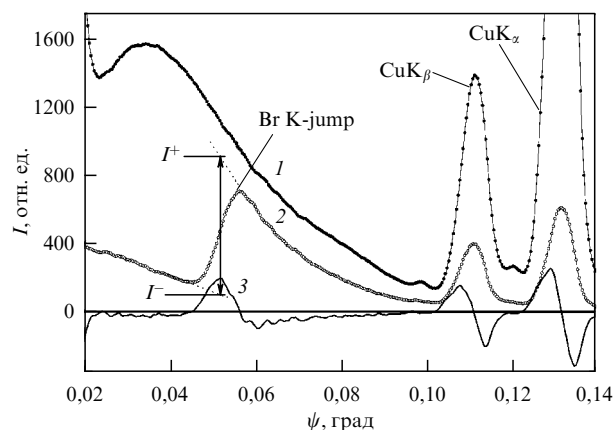


Рис. 39. Угловые зависимости интенсивности преломлённого излучения $I(\psi)$: 1 — до введения образца бромнафталина ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{Br}$); 2 — после введения; 3 — производная $dI/d\psi$ для зависимости 2 [98].

Призменная рефракционная спектроскопия наиболее перспективна для исследования быстрых импульсных процессов [100]. Для её эффективного применения в лабораторной практике необходимы яркие микрофокусные источники рентгеновского излучения.

Развитие рефракционной спектроскопии в целом и её разрешающая способность будут определяться технологическими возможностями, а именно совершенством поверхности призмы вблизи её вершины.

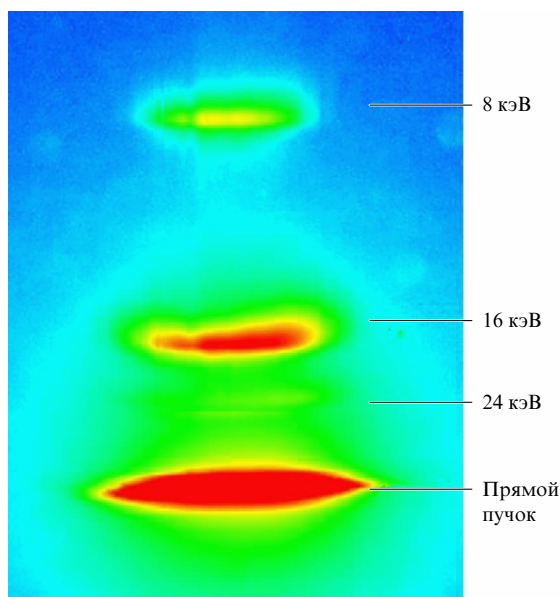


Рис. 40. Гармоники ондулятора синхротрона ESRF, полученные при разложении в спектр алмазной призмой [100].

9. Заключение

На первых этапах освоения того или иного спектрального диапазона спектроскопия как измерение длин волн и классификация переходов с определением уровней энергии являются самоцелью. Затем появляется возможность уточнения теоретических расчётов уровней энергии многозарядных ионов. Разумеется, это не исключает того, что существующие расчёты помогают при расшифровке экспериментальных спектров. Появляется возможность (и соблазн) использовать спектроскопические данные для определения физических условий в плазме. Безусловную ценность имеют доплеровское и штарковское уширение оптически тонких линий. Использование относительной спектральных линий для диагностики плазмы опирается на теоретические расчёты в рамках многоуровневых радиационно-столкновительных моделей, которые к тому же должны соотноситься с предположениями о физических условиях, таких как стационарность или нестационарность ионного состава, применимость квазистационарного приближения для заселённости возбуждённых состояний, и некоторых других. Наконец, спектроскопические методы активно используются при разработке новых рентгенооптических элементов, инструментов и источников в рентгеновском и ВУФ диапазонах спектра, а также при создании новых производственных технологий. Фиановские исследования в данной области проходили через все перечисленные стадии.

Оглядываясь на прошедшие десятилетия, можно с удовлетворением отметить, что в ФИАНе по обсуждаемой тематике были высказаны пионерские предложения и конструктивные идеи, которые впоследствии были успешно реализованы, в том числе и в зарубежных лабораториях. Речь идёт о рентгеновских лазерах на переходах многозарядных ионов в плазме, методах диагностики плазмы по линейчатым спектрам многозарядных ионов, проекционной рентгеновской литографии, аперийных многослойных зеркалах и оптико-спектральных приборах на их основе и ряде других.

Автор признателен И.А. Артюкову, С.А. Пикузу, А.Н. Рябцеву и А.Г. Турьянскому за содействие и полезные обсуждения.

Список литературы

1. Мандельштам С Л "Обзор работ по исследованию коротковолновой ультрафиолетовой радиации Солнца" *УФН* **46** 145 (1952)
2. Мандельштам С Л, Ефремов А И "Исследования коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца" *УФН* **63** 163 (1957)
3. Житник И А и др. "Изображение и спектр Солнца в области 9,5–200 Å" *Космические исследования* **5** 276 (1967); Zhitnik I A et al. "Observations of the Sun and its spectrum at 9.5–200 Å" *Cosmic Res.* **5** 237 (1967)
4. Zhitnik I A et al. "The X-ray photographs and the spectrum of the Sun in the region 9.5–200 Å" *Space Res.* **7** 1263 (1967)
5. Житник И А, Мандельштам С Л, Тиндо И П, Урнов А М "Новые наблюдательные данные о рентгеновских вспышках и активных областях на Солнце" *УФН* **145** 530 (1985); Zhitnik I A, Mandel'shtam S L, Tindo I P, Urnov A M "New observational data on x-ray flares and active regions on the sun" *Sov. Phys. Usp.* **28** 270 (1985)
6. Житник И А, Тиндо И П, Урнов А М "Исследования рентгеновского излучения Солнца в ФИАНе" *Труды ФИАН* **195** 3 (1989)
7. Мандельштам С Л "Поляризация излучения и спектр рентгеновских вспышек на Солнце" *УФН* **107** 156 (1972); Mandel'shtam S L "Polarization of the emission of x-ray flares on the sun and their spectra" *Sov. Phys. Usp.* **15** 351 (1972)
8. Мандельштам С Л, Кононов Э Я "Спектроскопия высокоионизованных атомов" *УФН* **117** 565 (1975); Mandel'shtam S L, Kononov E Ya "Spectroscopy of highly ionized atoms" *Sov. Phys. Usp.* **18** 921 (1975)
9. Житник И А, Кононов Э Я, Корнеев В В, Крутов В В, Мандельштам С Л, Урнов А М "Спектры рентгеновских вспышек на Солнце" *УФН* **128** 722 (1979); Zhitnik I A, Kononov E Ya, Korneev V V, Krutov V V, Mandel'shtam S L, Urnov A M "Spectra of solar x-ray flares" *Sov. Phys. Usp.* **22** 663 (1979)
10. Мандельштам С Л, Федосеев С П, Кононов Э Я, Лебедев С В "Лабораторное воспроизведение участка коротковолнового спектра Солнца" *Оптика и спектроскопия* **18** 923 (1965); Mandel'shtam S L, Fedoseev S P, Kononov E Ya, Lebedev S V "Laboratory reproduction of the short-wavelength portion of the solar spectrum" *Opt. Spectrosc.* **18** 522 (1965)
11. Кононов Э Я, Мандельштам С Л "Спектры многократно ионизованных атомов криптона" *Оптика и спектроскопия* **19** 145 (1965); Kononov E Ya, Mandel'shtam S L "Spectra of multiply ionized krypton atoms" *Opt. Spectrosc.* **19** 78 (1965)
12. Кононов Э Я "Спектры многократно ионизованных атомов серы S^{IX}, S^X в области 175–265 Å" *Оптика и спектроскопия* **20** 537 (1966); Kononov E Ya "Spectra of multiply ionized atoms of sulfur S^{IX}, S^X in the region 175–265 Å" *Opt. Spectrosc.* **20** 303 (1966)
13. Rjabtsev A N, Sukhodrev N K "The investigation of the photometric properties of U.V.-type plates in the vacuum ultra-violet region of the spectrum", in *XII Colloquium Spectroscopy Intern.* (London, 1965) p. 601
14. Рябцев А Н, Суходрев Н К "О зависимости коэффициента контрастности фотоматериалов в вакуумной УФ-области спектра от угла падения на эмульсионный слой" *Журн. прикладной спектроскопии* **8** (1) 148 (1968); Ryabtsev A N, Sukhodrev N K "Vacuum-UV contrast as a function of angle of incidence for photographic materials" *J. Appl. Spectrosc.* **8** 98 (1968)
15. Рябцев А Н, Суходрев Н К "Абсолютная калибровка фотослов в области спектра 460–1500 Å" *Журн. прикладной спектроскопии* **10** 834 (1969); Ryabtsev A N, Sukhodrev N K "Absolute calibration of photographic films in the 460–1500 Å region" *J. Appl. Spectrosc.* **10** 563 (1969)
16. Мовшев В Г, Рябцев А Н, Суходрев Н К "Влияние угла падения излучения на эмульсионный слой на коэффициент контрастности фотоматериалов в мягкой рентгеновской области спектра" *Журн. прикладной спектроскопии* **11** 558 (1969); Movshev V G, Ryabtsev A N, Sukhodrev N K "Effect of angle of incidence of radiation of emulsion layer on contrast factor or photographic materials in soft X-ray region of spectrum" *J. Appl. Spectrosc.* **11** 1128 (1969)
17. Мовшев В Г, Рябцев А Н, Суходрев Н К "Измерение чувствительности фотопленок УФ-2Т, УФ-Р и SC-5 в области 1,5–23,6 Å" *Журн. прикладной спектроскопии* **12** 274 (1970); Mov-

- shev V G, Ryabtsev A N, Sukhodrev N K "Measuring the sensitivity of photographic films UF-2T, UF-R, and SC-5 in the spectral range 1.5–23.6 Å" *J. Appl. Spectrosc.* **12** 212 (1970)
18. Рябцев А Н, Суходрев Н К "Исследование отступлений от закона взаимозаменяемости у фотослоев в вакуумной УФ-области спектра" *Журн. научной и прикладной фотографии и кинематографии* **15** 167 (1970)
 19. Ehler A W, Weissler G L "Vacuum ultraviolet radiation from plasmas formed by a laser on metal surfaces" *Appl. Phys. Lett.* **8** 89 (1966)
 20. Fawcett B C, Gabriel A H, Irons F E, Peacock N J, Saunders P A H "Extreme ultra-violet spectra from laser-produced plasmas" *Proc. Phys. Soc.* **88** 1051 (1966) <https://doi.org/10.1088/0370-1328/88/4/129>
 21. Басов Н Г, Бойко В А, Войнов Ю П, Кононов Э Я, Мандельштам С Л, Склизков Г В "Получение спектров многозарядных ионов при фокусировке излучения лазера на твердую мишень" *Письма в ЖЭТФ* **5** 177 (1967); Basov N G, Boiko V A, Voinov Yu P, Kononov E Ya, Mandel'shtam S L, Sklizkov G V "Production of spectra of multiply charged ions by focusing laser radiation on a solid target" *JETP Lett.* **5** 141 (1967)
 22. Басов Н Г, Бойко В А, Войнов Ю П, Кононов Э Я, Мандельштам С Л, Склизков Г В "Спектры ионов кальция Ca XV и Ca XVI, полученные при фокусировке на мишень лазерного излучения" *Письма в ЖЭТФ* **6** 849 (1967); Basov N G, Boiko V A, Voinov Yu P, Kononov E Ya, Mandel'shtam S L, Sklizkov G V "Spectra of calcium ions Ca XV and Ca XVI obtained by focusing laser emission on a target" *JETP Lett.* **6** 291 (1967)
 23. Вишняков Е А, Кузин С В, Перцов А А, Рагозин Е Н, Рева А А, Ульянов А А, Шестов С В "Спектральные характеристики элементов рентгеновской оптики в космическом эксперименте ТЕСИС", в сб. *Нанотехника и наноэлектроника. XIII Международный симпозиум, 16–20 марта 2009 г., Нижний Новгород* Т. 1 (Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2009) с. 184, стендовый доклад
 24. Ragozin E N, in *High Resolution X-Ray Spectroscopy of Cosmic Plasmas, 22–25 August 1988, Cambridge, MA* (Eds P Gorenstein, M Zombeck) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990) p. 380–383
 25. Peter Th, Ragozin E N, Urnov A M, Uskov D B, Rust D M "Doppler-shifted emission from helium ions accelerated in solar flares" *Astrophys. J.* **351** 317 (1990)
 26. Shestov S, Reva A, Kuzin S "Extreme ultraviolet spectra of solar flares from the extreme ultraviolet spectroheliograph SPIRIT onboard the CORONAS-F satellite" *Astrophys. J.* **780** 15 (2014) <https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/15>
 27. Аглицкий Е В, Бойко В А, Захаров С В, Склизков Г В "Определение профиля электронной плотности в лазерной плазме по шарковскому уширению спектральных линий", Препринт № 143 (М.: ФИАН, 1970)
 28. Аглицкий Е В, Бойко В А, Захаров С М, Склизков Г В, Федоров А Н "Наблюдение рентгеновских линий высокоионизованного железа в лазерной плазме" *Краткие сообщения по физике ФИАН* (12) 36 (1971)
 29. Аглицкий Е В, Бойко В А, Захаров С М, Пикуз С А, Фаенов А Я "Наблюдение в лазерной плазме и идентификация диэлектронных спутников спектральных линий водородо- и гелиеподобных ионов элементов в интервале Na... V" *Квантовая электроника* **1** 908 (1974); Aglitskii E V, Boiko V A, Zakharov S M, Pikuz S A, Faenov A Ya "Observation in laser plasmas and identification of dielectron satellites of spectral lines of hydrogen- and helium-like ions of elements in the Na–V range" *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 500 (1974)
 30. Boiko V A, Pikuz S A, Safronova A S, Faenov A Ya "X-ray spectra of Y XXXI and Mo XXXIV ions from laser-produced plasmas" *J. Phys. B* **11** L503 (1978)
 31. Boiko V A, Pikuz S A, Safronova U I, Faenov A Ya "Satellites to the He-like ion $1s^2 1S_0 - 1s3p^1 P_1$ lines with $Z = 12 - 19$ in laser plasmas" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **185** 789 (1978)
 32. Boiko V A, Pikuz S A, Faenov A Ya "The determination of laser plasma electron density by K spectra of multicharged ions" *J. Phys. B* **12** 1889 (1979)
 33. Перегудов Г В, Рагозин Е Н, Чирков В А "Светосильный фокусирующий рентгеновский спектрограф для исследования лазерной плазмы" *Квантовая электроника* **2** 1844 (1975); Peregudov G V, Ragozin E N, Chirkov V A "High-luminosity focusing x-ray spectrograph for laser plasma investigations" *Sov. J. Quantum Electron.* **5** 1012 (1975)
 34. Peregudov G V, Ragozin E N, Skobelev I Yu, Vinogradov A V, Yukov E A "Measurements of electron density in laser-produced plasmas from the XUV spectra of oxygen-like ions" *J. Phys. D* **11** 2305 (1978)
 35. Викторов Д С, Кузьмичева М Ю, Рагозин Е Н "Измерение электронной плотности в лазерной плазме по ВУФ-спектрам азотоподобных ионов" *Труды ФИАН* **195** 146 (1989)
 36. Перегудов Г В, Плоткин М Е, Рагозин Е Н "Диагностика лазерной плазмы по переходам серии Бальмера" *Квантовая электроника* **6** 2084 (1979); Peregudov G V, Plotkin M E, Ragozin E N "Laser plasma diagnostics using Balmer series transitions" *Sov. J. Quantum Electron.* **9** 1224 (1979)
 37. Перегудов Г В, Рагозин Е Н "Снимки лазерного факела в линейчатом излучении многозарядных ионов в далекой ВУФ-области спектра" *Письма в ЖЭТФ* **28** 27 (1978); Peregudov G V, Ragozin E N "Photographs of laser plume in line radiation of multiply charged ions in the far vacuum ultraviolet" *JETP Lett.* **28** 26 (1978)
 38. Рагозин Е Н "О значениях электронной плотности в лазерном факеле" *Квантовая электроника* **7** 868 (1980); Ragozin E N "Electron density in a laser jet" *Sov. J. Quantum Electron.* **10** 493 (1980)
 39. Рагозин Е Н, Сасоров П В "Модель стационарной короны лазерной плазмы с учетом эффекта дефлаграции на критической поверхности" *ЖЭТФ* **80** 1371 (1981); Ragozin E N, Sasorov P V "Model of stationary laser plasma corona with allowance for the effect of deflagration at the critical surface" *Sov. Phys. JETP* **53** 701 (1981)
 40. Перегудов Г В, Плоткин М Е, Рагозин Е Н "Исследование лазерного факела при фокусировке излучения на плоскую мишень с помощью эффекта обращения волнового фронта" *Квантовая электроника* **6** 2401 (1979); Peregudov G V, Plotkin M E, Ragozin E N "Use of the wave-front reversal effect to investigate a jet formed by focusing laser radiation on a plane target" *Sov. J. Quantum Electron.* **9** 1413 (1979)
 41. Илюхин А А, Перегудов Г В, Плоткин М Е, Рагозин Е Н, Чирков В А "Использование эффекта обращения волнового фронта при ВРМБ для фокусировки лазерного излучения на мишень" *Письма в ЖЭТФ* **29** 364 (1979); Ilyukhin A A, Peregudov G V, Plotkin M E, Ragozin E N, Chirkov V A "Focusing of a laser beam on a target using the effect of wave-front inversion (WFI) produced as a result of stimulated Mandel'shtam–Brillouin scattering (SMSB)" *JETP Lett.* **29** 328 (1979)
 42. Шевелько А П "Светосильный рентгеновский спектрограф с вертикальной фокусировкой для исследования лазерной плазмы" *Квантовая электроника* **4** 2013 (1977); Shevel'ko A P "High-luminosity x-ray spectrograph with vertical focusing for laser plasma studies" *Sov. J. Quantum Electron.* **7** 1149 (1977)
 43. Мазин М А, Шевелько А П "Спектры гелиеподобных ионов Ca XIX и Ti XXI в лазерной плазме" *Труды ФИАН* **179** 15 (1987)
 44. Shevelko A P, Kasyanov Yu S, Yakushev O F, Knight L V "Compact focusing von Hamos spectrometer for quantitative x-ray spectroscopy" *Rev. Sci. Instrum.* **73** 3458 (2002)
 45. Бибишкин М С, Казаков Е Д, Лучин В И, Салашченко Н Н, Чернов В В, Чхало Н И, Шевелько А П "Новые фокусирующие многослойные структуры для рентгеновской спектроскопии плазмы" *Квантовая электроника* **38** 169 (2008); Bibishkin M S, Kazakov E D, Luchin V I, Salashchenko N N, Chernov V V, Chkhalo N I, Shevelko A P "New focusing multilayer structures for X-ray plasma spectroscopy" *Sov. J. Quantum Electron.* **38** 169 (2008)
 46. Киркин А Н, Леонтович А М, Можаровский А М, Рагозин Е Н "Рентгеновский спектр магниевои плазмы, нагреваемой излучением пикосекундного рубинового лазера" *Квантовая электроника* **6** 2251 (1979); Kirkin A N, Leontovich A M, Mozharovskii A M, Ragozin E N "X-ray emission spectrum of a magnesium plasma heated by picosecond ruby laser pulses" *Sov. J. Quantum Electron.* **9** 1322 (1979)
 47. Жерихин А Н, Кошелев К Н, Летохов В С "Об усилении в области далекого вакуумного ультрафиолета на переходах многозарядных ионов" *Квантовая электроника* **3** 152 (1976); Zherikhin A N, Koshelev K N, Letokhov V S "Gain in the far vacuum ultraviolet region due to transitions in multiply charged ions" *Sov. J. Quantum Electron.* **6** 82 (1976)
 48. Виноградов А В, Собельман И И, Юков Е А "Об инверсии населенности на переходах неоподобных ионов" *Квантовая электроника* **4** 63 (1977); Vinogradov A V, Sobel'man I I, Yukov E A "Population inversion of transitions in neon-like ions" *Sov. J. Quantum Electron.* **7** 32 (1977)
 49. Matthews D L et al. "Demonstration of a soft X-ray amplifier" *Phys. Rev. Lett.* **54** 110 (1985)
 50. Garnir H P, Baudinet-Robinet Y, Dumont P D, Eidelsberg M "Study of S VII in the vacuum ultraviolet" *Phys. Scr.* **17** 463 (1978)

51. Kononov E Ya, Kramida A E, Podobedova L I, Ragozin E N, Chirkov V A "Analysis of the $3s-3p$ and $3p-3d$ transitions of S VII from laser plasma" *Phys. Scr.* **28** 496 (1983)
52. Ragozin E N, Churilov S S, Kononov E Ya, Ryabtsev A N, Zayikin Yu F "Additions to the $2p^3 3s$, $3p$ and $3d$ configurations in the neon-like ion Ca XI" *Phys. Scr.* **37** 742 (1988)
53. Гаязов Р Р, Крамида А Е, Подобедова Л И, Рагозин Е Н, Чирков В А "Экспериментальное исследование конфигураций $2p^3 3s$, $3p$ и $3d$ в ионах изоэлектронной последовательности Ne I" *Труды ФИАН* **179** 60 (1987)
54. Вайнштейн Л А, Сафронова У И "Длины волн и вероятности переходов для ионов изоэлектронных последовательностей He, Li, Ne", в сб. *Спектроскопические константы атомов* (М.: Научный совет АН СССР по спектроскопии, 1977) с. 5–122
55. Bureeva L A, Safronova U I "Calculated lifetimes in the neon isoelectronic sequence" *Phys. Scr.* **20** 81 (1979)
56. Pikuz S A, Bryunetkin B A, Ivanov G V, Mingaleev A R, Romanova V M, Skobelev I Yu, Faenov A Ya, Khakhalin S Ya, Shelkovenko T A "Radiative properties of hot dense X-pinch" *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **51** 291 (1994)
57. Faenov A Ya, Hammer D A, Nilsen J, Osterheld A, Pikuz S A, Pikuz T A, Romanova V M, Shelkovenko T, Skobelev I Yu "Transitions from Na-like and Mg-like autoionizing levels of multicharged molybdenum ions in an X-pinch plasma" *Phys. Scr.* **51** 454 (1995)
58. Abdallah J, Faenov A Ya, Hammer D, Pikuz S A, Csanok G, Clark R E H "Electron beam effects on the spectroscopy of satellite lines in aluminum X-pinch experiments" *Phys. Scr.* **53** 705 (1996)
59. Osterheld A L, Magunov A I, Dyakin V M, Faenov A Ya, Pikuz T A, Skobelev I Yu, Pisarczyk T, Parys P, Wolowski J, Makowski J, Pikuz S A, Romanova V M, Shelkovenko T A "Measurements of the ground-state ionization energy and wavelengths for the $1s^{21}S_0-1snp^1P_1$ ($n = 6-12$) lines of Al XII" *Phys. Rev. A* **54** 3971 (1996)
60. Shelkovenko T A, Sinars D B, Pikuz S A, Hammer D A "Radiographic and spectroscopic studies of X-pinch plasma implosion dynamics and x-ray burst emission characteristics" *Phys. Plasmas* **8** 1305 (2001)
61. Shelkovenko T A, Pikuz S A, Tilikin I N, Elshafey A, Hammer D A "Time-resolved investigation of subnanosecond radiation from Al wire hybrid X pinches" *Phys. Rev. E* **102** 063208 (2020)
62. Виноградов А В, Зельдович Б Я "О многослойных зеркалах для рентгеновского и далекого ультрафиолетового излучения" *Оптика и спектроскопия* **42** 709 (1977); Vinogradov A V, Zeldovich B Ya "Multilayer mirrors for x-ray and far-ultraviolet radiation" *Opt. Spectrosc.* **42** 404 (1977)
63. Виноградов А В, Зорев Н Н "Проекционная рентгеновская литография", Препринт № 104 (М.: ФИАН, 1987)
64. Виноградов А В, Зорев Н Н "О возможности реализации проекционной рентгеновской литографии" *ДАН СССР* **302** 82 (1988); Vinogradov A V, Zorev N N "Possible realization of projection x-ray lithography" *Sov. Phys. Dokl.* **33** 682 (1988)
65. Житник И А, Кузин С В, Митропольский М М, Рагозин Е Н, Слемзин В А, Сухановский В А "Исследование характеристик многослойных рентгеновских зеркал для диапазона $\lambda \approx 19$ нм с помощью лазерно-плазменного источника" *Квантовая электроника* **20** 89 (1993); Zhitnik I A, Kuzin S V, Mitropol'skii M M, Ragozin E N, Slemzin V A, Sukhanovskii V A "Characterization of multilayer x-ray mirrors for the $\lambda \approx 19$ nm range using a laser-plasma radiation source" *Quantum Electron.* **23** 76 (1993)
66. Колачевский Н Н, Кондратенко В В, Митропольский М М, Рагозин Е Н, Федоренко А И, Юлин С А "Исследование отображающих многослойных Mo-Si-зеркал на $\lambda_0 \approx 135$ Å с использованием лазер-плазменного источника МР-излучения" *Краткие сообщения по физике ФИАН* (7–8) 51 (1992)
67. Ragozin E N, Kolachevsky N N, Mitropolsky M M, Slemzin V A, Salashchenko N N "Characterization of imaging normal-incidence multilayer mirrors for the 40- to 300-Å range by spectroscopic techniques using a laser-plasma radiation source" *Proc. SPIE* **2012** 209 (1993)
68. Akhsakhalyan A D, Kolachevsky N N, Mitropolsky M M, Ragozin E N, Salashchenko N N, Slemzin V A "Fabrication and investigation of imaging normal-incidence multilayer mirrors with a narrow-band reflection in the range $\lambda \approx 4.5$ nm" *Phys. Scr.* **48** 516 (1993)
69. Колачевский Н Н, Митропольский М М, Рагозин Е Н, Слемзин В А, Уварова Н В "Регистрация квазимонохроматических изображений с субсекундным угловым разрешением в МР-диапазоне спектра при помощи фотоплёнки высокого разрешения" *Краткие сообщения по физике ФИАН* (5–6) 56 (1994)
70. Slemzin V A, Zhitnik I A, Ragozin E N, Andreev E A, Salashchenko N N, Platonov Ju Ya "Aspherical imaging multilayer mirrors with subarcsecond resolution for solar XUV telescopes" *Proc. SPIE* **2279** 234 (1994)
71. Ragozin E N, Kolachevsky N N, Mitropolsky M M, Fedorenko A I, Kondratenko V V, Yulin S A "Stigmatic high-resolution high-throughput narrow-band diffraction spectrograph employing X-ray multilayer mirrors" *Phys. Scr.* **47** 495 (1993)
72. Ragozin E N, Kolachevsky N N, Mitropolsky M M, Pokrovsky Yu Yu, Fedorenko A I, Kondratenko V V, Yulin S A "Stigmatic high-resolution high-throughput XUV spectroscopic instruments employing unconventional optical components" *Proc. SPIE* **2520** 297 (1995)
73. Бейгман И Л, Покровский Ю Ю, Рагозин Е Н "Наблюдение штарковского сдвига в лазерной плазме с помощью стигматического светосильного рентгеновского спектрографа высокого разрешения" *ЖЭТФ* **110** 1783 (1996); Beigman I L, Pokrovskii Yu Yu, Ragozin E N *J. Exp. Theor. Phys.* **83** 981 (1996)
74. Колачевский Н Н, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Широкополосный стигматический спектрограф для мягкого рентгеновского диапазона" *Квантовая электроника* **25** 843 (1998); Kolachevsky N N, Pirozhkov A S, Ragozin E N "Broad-band stigmatic spectrograph for the soft x-ray range" *Quantum Electron.* **28** 821 (1998)
75. Колачевский Н Н, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Широкополосные рентгенооптические элементы на основе аперiodических многослойных структур" *Квантовая электроника* **30** 428 (2000); Kolachevsky N N, Pirozhkov A S, Ragozin E N "Broadband x-ray optical elements based on aperiodic multilayer structures" *Quantum Electron.* **30** 428 (2000)
76. Бейгман И Л, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Отражение атто- и фемтосекундных импульсов рентгеновского излучения от аперiodического многослойного зеркала" *Письма в ЖЭТФ* **74** 167 (2001); Beigman I L, Pirozhkov A S, Ragozin E N "Reflection of atto- and femtosecond X-ray pulses from aperiodic multilayer mirror" *JETP Lett.* **74** 149 (2001)
77. Beigman I L, Pirozhkov A S, Ragozin E N "Reflection of few-cycle x-ray pulses by aperiodic multilayer structures" *J. Opt. A* **4** 433 (2002)
78. Пирожков А С, Рагозин Е Н "Аперiodические многослойные структуры в оптике мягкого рентгеновского излучения" *УФН* **185** 1203 (2015); Pirozhkov A S, Ragozin E N "Aperiodic multilayer structures in soft X-ray optics" *Phys. Usp.* **58** 1095 (2015)
79. Кондратенко В В, Левашов В Е, Першин Ю П, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Аперiodические широкополосные многослойные зеркала на область 125–250 Å" *Краткие сообщения по физике ФИАН* (7) 32 (2001)
80. Вишняков Е А, Каменец Ф Ф, Кондратенко В В, Лугинин М С, Панченко А В, Першин Ю П, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Аперiodические многослойные структуры в оптике мягкого рентгеновского излучения" *Квантовая электроника* **42** 143 (2012); Vishnyakov E A, Kamenets F F, Kondratenko V V, Luginin M S, Panchenko A V, Pershin Yu P, Pirozhkov A S, Ragozin E N *Quantum Electron.* **42** 143 (2012)
81. Капралов В Г, Корде Р, Левашов В Е, Пирожков А С, Рагозин Е Н "Безосколочный источник мягкого рентгеновского излучения на основе импульсной струи ксенона, возбуждаемый излучением неодимового лазера" *Квантовая электроника* **32** 149 (2002); Kapralov V G, Korde R, Levashov V E, Pirozhkov A S, Ragozin E N *Quantum Electron.* **32** 149 (2002)
82. Бейгман И Л, Левашов В Е, Медников К Н, Пирожков А С, Рагозин Е Н, Толстихина И Ю "Перезарядка многозарядных ионов лазерной плазмы на атомах струи благородного газа" *Квантовая электроника* **37** 1060 (2007); Beigman I L, Levashov V E, Mednikov K N, Pirozhkov A S, Ragozin E N, Tolstikhina I Yu *Quantum Electron.* **37** 1060 (2007)
83. Kando M, Pirozhkov A S, Kawase K, Esirkepov T Zh, Fukuda Y, Kiriya H, Okada H, Daito I, Kameshima T, Hayashi Y, Kotaki H, Mori M, Koga J K, Daido H, Faenov A Ya, Pikuz T, Ma J, Chen M-L, Ragozin E N, Kawachi T, Kato Y, Tajima T, Bulanov S V "Enhancement of photon number reflected by the relativistic flying mirror" *Phys. Rev. Lett.* **103** 235003 (2009)
84. Рагозин Е Н, Вишняков Е А, Колесников А О, Пирожков А С, Шатохин А Н "Спектрометры для мягкого рентгеновского диапазона на основе аперiodических отражательных решёток и их применение" *УФН* **191** 522 (2021); Ragozin E N, Vishnyakov E A, Kolesnikov A O, Pirozhkov A S, Shatokhin A N "Soft X-ray spectrometers based on aperiodic reflection gratings and their application" *Phys. Usp.* **64** 495 (2021)

85. Рагозин Е Н, Вишняков Е А, Колесников А О, Пирожков А С, Шатохин А Н *Апериодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона* (М.: Физматлит, 2018)
86. Shatokhin A N, Kolesnikov A O, Sasorov P V, Vishnyakov E A, Ragozin E N "High-resolution stigmatic spectrograph for a wavelength range of 12.5–30 nm" *Opt. Express* **26** 19009 (2018)
87. Barysheva M M, Garakhin S A, Kolesnikov A O, Pirozhkov A S, Polkovnikov V N, Ragozin E N, Shatokhin A N, Smertin R M, Svechnikov M V, Vishnyakov E A "Broadband normal-incidence mirrors for a range of 111–138 Å based on an a-periodic Mo/Be multilayer structure" *Opt. Mater. Express* **11** 3038 (2021)
88. Шатохин А Н, Колесников А О, Михайлов В Н, Ратушный В П, Соловьев А А, Шатохин А Н "Изображающий спектрограф высокого разрешения для ультрамягкого рентгеновского диапазона" *Квантовая электроника* **52** 838 (2022); Shatokhin A N, Kolesnikov A O, Mikhailov V N, Ratushnyi V P, Ragozin E N "High-resolution imaging spectrograph for the ultrasoft X-ray range" *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **50** (Suppl. 1) S78 (2023) <https://doi.org/10.3103/S1068335623130134>
89. Колесников А О, Михайлов В Н, Рагозин Е Н, Ратушный В П, Соловьев А А, Шатохин А Н "Создание плоских и вогнутых решеток с переменным шагом для вакуумной области спектра методом интерференционной литографии и их применение" *Оптический журн.* **90** (3) 48 (2023) <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-48-59>; Kolesnikov A O, Mikhailov V N, Ragozin E N, Ratushnyi V P, Soloviev A A, Shatokhin A N "Fabrication and application of plane and concave varied line-space gratings for the vacuum spectral domain by interference lithography" *J. Opt. Technol.* **90** (3) 131 (2023) <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000131>
90. Kolesnikov A O, Shatokhin A N, Vishnyakov E A, Ragozin E N "Broadband high-resolution stigmatic spectral imaging in the XUV range" *J. Russ. Laser Res.* **44** 480 (2023)
91. Колесников А О, Вишняков Е А, Шатохин А Н, Рагозин Е Н "VLS-спектрометр с плоским полем на область длин волн 50–275 Å" *Квантовая электроника* **49** 1054 (2019); Kolesnikov A O, Vishnyakov E A, Shatokhin A N, Ragozin E N "Flat-field VLS spectrometer for a wavelength range of 50–275 Å" *Quantum Electron.* **49** 1054 (2019)
92. Зорина М В, Гарахин С А, Колесников А О, Рагозин Е Н, Соловьев А А, Шатохин А Н "Транспортальный спектрограф с плоским полем для мягкого рентгеновского диапазона" *Квантовая электроника* **54** (1) 58 (2024)
93. Шатохин А Н, Вишняков Е А, Колесников А О, Рагозин Е Н "Сканирующий спектрометр/монокроматор на область длин волн 50–330 Å" *Квантовая электроника* **49** 779 (2019); Shatokhin A N, Vishnyakov E A, Kolesnikov A O, Ragozin E N "Scanning spectrometer/monochromator for a wavelength range of 50–330 Å" *Quantum Electron.* **49** 779 (2019)
94. Kolesnikov A, Vishnyakov E, Shatokhin A, Ragozin E "Conception of a single-component broadband high-resolution plane-VLS-grating monochromator" *Appl. Opt.* **61** 5334 (2022)
95. Колесников А О, Рагозин Е Н, Шатохин А Н "Компактные монокроматоры высокого разрешения на область длин волн 110–160 Å" *Квантовая электроника* **53** 672 (2023); Kolesnikov A, Ragozin E, Shatokhin A "Compact high-resolution monochromators for the wavelength range of 110–160 Å" *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **50** (Suppl. 12) S1398 (2023)
96. Турьянский А Г, Пиршин И В, Хмельницкий Р А, Гиппиус А А "Определение рентгеновского спектра по угловой дисперсии излучения в алмазной призме" *Письма в ЖЭТФ* **73** 517 (2001); Tur'yanskii A G, Pirshin I V, Khmel'nitskii R A, Gippius A A "X-ray spectrum determination from the angular dispersion of radiation in a diamond prism" *JETP Lett.* **73** 457 (2001)
97. Турьянский А Г, Пиршин И В, Хмельницкий Р А, Гиппиус А А "Дисперсионные характеристики алмаза в жестком рентгеновском диапазоне длин волн" *Физика твердого тела* **43** 619 (2001); Tour'yanskii A G, Pirshin I V, Khmel'nitskii R A, Gippius A A *Phys. Solid State* **43** 644 (2001)
98. Турьянский А Г, Пиршин И В, Белянский Д В "Измерение рентгеновских спектров поглощения методом призмной спектрометрии" *Письма в ЖЭТФ* **79** 504 (2004); Tur'yanskii A G, Pirshin I V "Measurements of X-ray absorption spectra by the prism spectroscopy method" *JETP Lett.* **79** 399 (2004)
99. Турьянский А Г, Гижа С С, Коновалов О В "Быстрая и ультрабыстрая энергодисперсионная рентгеновская рефлектометрия на основе призмной оптики" *Письма в ЖЭТФ* **106** 789 (2017); Tur'yanskii A G, Gizha S S, Konovalov O V "Fast and ultrafast energy-dispersive X-ray reflectometry based on prism optics" *JETP Lett.* **106** 828 (2017)
100. Гижа С С "Анализ и фильтрация рентгеновских спектров с помощью призмной алмазной оптики и мозаичных кристаллов", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М: ФИАН, 2018)

X-ray and vacuum ultraviolet spectroscopy at Lebedev Physical Institute (LPI)

E.N. Ragozin

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: ragozinen@lebedev.ru

The last third of the 20th century was marked by the rapid development of X-ray and vacuum ultraviolet (VUV) spectroscopy of multiply charged ions. At Lebedev Physical Institute (LPI) this research commenced as studies of X-ray solar radiation and radiation of multiply charged ions in laser-produced plasma. Subsequently, they were supplemented by the study of fast electric discharges and work on X-ray/VUV optics. The formulation of many studies was also motivated by the need for spectroscopic diagnostics of high-temperature plasma and the possibility of developing lasers in the soft X-ray (SXR) range based on transitions of multiply charged ions. The methods of SXR/VUV spectroscopy have found application in the development of new X-ray optical elements and diffraction spectrometer systems. The review notes the main participants in these studies and the main milestones in the development of spectroscopic research at the LPI in the vacuum region of the spectrum, starting from the mid-1960s, and briefly considers the development of the experimental technique used. The review does not claim to be complete, and the selection of cited materials reflects the scientific interests of the author.

Keywords: vacuum spectroscopy, X-ray solar radiation, laser plasma, multiply charged ions, vacuum spectrometers, X-pinch, X-ray optics, multilayer mirrors, VLS grating, X-ray projection lithography, X-ray prism spectrographs

PACS numbers: **01.65.+g**, **07.60.-j**, **07.85.Nc**

Bibliography — 100 references

Received 3 May 2023, revised 3 July 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (8) 881–898 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (8) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.07.039501>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.07.039501>