Изображающий спектрограф высокого разрешения для ультрамягкого рентгеновского диапазона*

А.Н.Шатохин, А.О.Колесников, В.Н.Михайлов, В.П.Ратушный, Е.Н.Рагозин

Создан и испытан в эксперименте изображающий (стигматический) спектрограф, в состав которого входит плоская VLS-решетка скользящего падения и фокусирующее широкополосное многослойное зеркало нормального падения (Mo/Be, 111–138 Å; Mo/Si, 125–250 Å), определяющее рабочий спектральный диапазон. Получены линейчатые спектры излучения многозарядных ионов, возбуждаемых в лазерной плазме. Спектральная разрешающая способность и пространственное разрешение прибора ограничивались размером ячеек (13 мкм) используемого детектора и составляли $\sim 10^3$ *и 26 мкм соответственно. Стигматизм прибора позволяет использовать его для спектральной диагностики плазмы с высоким пространственным разрешением. Габариты прибора около 1 м.*

Ключевые слова: *изображающий спектрограф, ультрамягкий рентгеновский диапазон, VLS-решетка, многослойное Mo/Be-зеркало, многослойное Mo/Si-зеркало, лазерная плазма.*

1. Введение

При исследовании лабораторных источников излучения (лазерная плазма, в том числе релятивистская [2], быстрые электрические разряды и др.) возникает необходимость регистрации линейчатых спектров с пространственным разрешением, а в более общем случае – спектральных изображений в варианте бесщелевого спектрографа. Такая задача лучше всего решается с помощью изображающего (стигматического) спектрографа, который может быть реализован, в частности, при использовании многослойных зеркал (МЗ) нормального падения (в том числе широкополосных [3–7]) в комбинации с плоской VLS-решеткой [8, 9] или, если не требуется высокая ($\sim 10^3$) разрешающая способность прибора, со свободно висящей пропускающей дифракционной решеткой [10].

М.Хеттрик и С.Бойер [11] предложили получать стигматическое спектральное изображение в ультрамягком рентгеновском (УМР) диапазоне, направляя сходящийся гомоцентрический пучок на плоскую решетку с переменным шагом (VLS-решетку, Varied Line-Space grating). При этом ее локальная плотность линий должна подчиняться локальному уравнению решетки, описывающему приход дифрагированных лучей в главной плоскости в общий спектральный (горизонтальный) фокус, совпадающий с вертикальным. Однако в этом случае стигматическое условие выполняется только на одной длине волны, λ_1, так что астигматизм схемы быстро возрастает при удалении длины волны от λ_1. При направлении на VLS-решетку слабоастигматического пучка появляется возможность выполнить условие стигматизма одновременно на двух длинах волн – λ_1 и λ_2 [8, 9]. При надлежащем выборе λ_1 и λ_2 можно добиться практического стигматизма в достаточно широком спектральном диапазоне. Термин «практический стигматизм» в данном случае означает, что астигматическое размытие изображения точечного монохроматического источника не превышает размер ячейки детектора. В настоящей работе излучение регистрировалось при помощи матричного ПЗС-детектора с обратной засветкой (2048 × 1024, квадратные ячейки размером по 13 мкм, длина чувствительной области 27 мм).

В нашем распоряжении были два широкополосных МЗ нормального падения, нанесенных на вогнутые сферические подложки (радиусом R = 1 м и толщиной D = 50 мм). Первое МЗ (Mo/Si) синтезировано в НТУ «ХПИ» (Харьков); его структура была оптимизирована на максимальное равномерное отражение в диапазоне 125 – 250 Å. Рабочий диапазон длин волн Mo/Si-зеркал ограничен снизу L-краем поглощения в кремнии (125 Å). Многослойные Mo/Be-зеркала [6, 7] были недавно синтезированы по нашей просьбе в ИФМ РАН (Н.Новгород); они обеспечивали равномерное отражение на уровне около 14% в диапазоне 111–138 Å (рис.1). Эти зеркала расширяют возможный рабочий диапазон спектрографа до длины волны K-края бериллия (111 Å).

Настоящая работа посвящена спектрографам, использующим оба типа фокусирующих МЗ, и демонстрации их возможностей при регистрации линейчатых спектров излучения многозарядных ионов, возбуждаемого в лазерной плазме. Полосы отражения этих МЗ определяют рабочий спектральный диапазон спектрографов.

В качестве диспергирующих элементов использовались две плоских VLS-решетки: первая (решетка 1) была

*Термин ультрамягкое рентгеновское (УМР) излучение принадлежит А.П.Лукирскому, который относил его к излучению с длинами волн в диапазоне 15–500 Å [1].

А.Н.Шатохин, А.О.Колесников. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53
В.Н.Михайлов, В.П.Ратушный. ООО ХолоГрэйт, Россия, 190013 С.-Петербург, Московский просп., 22 Л, помещ. 37-Н
Е.Н.Рагозин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: enragozin@gmail.com

Поступила в редакцию 4 июля 2022 г.

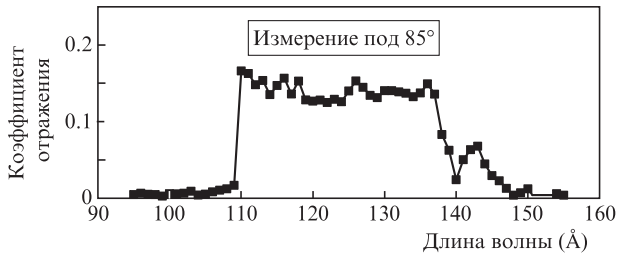

Рис.1. Спектральная зависимость коэффициента отражения одного из апериодических Mo/Be-зеркал при угле падения излучения 5° от нормали (измерение выполнено в ИФМ РАН).

изготовлена в НПО ГИПО (Казань) методом интерференционной литографии на длине волны 0.53 мкм, вторая (решетка 2) изготовлена тем же методом в ООО ХолоГрэйт (С.-Петербург) на длине волны 0.488 мкм. В обоих случаях интерференционные схемы записи состояли из двух плеч, каждое из которых начинается точечным источником и заканчивается подложкой, где записывается рисунок решетки. Для создания необходимой зависимости частоты интерференционных полос от координаты на заготовке решетки в одно из плеч вносится вспомогательный элемент – аберратор, функция которого состоит во внесении контролируемых аберраций в изначально гомоцентрический пучок.

В схеме записи решетки 1 в качестве аберратора выступала призма, а параметры схемы записи выбирались путем подбора. С этим связано заметное отличие полученного коэффициента p_1, определяющего фокусирующие свойства решетки, от проектного, что потребовало определенного изменения схемы спектрографа. В схеме записи решетки 2 в качестве аберратора применялось вогнутое зеркало. Для этой решетки схема записи была предварительно рассчитана в ФИАНе с использованием аналитических и численных методов [12], в результате чего коэффициент p_1 оказался значительно ближе к проектному значению. Подложки для решеток и сферическое зеркало-аберратор (R = 1 м) изготавливались из кварцевого стекла КУ1 в ООО СОТВЕКС (Москва). Обе решетки обладают квазисинусоидальным профилем штрихов, отражающим покрытием служит золото.

Первое испытание схемы спектрографа было проведено нами ранее [13] с использованием Mo/Si-зеркала и VLS-решетки, изготовленной методом электронно-лучевой литографии. К сожалению, точность позиционирования столика в использованной электронно-лучевой установке была недостаточной (имела место недостаточно точная «сшивка» (stitching) полей экспонирования). Вследствие этого спектральное разрешение спектрографа оказалось ниже возможного при использовании детектора с ячейками размером 13 мкм.

2. Схема стигматического (изображающего) спектрометра

Горизонтальной плоскостью будем называть такую плоскость, в которой находятся нормали к зеркалу, решетке и детектору; вертикальное направление перпендикулярно горизонтальной плоскости. При этом входная щель и штрихи решетки ориентированы в вертикальной плоскости.

Основная идея (концепция) спектрометра и метод его расчета описаны в работе [8]. Принципиальная схема

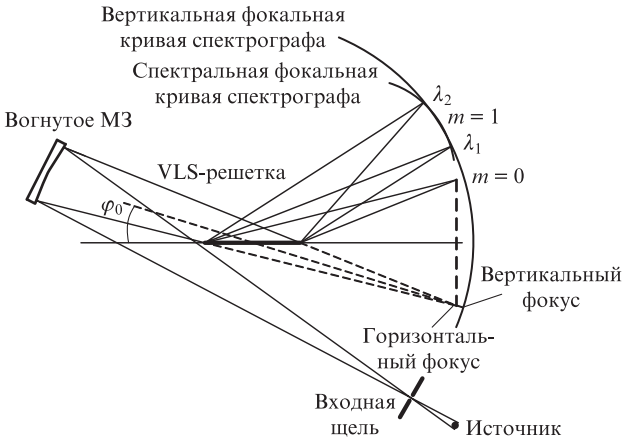

Рис.2. Схема, поясняющая работу спектрографа.

прибора показана на рис.2. Надпись «Горизонтальный фокус» показывает положение горизонтального фокуса в изображении щели, создаваемом МЗ. Надпись «Вертикальный фокус» указывает на положение вертикального фокуса в изображении источника, создаваемом МЗ. Вертикальная фокальная кривая спектрографа представляет собой окружность с центром, лежащим в центре VLS-решетки, и радиусом, равным расстоянию от центра решетки до положения вертикального фокуса. Спектральная фокальная кривая пересекается с вертикальной на выбранных длинах волн λ_1 и λ_2. Чувствительная (плоская) поверхность детектора располагается на прямой, соединяющей две точки, обозначенные на рисунке как λ_1 и λ_2. При этом на детектор отображается горизонтальный (спектральный) фокус входной щели и вертикальный фокус источника (лазерной плазмы). Плоскость лазерной мишени горизонтальна. Таким образом, в эксперименте регистрировался спектр с однокоординатным пространственным разрешением вдоль нормали к мишени.

Частоту линий VLS-решетки удобно описывать полиномом $p(w) = p_0 + p_1 w + p_2 w^2 + p_3 w^3 + \ldots$, где w – координата на апертуре решетки в направлении поперек штриха, т. е. в горизонтальной плоскости. В центре VLS-решетки $w = 0$. Здесь p_0 отвечает за направление дифрагированного пучка, p_1 – за фокусирующие свойства решетки, p_2 и p_3 – за модификацию комы и сферической аберрации соответственно. Среди коэффициентов p_i важнейшими являются p_0 и p_1, поскольку именно они определяют геометрию схемы. В табл.1 представлены расчетные (проектные) значения коэффициентов p_i, а также реальные значения p_i обеих решеток, измеренные по дифракции излучения He–Ne-лазера (6328 Å).

Первоначальный вариант спектрометра рассчитывался для использования с широкополосным Mo/Si-зеркалом в диапазоне 125–250 Å; его параметры приведены в

Табл.1. Проектные и измеренные значения коэффициентов p_i VLS-решеток.

Коэффициент	Проектные значения	Измеренные значения	
		решетка 1	решетка 2
p_0 (мм$^{-1}$)	600	600	600
p_1 (мм$^{-2}$)	2.37	2.18	2.28
p_2 (мм$^{-3}$)	1.78×10^{-3}	4.86×10^{-3}	7.16×10^{-3}
p_3 (мм$^{-4}$)	4.25×10^{-5}	1.75×10^{-5}	3.91×10^{-5}

Табл.2. Параметры изображающего спектрографа с фокусирующими зеркалами Mo/Si и Mo/Be и двумя VLS-решетками.

Параметры спектрографа	Схема 1	Схема 2	Схема 3
	Mo/Si	Mo/Be	Mo/Be
Угол падения на зеркало, отсчитываемый от нормали (°)	7.59	7.59	7.59
Расстояние источник – щель (мм)	30.0	30.2	30.2
Длина волны стигматизма λ_1 (Å)	144	117	128
Длина волны стигматизма λ_2 (Å)	272	133	144
Скользящий угол падения на решетку φ_0 (°)	6.44	4.35	4.35
Скользящий угол дифракции на длине волны λ_1 (°)	9.92	8.07	8.07
Расстояние зеркало – решетка (мм)	461.2	449.2	462.9
Расстояние горизонтальный фокус зеркала – решетка (мм)	535.5	547.2	520.8
Расстояние вертикальный фокус зеркала – решетка (мм)	530.0	541.9	514.9
Расстояние зеркало – щель (мм)	991.2	991.2	1005.4
Коэффициент решетки p_1 (мм$^{-2}$)	2.18	2.18	2.28
Средняя обратная линейная дисперсия (Å/мм)	5.35	4.42	4.65
Разрешающая способность $\lambda/\delta\lambda$	1000	900	900

табл.2 (схема 1). При этом достигалось пересечение обеих фокальных кривых на длинах волн 144 и 275 Å и практический стигматизм в диапазоне 125 – 250 Å. В дальнейшем осуществлялись незначительные изменения расстояний и углов с учетом особенностей VLS-решеток, а также с учетом спектрального диапазона Mo/Be-зеркала.

Переход в более коротковолновую часть спектра с использованием той же решетки позволяет снова достигнуть стигматизма уже в новом спектральном диапазоне, но требует изменения геометрии прибора. Так, при изменении расстояния зеркало – решетка, изменении углов падения на VLS-решетку и при помещении детектора в новый фокус можно добиться строгой фокусировки на длинах волн 117 и 133 Å. При этом блок мишени, входная щель и зеркало остаются на прежних местах. Новые параметры спектрометра приведены в табл.2 (схема 2).

Поскольку из-за отличия параметра p_1 законы изменения частоты штрихов решеток 1 и 2 различаются, то фокусирующие свойства решетки меняются, и необходимо небольшое изменение схемы спектрометра при замене одной решетки на другую, которое заключается лишь в небольших сдвигах фокусирующего зеркала и детектора (схема 3).

При использовании матричного детектора предельное практическое спектральное разрешение определяется размером ячеек и численно равно произведению обратной линейной дисперсии и удвоенного размера ячейки. Как показано ниже, этот предел достигнут при данной реализации VLS-спектрографа.

3. Эксперимент

Для проведения экспериментов спектрограф помещался в вакуумную камеру длиной 3.8 м и диаметром 0.9 м, откачиваемую до давления 5×10^{-5} Тор. Лазерная плазма создавалась при фокусировке импульса излучения неодимового лазера (энергия на мишени 0.5 Дж, длительность 10 нс) на плоскую вращающуюся мишень, поверхность которой лежала в главной плоскости спектрографа. Прибор обладал как спектральным, так и пространственным разрешением, давая зависимость интенсивности спектральных линий от расстояния до мишени (до границы света и тени).

Для обеспечения хорошей фокусировки решетка помещалась на прецизионный моторизованный поворотный столик, а детектор располагался на прецизионном столике-трансляторе. Окончательная юстировка спектрографа проводилась при регистрации спектров многозарядных ионов в вакууме. При этом моторизованные столики управлялись с компьютера, на экран которого выводилось регистрируемое спектральное изображение.

Спектры, полученные при использовании решеток 1 и 2, обладали высоким качеством, что позволило реализовать предельное практическое разрешение, обусловленное размером ячеек ПЗС-детектора.

На рис.3 вверху представлен спектр плазмы, полученный за одну лазерную вспышку при облучении мишени LiF; в нижней части показана запись спектра, сделанная выше границы света и тени. В рабочий спектральный диапазон прибора с МЗ Mo/Be попадают линии ионов Li III, F VI и F VII. Видно, что прибор обладает высокой светосилой, это вызывает насыщение детектора в отдельных спектральных линиях (свыше 46000 отсчетов в ячейке). Обращает на себя внимание ряд тонких эффектов, наблюдать которые стало возможным благодаря наличию одновременно высокого спектрального и пространственного разрешения. Во-первых, это резкая граница света и тени, соответствующая поверхности мишени. Во-вторых, вблизи мишени линия 113.90 Å испытывает штарковское уширение, зависящее от расстояния до мишени. Наконец, вблизи мишени, как и следовало ожидать, наблюдается самообращение оптически толстой резонансной линии иона Li III (135 Å), обусловленной переходом 2p → 1s. Интересно, что самая коротковолновая наблюдаемая линия (109.04 Å) лежит за L-краем бериллия. Самая длинноволновая линия (146.7 Å) наблюдается благодаря побочному максимуму отражения Mo/Be-зеркала (см. рис.1).

На рис.4 представлен спектр магниевой плазмы в диапазоне 125 – 250 Å, зарегистрированный с зеркалом Mo/Si также за одну лазерную вспышку. В спектре наблюдаются линии ионов магния (Mg III – Mg V) и ионов кислорода O V. Интенсивности линий ионов Mg III максимальны на расстоянии около 1 мм от мишени в отличие от ионов магния более высокой кратности. Граница света и тени резкая; при коэффициенте увеличения около единицы переход от тени к свету занимает одну-две ячейки детектора.

На рис.5 показана гистограмма отсчетов детектора вблизи линий 127.65 и 127.80 Å иона F VII. Линии уверенно разрешаются, провал между ними составляет ~20% от их интенсивности. Спектральный интервал между линиями отвечает разрешающей способности $\lambda/\delta\lambda \approx 850$.

На рис.6 показана линия H_β серии Бальмера иона C VI (135 Å), отвечающая переходу 4 → 2 (материал мишени – полиэтилен). Линия испытывает штарковское уширение [14], и ее ширина увеличивается при приближении к мишени. Ширина линии по полувысоте, усредненная по высоте над мишенью в диапазоне 0 – 39 мкм (вертикальный биннинг по трем ячейкам детектора) составила 0.53 Å, причем наблюдаемое уширение не связано с переполнением ячеек детектора. В предположении статистически

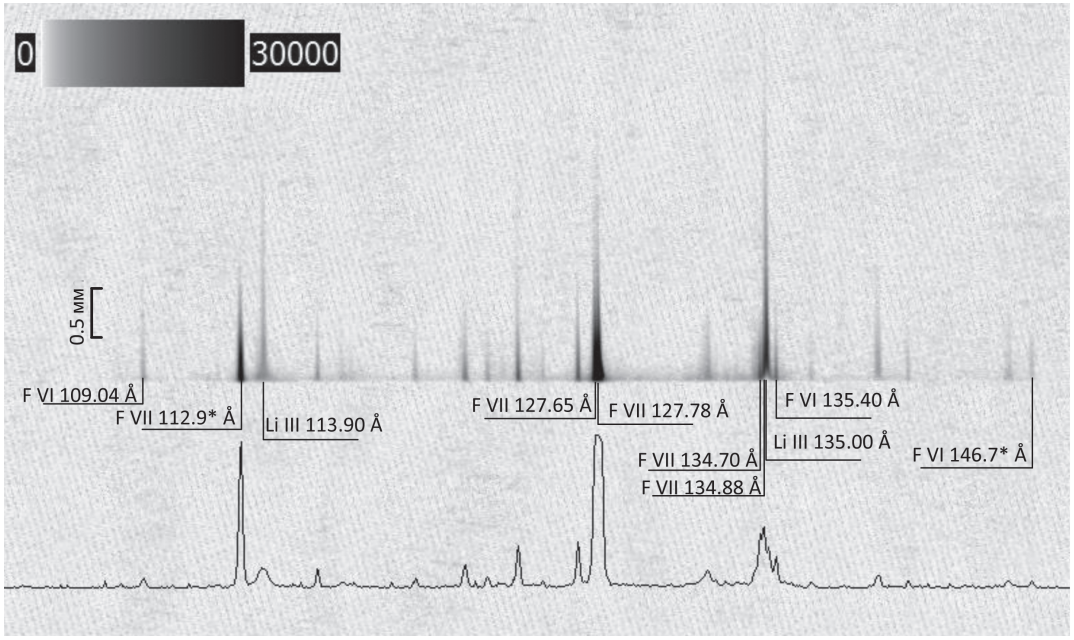

Рис.3. Спектр LiF-плазмы и его пропись (вариант спектрографа с Mo/Be-зеркалом).

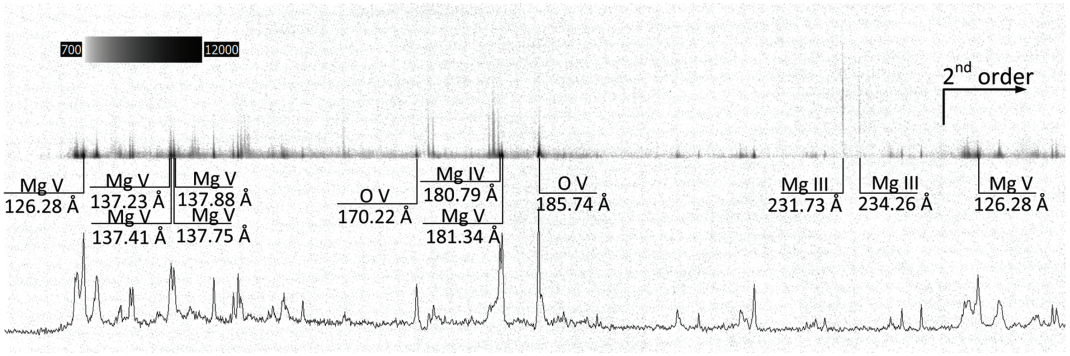

Рис.4. Спектр Mg-плазмы и его пропись в диапазоне 125 – 250 Å (спектрограф с Mo/Si-зеркалом).

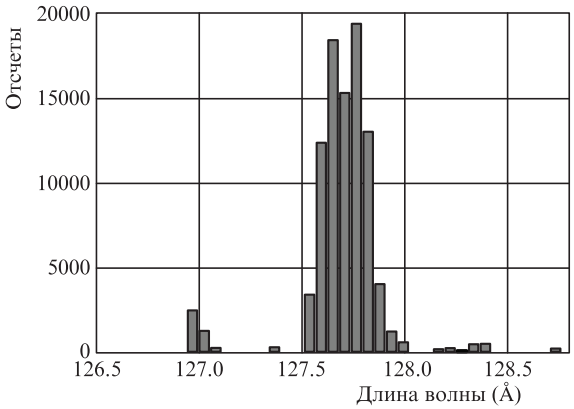

Рис.5. Гистограмма отсчетов детектора вблизи линий 127.65 и 127.80 Å иона F VII (мишень LiF, спектрограф с Mo/Be-зеркалом).

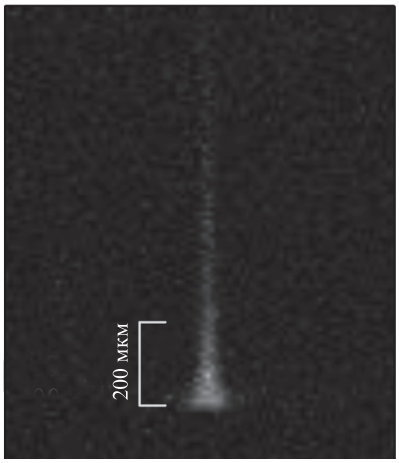

Рис.6. Штарковское уширение линии H_β (135 Å) иона C VI, зависящее от расстояния до полиэтиленовой мишени.

независимого положения ионов, часто принимаемого для количественной оценки электронной плотности N_e [14], это дает $N_e \approx 5.4 \times 10^{19}$ см$^{-3}$.

4. Заключение

Реализован способ получения спектральных изображений в УМР диапазоне спектра, основанный на использовании слабоастигматического пучка, направляемого на плоскую VLS-решетку скользящего падения, причем для создания такого пучка использованы широкополосные многослойные зеркала при почти нормальном падении излучения. Создан и испытан метровый спектрограф с МЗ Mo/Be и Mo/Si и рабочим спектральным диапазо-

ном 111–138 Å и 125–250 Å соответственно. В качестве VLS-решеток использовались решетки, созданные методом интерференционной литографии в НПО ГИПО на длине волны 0.53 мкм и в ООО ХолоГрэйт (0.488 мкм). С обеими решетками была продемонстрирована разрешающая способность спектрографа $\lambda/\delta\lambda \sim 10^3$, ограниченная лишь размером ячеек ПЗС-детектора. Пространственное разрешение прибора также было ограничено размером ячеек детектора и составило около 26 мкм (две ячейки ПЗС-детектора).

Получены линейчатые спектры возбуждаемого в лазерной плазме излучения многозарядных ионов с пространственным разрешением. Зарегистрировано штарковское уширение линии H_β (135 Å) иона C VI, зависящее от расстояния до мишени, и продемонстрирована возможность спектроскопической диагностики плазмы.

Продемонстрированы возможности отечественной технологии изготовления VLS-решеток методом интерференционной литографии.

1. Зимкина Т.М., Фомичев В.А. *Ультрамягкая рентгеновская спектроскопия* (Л.: изд-во ЛГУ, 1971).
2. Pirozhkov A.S., Esirkepov T.Zh., Pikuz T.A., et al. *Sci. Rep*., **7**, 17968 (2017).
3. Вишняков Е.А. Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В, Лугинин М.С., Панченко А.В., Першин Ю.П., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **42** (2), 143 (2012) [*Quantum Electron*., **42** (2), 143 (2012)].
4. Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *УФН*, **185** (11), 1203 (2015) [*Phys. Usp.*, **58** (11), 1095 (2015)].
5. Windt D.L, Gullikson E.M. *Appl. Opt*., **54** (18), 5850 (2015).
6. Барышева М.М., Гарахин С.А., Зуев С.Ю., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Свечников М.В., Смертин Р.М., Чхало Н.И., Meltchakov E. *ЖТФ*, **89** (11), 1763 (2019).
7. Гарахин С.А., Дубинин И.С., Зуев С.Ю., Полковников В.Н., Чхало Н.И. *ЖТФ*, **92** (8), 1107 (2022).
8. Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **45** (4), 371 (2015) [*Quantum Electron*., **45** (4), 371 (2015)].
9. Рагозин Е.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О., Пирожков А.С., Шатохин А.Н. *УФН*, **191** (5), 522 (2021) [*Phys. Usp.*, **64** (5), 495 (2021)].
10. Колесников А.О., Вишняков Е.А., Рагозин Е.Н., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **50** (10), 967 (2020) [*Quantum Electron*., **50** (10), 967 (2020)].
11. Hettrick M.C., Bowyer S. *Appl. Opt*., **22** (24), 3921 (1983).
12. Рагозин Е.Н., Вишняков Е.А., Колесников А.О., Шатохин А.Н. Патент РФ № 2659875 (2018).
13. Вишняков Е.А., Колесников А.О., Кузин А.А., Негров Д.В., Рагозин Е.Н., Сасоров П.В., Шатохин А.Н. *Квантовая электроника*, **47** (1), 55 (2017) [*Quantum Electron*., **47** (1), 55 (2017)].
14. Собельман И.И. *Введение в теорию атомных спектров* (М.: Физматгиз, 1963) [*Atomic Spectra and Radiative Transitions* (Berlin: Springer, 1979)].