

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
ШАТОХИНА АЛЕКСЕЯ НИКОЛАЕВИЧА

**«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА
ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ
ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА»**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

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

Регистрация эмиссионных спектров различных объектов уже давно признана важнейшим способом пассивной дистанционной диагностики как их параметров, так и протекающих в них физических процессов. При этом, как правило, чем выше температура исследуемого объекта, тем более коротковолновое излучение должно использоваться для его диагностики. 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 плазменных объектов, называемых «теплым плотным веществом» (warm dense matter), которые должны излучать 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 по одной координате, т. е. использование изображающего спектрометра. В рассматриваемой диссертационной работе изучается один из немногих способов создания изображающих ВУФ-спектрометров, что, в первую очередь, и обуславливает **актуальность** исследования.

Научная новизна работы определяется, в частности, тем, что в ней впервые предложено для создания изображающего ВУФ-спектрометра совместное использование решеток с переменным периодом и аperiodических многослойных зеркал нормального падения.

Также несомненна и **практическая ценность** работы, поскольку проведенные в ней исследования не только фактически положили начало развитию отечественной технологии изготовления дифракционных решеток с переменным периодом для МР и ВУФ-диапазонов, но и привели к созданию нескольких новых приборов изображающей спектроскопии.

Основным достижением работы, на мой взгляд, является идея сочетания решетки с переменным периодом и фокусирующего многослойного зеркала. На основе этой идеи в диссертации предложены 2 схемы, использующие зеркала нормального или скользящего падения, описанные в Главах 2 и 3, соответственно.

При использовании первой схемы автору удалось создать стигматический высокосветосильный спектрометр, позволяющий регистрировать ВУФ-спектры одновременно с хорошими пространственным и спектральным разрешениями. При этом, как показано в диссертации, хотя в полной мере стигматическим он является только на двух длинах волн, но практический стигматизм достигается во всем спектральном диапазоне. Поскольку решетку, идеально соответствующую требованиям расчета сделать чрезвычайно сложно, то в созданном приборе автор использовал решетки, получаемые по двум разным технологиям, каждая из которых обладает своими недостатками: в случае применения электронно-лучевой литографии нарушается плавность изменения периода штрихов, а в случае интерференционной литографии получаемая зависимость периода штрихов от координаты хотя и является плавной, но несколько отличается от задаваемой

расчетом. Проведенные автором эксперименты показали, что в первом случае спектральное разрешение составило ~ 500 , а во втором было в 2 раза лучше.

При использовании второй схемы (с зеркалом скользящего падения) автору удалось создать первый отечественный спектрометр класса Хеттрика–Андервуда на область длин волн $50 - 330 \text{ \AA}$, который может использоваться не только как сканирующий спектрометр, но и как монохроматор. В работе была продемонстрирована спектральная разрешающая способность ~ 1300 на длине волны 182 \AA .

Хочу подчеркнуть, что все приводимые в диссертации значения параметров созданных спектральных приборов были получены автором в ходе специально проведенных им экспериментов. Хотя работа является преимущественно экспериментальной, автор продемонстрировал также умение использовать как аналитические, так и современные численные расчетные методы. В силу этого **степень обоснованности** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, и их **достоверность** являются высокими.

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) Мне не очень нравится, что рассматриваемый в работе спектральный диапазон ($50 - 300$) \AA автор называет мягким рентгеновским. Я понимаю, что такая терминология сейчас принята в рентгеновской оптике. Но в рентгеновской спектроскопии терминология несколько другая - рентгеновский диапазон начинается с 20 \AA , и его граница связана с возможностью применения кристаллических диспергирующих элементов. Поскольку полученные автором спектры, приведенные, например, на рис. 2.9, 2.10, 2.12, являются ВУФ-спектрами, но никак не рентгеновскими, то, наверное, и прибор, с помощью которого они зарегистрированы, правильнее называть ВУФ-спектрометром, а не рентгеновским.

2) На стр.79-80 написано: «Видно, что ширина изображения не превосходит размер ячейки детектора в диапазоне длин волн $\lambda < 330 \text{ \AA}$ ». Однако, на самом рисунке последняя экспериментальная точка лежит на 300 \AA , и что происходит в области $300 — 330 \text{ \AA}$. из рисунка понять невозможно. Следовало бы закончить цитируемое предложение словами «... в диапазоне длин волн $\lambda \leq 300 \text{ \AA}$ ».

3) 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. Я не нашел в диссертации никакой информации по этой важнейшей характеристике созданных автором приборов.

4) Будет ли зависеть светосила, а также спектральное и пространственное разрешения от формы штрихов дифракционной решетки в переменном периоде? Наверное, этот вопрос стоило бы обсудить в тексте диссертации.

5) 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?

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

Полученные в работе результаты опубликованы в семи статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и апробированы в докладах на пятнадцати конференциях, в том числе международных. В публикациях достаточно подробно и полно изложены полученные А.Н. Шатохиным результаты, а также использованные им методы и подходы.

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 Шатохина А.Н. в науку.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № от 24.09.2013г., а ее автор Шатохин Алексей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 — 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.

«9» сентября 2020 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.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур, доктор физико-математических наук



Амиров Равиль Хабибулович

тел. (495) 485-90-09, email: amirovravil@yandex.ru

Список основных работ доктора физико-математических наук И.Ю. Скобелева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет: (не более 15)

1. 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, *Applied Physics B* 125:31 (2019)
2. E.D. Filippov, I.Yu. Skobelev, G. Revet, S.N. Chen, B. Khair, 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 Radiat. Extremes* 4, 064402 (2019)
3. Alkhimova, MA, Skobelev, IY, Faenov, AY, Arich, DA, Pikuz, TA, Pikuz, SA, Accounting for the instrument function of crystal spectrometers operating in many reflection orders in the diagnostics of laser plasma from its continuum spectrum, *QUANTUM ELECTRONICS*, Том: 48 Выпуск: 8 Стр.: 749-754 (2018)
4. Skobelev, IY, Ryazantsev, SN, Arich, DD, Bratchenko, PS, Faenov, AY, Pikuz, TA, Durey, P, Doehl, L, Farley, D, Baird, CD, Lancaster, KL, Murphy, CD, Booth, N, Spindloe, C, McKenna, P, Hansen, SB, Colgan, J, Kodama, R, Woolsey, N, Pikuz, SA, X-ray absorption spectroscopy study of energy transport in foil targets heated by petawatt laser pulses, *PHOTONICS RESEARCH*, Том: 6 Выпуск: 4 Стр.: 234-237 (2018)
5. Revet, Guilhem, Chen, Sophia N., Bonito, Rosaria, Khair, Benjamin, Filippov, Evgeny, Argiroffi, Costanza, Higginson, Drew P., Orlando, Salvatore, Beard, Jerome, Blecher, Marius, Borghesi, Marco, Burdonov, Konstantin, Khaghani, Dimitri, Naughton, Kealan, Pepin, Henri, Portugall, Oliver, Riquier, Raphael, Rodriguez, Rafael, Ryazantsev, Sergei N., Skobelev, Igor Yu., Soloviev, Alexander, Willi, Oswald, Pikuz, Sergey, Ciardi, Andrea, Fuchs, Julien, Laboratory unraveling of matter accretion in young stars, *SCIENCE ADVANCES*, ТОМ: 3 Выпуск: 11 Номер статьи: e1700982 (2017)
6. Faenov, Anatoly Ya., Alkhimova, Maria A., Pikuz, Tatiana A., Skobelev, Igor Yu., Nishiuchi, Mamiko, Sakaki, Hironao, Pirozhkov, Alexander S., Sagisaka, Akito, Dover, Nicholas P., Kondo, Kotaro, Ogura, Koichi, Fukuda, Yuji, Kiriya, Hiromitsu, Andreev, Alexander, Nishitani, Keita, Miyahara, Takumi, Watanabe, Yukinobu, Pikuz, Sergey A., Jr., Kando, Masaki, Kodama, Ruosuke, Kondo, Kiminori, The effect of laser contrast on generation of highly charged Fe ions by ultra-intense femtosecond laser pulses, *APPLIED PHYSICS B-LASERS AND OPTICS*, Volume: 123, Issue: 7, Article Number: 197 (2017)
7. Oks E., Dalimier E., Faenov A. Ya., Angelo, P., Pikuz S. A., Tubman E., Butler N. M. H., Dance R. J., Pikuz T. A., Skobelev I. Yu., Alkhimova M. A., Booth N., Green J., Gregory C., Andreev A., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P., Woolsey N., Using X-ray spectroscopy of relativistic laser plasma interaction to reveal parametric decay instabilities: a modeling tool for astrophysics, *OPTICS EXPRESS*, V. 25, Issue: 3, Pages: 1958-1972 (2017)
8. Pikuz, S. A., Skobelev, I. Yu., Alkhimova, M. A., Pokrovskii, G. V., Colgan, J., Pikuz, T. A., Faenov, A. Ya., Soloviev, A. A., Burdonov, K. F., Ereemeev, A. A., Sladko, A. D., Osmanov, R. R., Starodubtsev, M. V., Ginzburg, V. N., Kuz'min, A. A., Sergeev, A. M., Fuchs, J., Khazanov, E. A., Shaikin, A. A., Shaikin, I. A., Yakovlev, I. V., 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*, Volume: 105, Issue: 1, Pages: 13-17, (2017)

9. Ryazantsev S. N., Skobelev I. Yu., Faenov A. Ya., Pikuz T. A., Higginson D. P., Chen S. N., Revet, G., Beard, J., Portugall, O., Soloviev, A. A., Grum-Grzhimailo, A. N., Fuchs, J., Pikuz S. A., Diagnostics of laser-produced plasmas based on the analysis of intensity ratios of He-like ions X-ray emission, PHYSICS OF PLASMAS, Volume: 23, Issue: 12, Article Number: 123301, (2016)
10. Alkhimova M. A., Pikuz S. A., Skobelev I. Yu., Faenov A. Ya., Determination of the reflectivity curve of a spherically bent mica crystal used to diagnose X-ray radiation of relativistic laser plasma, BULLETIN OF THE LEBEDEV PHYSICS INSTITUTE, v. 43, № 10, pp. 291-294 (2016)
11. Skobelev, I.Y., Loboda, P.A., Gagarin, S.V., Ivliev, S.V., Kozlov, A.I., Morozov, S.V., Pikuz, S.A., Jr., Pikuz, T.A., Popova, V.V., Faenov, A.Y., The Spectr-W3 database on the spectroscopic properties of atoms and ions, Optics and Spectroscopy, Volume 120, Issue 4, Pages 507-514 (2016)
12. Colgan J., Faenov A.Ya., Pikuz S.A., Tubman E., Butler N.M.H., Abdallah J., Jr., Dance R.J., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Alkhimova M.A., Booth N., Green J., Gregory C., Andreev A., Loetzsch R., Uschmann I., Zhidkov A., Kodama R., McKenna P., Woolsey N., Evidence of high-n hollow-ion emission from Si ions pumped by ultraintense x-rays from relativistic laser plasma, EUROPHYS LETT, Том: 114, Выпуск: 3, Номер статьи: 35001, (2016)
13. А.Я. Фаенов, Е. Оке, Э. Далимиер, И.Ю. Скобелев, С.А. Пикуз, Т.А. Пикуз, И.А. Жвания, Ю. Фукуда, А. Андреев, Д. Кора, Х. Сакаки, Х. Котаки, А. Пирожков, Ю. Хаяси, Т. Кавачи, М. Кандо, К. Кондо, А. Жидков, Р. Кодама, Рентгеноспектральная диагностика генерации гармоник лазерного излучения при взаимодействии релятивистских фемтосекундных лазерных импульсов с кластерами, QUANTUM ELECTRON, 46, 338-341 (2016)
14. A.Y. Faenov, I.Y. Skobelev, T.A. Pikuz, S.A. Pikuz, R. Kodama, V.E. Fortov., Diagnostics of warm dense matter by high-resolution X-ray spectroscopy of hollow ions., LASER PART BEAMS, 33, 27-39 (2015)
15. A.Y. Faenov, J. Colgan, S.B. Hansen, A. Zhidkov, T.A. Pikuz, M. Nishiuchi, S.A. Pikuz, I. Y. Skobelev, J. Abdallah, H. Sakaki, A. Sagisaka, A.S. Pirozhkov, K. Ogura, Y. Fukuda, M. Kanasaki, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Kando, Y. Watanabe, T. Kawachi, S. Masuda, T. Hosokai, R. Kodama, K. Kondo., Nonlinear increase of X-ray intensities from thin foils irradiated with a 200 TW femtosecond laser., SCI REP, 5, 13436 (2015)