

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
КОЛЕСНИКОВА АЛЕКСЕЯ ОЛЕГОВИЧА

**«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И
СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ВАКУУМНОЙ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА»**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.6 – оптика

Рассматриваемая работа посвящена разработке новых оптических элементов и созданию на их основе изображающих спектральных приборов вакуумной ультрафиолетовой(ВУФ) областей спектра.

Сначала несколько слов об актуальности данного исследования. Здесь необходимо подчеркнуть, что наблюдение излучательных спектров различных плазменных объектов является одним из немногих универсальных способов пассивной дистанционной диагностики как их параметров, так и протекающих в них физических процессов. Естественно, что чем выше температура исследуемой плазмы, тем более коротковолновое излучение должно использоваться для её диагностики, поскольку характеристики электронной компоненты плазмы будут, в первую очередь, влиять на эмиссию фотонов с энергиями, сопоставимыми с температурой электронов. Если, например, диагностика низкотемпературной плазмы с температурой менее 10 эВ может базироваться на наблюдении эмиссионных оптических или ультрафиолетовых спектров, то исследования высокотемпературной плазмы уже требуют регистрации рентгеновских спектров с длинами волн короче 100 Å.

В последнее время возник особый интерес к изучению плазмы с температурой в интервале примерно от 10 эВ до 100 эВ и обладающей твердотельной или почти твердотельной плотностью. Такая плазма получила название «теплого плотного вещества» (warm dense matter), и в отсутствии дополнительного внешнего воздействия (такого, как облучение ее пучками фотонов или заряженных частиц) интенсивно излучает как раз в области вакуумного ультрафиолета, занимающего примерно диапазон (100 - 1900) Å.

Следует подчеркнуть, что для диагностических приложений в подавляющем большинстве случаев необходима не просто регистрация эмиссионных спектров, а их регистрация с пространственным разрешением, по крайней мере, вдоль одной координаты, т. е. использование изображающего спектрометра. Поскольку для ВУФ-области не существует слабо поглощающих материалов с показателем преломления отличным от единицы, то для построения изображений можно использовать только отражательную или дифракционную фокусирующую оптику. В рассматриваемой диссертационной работе изучаются оба способа создания изображающих ВУФ-спектрометров, что, в первую очередь, и обуславливает актуальность исследования.

Говоря о **научной новизне** работы, следует отметить несколько моментов. Во-первых, в ней впервые найден общий метод решения обратной задачи интерференционной литографии для схемы записи с одним вспомогательным сферическим зеркалом наклонного падения, и на основе его применения создана первая отечественная сферическая решетка с переменным шагом с необходимой зависимостью частоты штрихов от координаты. Во-вторых, здесь впервые сделан анализ всех возможных схем широкополосных изображающих спектрографов нормального падения на основе сферической апериодической решетки или на основе периодической сферической решетки с криволинейными штрихами. Наконец, в работе впервые исследовано влияние параметров сглаживания толщин соседних слоев на структуру и ее спектр отражения многослойных структур Mo/Be.

Также несомненна и **практическая ценность** работы, поскольку проведенные в ней исследования и разработанные автором методики расчета могут быть использованы, а в ряде случаев уже использованы, для создания апериодических решеток специализированных спектральных приборов и широкополосных многослойных зеркал. Отмечу, что на основе метода решения обратной задачи был запатентован способ изготовления решетки с переменным шагом.

Хотя все основные результаты работы представляют научный и практический интерес, мне хочется выделить среди них следующие.

Во-первых, это, конечно, разработанный автором метод расчета схемы записи, с помощью которой методом интерференционной литографии можно изготавливать сферические или плоские апериодические решетки с заданной зависимостью частоты штрихов от координаты. Предложенный метод включает в себя 2 этапа. На первом этапе используется аналитический подход, который позволяет найти начальное приближение. На втором этапе численным методом производится минимизация целевой функции и определяются параметры схемы записи при которых интерференционная картина будет максимально соответствовать требуемой зависимости шага решетки от координаты. Существенно, что автор не только разработал этот метод, но и, так сказать, воплотил его в «железе». Он рассчитал схему записи для изготовления сферической апериодической решетки для конкретного спектрографа с плоским полем, по которой такие решетки были изготовлены в Государственном Институте Прикладной Оптики (Казань). Проведенные автором измерения показали, что зависимости частоты штрихов от координаты полученных решеток совпадают с расчетной. Кстати, это говорит о **высокой степени обоснованности и достоверности** полученного результата.

Во-вторых, мне представляется очень интересным исследование по созданию широкополосного зеркала на основе апериодической многослойной структуры молибден-бериллий, описанное в 4-ой Главе диссертации. Поскольку практическая реализация многослойных апериодических структур сильно

затрудняется, если толщины слоев из одного материала существенно меняются от слоя к слою, то автор изучил возможность использования слоев с уменьшенным разбросом толщин. Для этого в стандартный целевой функционал, который минимизируется при поиске оптимума, была с некоторым весовым множителем добавлена сумма квадратов разностей толщин соседних слоев. Как показано в диссертации, такое сглаживание толщин слоев позволяет существенно уменьшить разброс толщин при относительно узких спектральных диапазонах оптимизации, но его эффективность падает при увеличении ширины диапазона. Результатом данной главы является показанная в ней теоретическая возможность создания широкополосного зеркала нормального падения с равномерным отражением на уровне 10% в диапазоне длин волн от 111 до 200 Å.

В-третьих, мне хочется отметить, что разработанный автором и описанный во 2-ой Главе метод расчета оптической схемы спектрографа скользящего падения с плоским полем, позволил автору не только создать первый отечественный спектрограф такого класса, но и при объединении с методом решения "обратной" задачи интерференционной литографии дал возможность описать полный цикл разработки таких приборов.

Наконец, очень полезным является проведенный в 3-ей Главе анализ всех возможных вариантов оптической схемы спектрографов нормального падения с компенсацией астигматизма в широком спектральном диапазоне на основе сферической апериодической решетки и сферической периодической решетки с криволинейными штрихами, который показал отсутствие существенной разницы их характеристик.

Большим достоинством работы, на мой взгляд, является ее практическая нацеленность. Фактически каждая Глава диссертации заканчивается либо рассчитанным в работе, либо рассчитанным и созданным автором спектральным прибором. Причем, в последнем случае, еще и апробированным в эксперименте.

В целом диссертация написана хорошо, и читается как цельное научное исследование. Тем не менее, хотелось бы сделать несколько критических

замечаний, не касающихся качества проведенной работы, а связанных фактически с представлением полученных результатов, и задать несколько вопросов.

1) Автор часто использует понятие «мягкое рентгеновское излучение». При этом во многих случаях справедливость делаемых утверждений зависит от того, какой спектральный диапазон следует относить к мягкому рентгеновскому излучению. К сожалению, никакого консенсуса по этому поводу даже между исследователями, работающими в областях рентгеновской оптики или рентгеновской спектроскопии, до сих пор нет. Это очень хорошо видно из нескольких статей в таком официальном издании, как Физическая Энциклопедия в 5тт. Действительно, в статье «Рентгеновская оптика» написано, что область мягкого рентгеновского излучения это диапазон $10 - 300 \text{ \AA}$. В статье «Рентгеновское излучение» мягким называется рентгеновское излучение с длиной волны, начиная с 2 \AA Ангстрем. В статье «Рентгеновская астрономия» даже излучение с длиной волны 0.5 \AA называется мягким. Если следовать любому из этих определений, то содержащиеся в диссертации утверждения «В мягком рентгеновском диапазоне (длины волн короче 300 \AA) большинство материалов обладает низкими коэффициентами отражения при нормальном падении» (стр. 3), или «В мягкой рентгеновской области спектра коэффициенты отражения материалов при нормальном падении низки» (стр. 96) оказываются неверными, так как, например, очевидно, что кристаллы очень хорошо отражают при нормальном падении излучение с длиной волны, равной двойному межплоскостному расстоянию. Возможно, что автор под мягким рентгеновским понимает диапазон от 50 до 300 \AA . Тогда эти утверждения справедливы. Но поскольку такое определение не является общепринятым, то лучше было бы формулировать эти утверждения, указывая непосредственно интервал длин волн, о котором идет речь.

2) В диссертации А.Н. Шатохина был предложен стигматический спектрометр на основе плоской отражательной апериодической решетки скользящего падения и фокусирующего широкополосного апериодического многослойного зеркала нормального падения для достижения одновременно и высокого

пространственного, и высокого спектрального разрешения во всем рабочем спектральном диапазоне при высокой светосиле прибора. В Главе 4 диссертации А.О. Колесникова рассмотрен спектрометр на основе многослойного зеркала и пропускающей решетки. Поскольку оба прибора имеют общий спектральный диапазон, то было бы полезно сравнить их характеристики (светосила, спектральное и пространственное разрешение) и сделать выводы о достоинствах и недостатках того и другого. К сожалению, в диссертации такой информации я не нашел.

- 3) Зависит ли коэффициент передачи, т. е. отношение размера объекта к размеру изображения от длины волны? Если да, то как из полученной спектрограммы получить данные об интенсивностях разных линий, излучаемых одной и той же областью плазмы?
- 4) Очень важной характеристикой спектрометров является зависимость их светосилы от длины волны. Если она неизвестна, то это очень сильно ограничивает их диагностические возможности, оставляя, по сути, только проведение диагностики по форме контуров спектральной линии, или по интенсивностям настолько близко расположенных линий, что светосилу для них можно считать одинаковой. В диссертации подробно рассмотрена задача получения многослойного зеркала с почти постоянным коэффициентом отражения в довольно широком спектральном диапазоне. Но светосила спектрографа в целом зависит не только от свойств многослойного зеркала, но и от ряда других параметров, и, в первую очередь, от свойств диспергирующего элемента. Я не нашел в диссертации никакой информации по зависимости светосилы от длины волны для приборов со сферическими решетками с переменным шагом и для спектрографа с пропускающей решеткой и многослойным зеркалом.
- 5) Известно, что многослойные зеркала на основе молибдена-кремния работают в области длин волн больше 125 \AA , поскольку ниже поглощение в кремнии резко увеличивается. В связи с этим автор делает справедливый вывод, что «для освоения диапазонов длин волн $\lambda < 125 \text{ \AA}$ необходимо вместо кремния

использовать другой легкий элемент», и выбирает в качестве такового бериллий. Однако, у бериллия скачок поглощения лежит на длине волны 111 Å. Т.е. по сравнению с кремнием использование бериллия расширяет диапазон работы зеркала всего лишь на 14 Å. Если, например, вместо бериллия взять углерод, то удалось бы расширить нижнюю границу рабочего диапазона до 60 Å, причем ограничение возникало бы уже из свойств молибдена, а сам углерод мог бы работать в области до 45 Å. Конечно, если диапазон 111 -125 Å важен для каких-либо практических приложений, то борьба за него вполне оправдана. Но тогда было бы неплохо, чтобы важность этого диапазона в тексте диссертации была бы пояснена. Если использование в зеркале углерода затруднительно по технологическим соображениям, то это также стоило бы пояснить.

Следует подчеркнуть, что сделанные выше замечания никак не затрагивают основные результаты и выводы диссертационной работы.

Полученные в работе результаты опубликованы в шести статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, и апробированы в докладах на семи конференциях, в том числе международных. В публикациях достаточно подробно и полно изложены полученные А.О. Колесниковым результаты, а также использованные им методы и подходы. На основе метода решения обратной задачи был запатентован способ изготовления апериодической сферической решетки.

Считаю, что рассматриваемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по созданию изображающих спектральных приборов мягкой рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой областей спектра, имеющей значение для развития физики плазмы и атомной спектроскопии. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе Колесникова А.О. в науку. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Колесникова А.О. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Колесников Алексей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — оптика.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник лаборатории 1.1 – диагностики вещества в экстремальном состоянии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур (ОИВТ РАН), доктор физико-математических наук

Скобелев Игорь Юрьевич.

«27» октября 2021 г.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)

тел.: (495) 484-19-44 email: igor.skobelev@gmail.com

Подпись Игоря Юрьевича Скобелева удостоверяю.

Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур,
доктор физико-математических наук

т. (495) 484-18-44, email: gavrikov@ihed.ras.ru



Гавриков Андрей Владимирович

«27» октября 2021 г.

Список основных работ доктора физико-математических наук И.Ю. Скобелева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. E. D. Filippov, S. S. Makarov, K. F. Burdonov, W. Yao, G. Revet, J. Béard, S. Bolaños, S. N. Chen, A. Guediche, J. Hare, D. Romanovsky, I. Yu. Skobelev, M. Starodubtsev, A. Ciardi, S. A. Pikuz, J. Fuchs. Enhanced X-ray emission arising from laser-plasma confinement by a strong transverse magnetic field. // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. Iss. 1. – 8180. doi: 10.1038/s41598-021-87651-8.
2. G. Revet, B. Khiar, E. Filippov, C. Argiroffi, J. Béard, R. Bonito, M. Cerchez, S. N. Chen, T. Gangolf, D. P. Higginson, A. Mignone, B. Olmi, M. Ouillé, S. N. Ryazantsev, I. Yu. Skobelev, M. I. Safronova, M. Starodubtsev, T. Vinci, O. Willi, S. Pikuz, S. Orlando, A. Ciardi & J. Fuchs. Laboratory disruption of scaled astrophysical outflows by a misaligned magnetic field. // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. – Iss. 1. – 762. doi: 10.1038/s41467-021-20917-x
3. A. S. Martynenko, S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, S. N. Ryazantsev, C. D. Baird, N. Booth, L. N. K. Döhl, P. Durey, A. Ya. Faenov, D. Farley, R. Kodama, K. Lancaster, P. McKenna, C. D. Murphy, C. Spindloe, T. A. Pikuz, N. Woolsey. Optimization of a laser plasma-based x-ray source according to WDM absorption spectroscopy requirements. // *Matter and Radiation at Extremes*. – 2021. – Vol. 6., – Iss. 1. – 014405. doi: 10.1063/5.0025646
4. S. N. Ryazantsev, I. Yu. Skobelev, E. D. Filippov, A. S. Martynenko, M. D. Mishchenko, M. Krüs, O. Renner, S. A. Pikuz. Precise wavelength measurements of potassium He- and Li-like satellites emitted from the laser plasma of a mineral target. // *Matter and Radiation at Extremes*. – 2021. – Vol. 6. – Iss. 1. – 014402. doi: 10.1063/5.0019496
5. A. S. Martynenko, S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, S. N. Ryazantsev, C. Baird, N. Booth, L. Doebl, P. Durey, A. Ya. Faenov, D. Farley, R. Kodama, K. Lancaster, P. McKenna, C. D. Murphy, C. Spindloe, T. A. Pikuz, and N. Woolsey. Effect of plastic coating on the density of plasma formed in Si foil targets irradiated by ultra-high-contrast relativistic laser pulses. // *Phys. Rev. E*. – 2020. – Vol. 101. Iss. 4. – 043208. doi: 10.1103/PhysRevE.101.043208
6. M. Alkhimova, S. Ryazantsev, I. Skobelev, A. Boldarev, J. Feng, X. Lu, L.-M. Chen, S. Pikuz. Clean source of soft X-ray radiation formed in supersonic Ar gas jets by high-contrast femtosecond laser pulses of relativistic intensity. // *High Power Laser Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – E26. doi: 10.1017/hpl.2020.21
7. B. Khiar, G. Revet, A. Ciardi, K. Burdonov, E. Filippov, J. Béard, M. Cerchez, S. N. Chen, T. Gangolf, S. S. Makarov, M. Ouillé, M. Safronova, I. Yu. Skobelev, A. Soloviev, M. Starodubtsev, O. Willi, S. Pikuz, and J. Fuchs. Laser-Produced Magnetic-Rayleigh-Taylor Unstable Plasma Slabs in a 20 T Magnetic Field. // *Phys. Rev. Lett.* – 2019. – Vol. 123. – Iss. 20. – 205001. doi: 10.1103/PhysRevLett.123.205001
8. E. D. Filippov, I. Yu. Skobelev, G. Revet, S. N. Chen, B. Khiar, A. Ciardi, D. Khaghani, D. P. Higginson, S. A. Pikuz, J. Fuchs. X-ray spectroscopy evidence for plasma shell formation in experiments modeling accretion columns in young stars. // *Matter and Radiation at Extremes*. – 2019. – Vol. 4. – Iss. 6. – 064402. doi: 10.1063/1.5124350

9. A. S. Martynenko, I. Yu. Skobelev & S. A. Pikuz. Possibility of estimating high-intensity-laser plasma parameters by modelling spectral line profiles in spatially and time-integrated X-ray emission. // *Appl. Phys. B.* – 2019. – Vol. 125. – 31.
10. E. D. Filippov, I. Yu. Skobelev, G. Revet, S. N. Chen, B. Khiar, A. Ciardi, D. Khaghani, D. P. Higginson, S. A. Pikuz, and J. Fuchs. X-ray spectroscopy evidence for plasma shell formation in experiments modeling accretion columns in young stars. // *Matter and Radiation at Extremes.* – 2019. – Vol. 4. – Iss. 6. – 064402. doi: 10.1063/1.5124350
11. М. А. Алхимова, И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов, Д. А. Арич, Т. А. Пикуз, С. А. Пикуз. Учет аппаратной функции кристаллических спектрометров, работающих во многих порядках отражения, при диагностике лазерной плазмы по непрерывному спектру. // *Квантовая электроника.* 2018. – Т. 48. – № 8. – С. 749.
12. I. Y. Skobelev, S. N. Ryazantsev, D. D. Arich, P. S. Bratchenko, A. Y. Faenov, T. A. Pikuz, P. Durey, L. Doebl, D. Farley, C. D. Baird, K. L. Lancaster, C. D. Murphy, N. Booth, C. Spindloe, P. McKenna, S. B. Hansen, J. Colgan, R. Kodama, N. Woolsey, S. A. Pikuz. X-ray absorption spectroscopy study of energy transport in foil targets heated by petawatt laser pulses. // *Photonics Research.* – 2018. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 234. doi: 10.1364/PRJ.6.0002374
13. G. Revet, S. N. Chen, R. Bonito, B. Khiar, E. Filippov, C. Argiroffi, D. P. Higginson, S. Orlando, J. Béard, M. Blecher, M. Borghesi, K. Burdonov, D. Khaghani, K. Naughton, H. Pépin, O. Portugall, R. Riquier, R. Rodriguez, S. N. Ryazantsev, I. Yu. Skobelev, A. Soloviev, O. Willi, S. Pikuz, A. Ciardi, J. Fuchs. Laboratory unraveling of matter accretion in young stars. // *Science Advances.* – 2017. – Vol. 3. – Iss. 11. – e1700982. doi: 10.1126/sciadv.1700982
14. A. Ya. Faenov, M. A. Alkhimova, T. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, M. Nishiuchi, H. Sakaki, A. S. Pirozhkov, A. Sagisaka, N. P. Dover, K. Kondo, K. Ogura, Y. Fukuda, H. Kiriyama, A. Andreev, K. Nishitani, T. Miyahara, Y. Watanabe, S. A. Pikuz Jr., M. Kando, R. Kodama, K. Kondo. The effect of laser contrast on generation of highly charged Fe ions by ultra-intense femtosecond laser pulses. // *Applied Physics B-Lasers.* – 2017. – Vol. 123. – 197. doi: 10.1007/s00340-017-6771-2.
15. S. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, M. A. Alkhimova, G. V. Pokrovskii, J. Colgan, T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, A. A. Soloviev, K. F. Burdonov, A. A. Eremeev, A. D. Sladko, R. R. Osmanov, M. V. Starodubtsev, V. N. Ginzburg, A. A. Kuz'min, A. M. Sergeev, J. Fuchs, E. A. Khazanov, A. A. Shaikin, I. A. Shaikin, I. V. Yakovlev. Formation of a plasma with the determining role of radiative processes in thin foils irradiated by a pulse of the PEARL subpetawatt laser. // *JETP Letters.* – 2017. – Vol. 105. – Iss. 1. – P. 13. doi: 10.1134/S0021364017010131.