

Измерения абсолютных значений интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6.6–32 nm мишени из нержавеющей стали при импульсном лазерном возбуждении

© С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Р.М. Смертин, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: garahins@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2021 г.
В окончательной редакции 11 мая 2021 г.
Принято к публикации 11 мая 2021 г.

Приведены экспериментальные данные по абсолютным значениям интенсивности излучения в диапазоне длин волн 6.6–32 nm мишени из нержавеющей стали при возбуждении с помощью Nd:YAG-лазера с параметрами $\lambda = 1064$ nm, $E_{pulse} = 0.45$ J, $\tau = 4$ ns, $\nu = 10$ Hz. Результаты представляют интерес для различных приложений, использующих лабораторные лазерно-плазменные источники мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: экстремальное ультрафиолетовое излучение, эмиссионные спектры, лазерная искра, многослойное рентгеновское зеркало.

DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51356.140-21

Введение

Лазерно-плазменные источники (ЛПИ) мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения с твердотельной мишенью широко используются в рефлектометрах [1–7], дифракционных спектрометрах [8–10] и в различных лазерно-плазменных экспериментах [11,12]. Достоинствами таких источников являются высокая эффективность преобразования лазерного излучения в коротковолновое и большая средняя мощность, маленький (50–150 μ m) размер [2,13] и квазинепрерывный характер спектра в большинстве случаев, когда не предпринимаются дополнительные меры по „разрежению“ плазмы [13,14]. Фактически единственным недостатком этого типа источников является сильная эрозия мишени, которая может приводить к загрязнению элементов конструкции и оптики продуктами эрозии мишени. Однако в последнее время найден ряд способов, эффективно решающих эту проблему [15,16]. В рефлектометрах, когда излучение в спектрометр проходит через маленькие (порядка 100 μ m) щели, а первый рентгенооптический элемент скользящего падения находится на большом (от метра и более) расстоянии, эта проблема решается „автоматически“.

Наиболее проблемным является загрязнение оптического ввода в вакуум, через который лазерное излучение заводится в камеру источника. Однако по опыту работы различных групп, в том числе и авторов, использование сменного защитного кварцевого экрана решает эту проблему [17].

Несмотря на заметное число работ по ЛПИ с твердотельной мишенью для рефлектометрических приложений, в частности, упомянутых выше, в них главным образом приводятся спектральные зависимости интенсивности зондового пучка. Исключением являются работы, направленные на разработку источников ЭУФ и МР излучения для литографических приложений на длины волн 13.5 nm [13,14] и 6.67 nm [15–21]. Поэтому для практических применений знание об излучательных характеристиках источника крайне важно для понимания возможностей источника с точки зрения рабочего спектрального диапазона и оптимизации рентгенооптических элементов прибора, так как на вид и интенсивность регистрируемого спектра заметное влияние оказывают спектральные зависимости коэффициентов отражения от зеркал, эффективность дифракционной решетки и спектральная чувствительность детектора. В настоящей работе исследуется источник лабораторного рефлектометра, предназначенного для изучения коэффициентов отражения/пропускания/рассеяния рентгенооптических элементов в диапазоне длин волн 4–60 nm [22].

1. Схема и методика эксперимента

Исследования проводились на рефлектометре скользящего падения, подробно описанном в [22], но в отсутствие зеркал и дифракционной решетки в схеме прибора. Схема измерений показана на рис. 1. На место выходной щели была установлена диафрагма 2.3 \times 3 mm. На детекторе это дает пятно размером около 4 \times 8 mm, что меньше, чем входная апертура детектора. Предусмотрена возможность установки двух

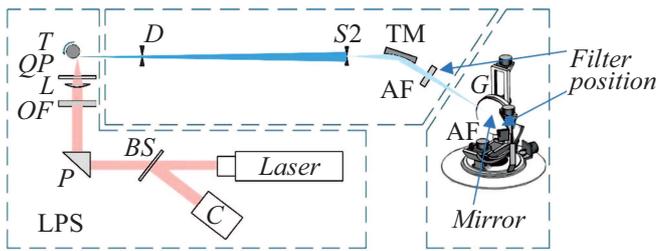


Рис. 1. Схема эксперимента. LPS — лазерно-плазменный источник МР и ЭУФ диапазона, включающий твердотельный импульсный лазер (LASER), измеритель мощности лазерного излучения C, делитель пучка, перенаправляющий часть излучения в измеритель мощности C, поворотная призма P, оптический ввод излучения в вакуум QP, короткофокусная линза L, защитная пластина из кварца OF и мишень T; D и S2 — входная и выходная диафрагмы, определяющие телесный угол, из которого берется излучение, TM — тороидальное зеркало, AF — абсорбционные фильтры для подавления длинноволнового излучения; G — пятисосновый гониометр с установленным на нем многослойным зеркалом (Mirror).

абсорбционных фильтров (AF) — в камере выходной щели и непосредственно перед детектором. В качестве источника излучения для образования ЛПИ в схеме используется Nd:YAG-лазер (Expla NL-300, длина волны $1.06 \mu\text{m}$, длительность 4 ns и частота следования импульсов 10 Hz). В качестве детектора использовался кремниевый калиброванный по чувствительности фотодиод SPD-100UV, производство ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Принцип измерений эмиссионных характеристик ЛПИ в широком спектральном диапазоне заключался в следующем. МР и ЭУФ излучение лазерной плазмы из мишени T проходит через входную D и выходную S2 диафрагмы, падает на тороидальное зеркало TM, проходит через абсорбционный фильтр AF и попадает на многослойное зеркало, установленное на пятисосном гониометре. Отраженное от многослойного зеркала квазимонохроматическое излучение, пройдя через второй аналогичный первому фильтр, попадает на поверхностно-барьерный кремниевый фотодиод SPD-100UV. Многослойное рентгеновское зеркало выполняло функцию дисперсионного по длинам волн элемента за счет согласованного $\varphi-2\varphi$ сканирования зеркала и детектора.

Связь между регистрируемым с фотодиода током i_d и спектральной плотностью мощности ЛПИ, излученной в единицу телесного угла в спектральной полосе 1 nm $I(\lambda)$ [W/(sr · nm)], может быть записана в виде

$$i_d = \int_0^{\infty} \Delta\Omega I(\lambda) s(\lambda) T^2(\lambda) R_m(\lambda) R_{TM} d\lambda, \quad (1)$$

где i_d [A], $\Delta\Omega$ [sr] — телесный угол, из которого излучение регистрируется детектором, $s(\lambda)$ [A/W] — чувствительность детектора, $T(\lambda)$ — коэффициент пропускания

фильтра, $R_m(\lambda)$ — коэффициент отражения многослойного зеркала, R_{TM} — коэффициент отражения тороидального зеркала и λ — длина волны. Соотношение (1) записано в предположении, что излучение из источника распространяется изотропно. В большинстве случаев такой подход оправдан, по крайней мере, в системах скользящего падения, в частности, в рефлектометрии, так как излучение берется из малых углов, много меньше 1 sr.

С учетом резонансного характера отражения от многослойных зеркал интегрирование достаточно проводить в диапазоне $\pm 3\Delta\lambda_{1/2}$ в окрестности резонансной длины волны λ_r , где $\Delta\lambda_{1/2}$ указывает на ширину спектральной полосы многослойного зеркала на половине высоты коэффициента отражения, соотношение (1) можно переписать в виде

$$i_d = \Delta\Omega \int_{\lambda_r - 3\Delta\lambda_{1/2}}^{\lambda_r + 3\Delta\lambda_{1/2}} I(\lambda) s(\lambda) T^2(\lambda) R_m(\lambda) R_{TM} d\lambda. \quad (2)$$

Резонансная длина волны определяется эффективным периодом многослойного зеркала d_{eff} и скользящим углом падения φ из уравнения Вульфа–Брэгга

$$2d_{\text{eff}} \sin \varphi = m\lambda, \quad (3)$$

где m — порядок отражения. В формуле используется эффективный период, так как в МР и ЭУФ диапазонах наблюдается сильная дисперсия оптических констант.

На практике спектральные зависимости пропускания фильтров, чувствительности детектора, зеркал скользящего падения и, для твердотельных мишеней, спектральная плотность мощности излучения ЛПИ в пределах полосы отражения многослойного зеркала являются плавными функциями, они могут быть вынесены за знак интеграла и заменены на их значения на резонансной длине волны λ_r . Исключения составляют предкраевые области пропускания фильтров и край поглощения Si L, 12.4 nm, где наблюдается некоторый скачок чувствительности детектора [23]. Таким образом, на практике с достаточной точностью можно использовать соотношение

$$i_d = \Delta\Omega I(\lambda_r) s(\lambda_r) T^2(\lambda_r) R_{TM}(\lambda_r) \int_{\lambda_r - 3\Delta\lambda_{1/2}}^{\lambda_r + 3\Delta\lambda_{1/2}} R_m(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

В случае регистрации узких спектральных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии, превышающем полосу отражения многослойного зеркала, можно считать, что практически вся энергия сосредоточена на длине волны линии λ_l , линия выступает как дельта-функция и соотношение (4) можно переписать в виде

$$i_d = \Delta\Omega I(\lambda_l) s(\lambda_l) T^2(\lambda_l) R_{TM}(\lambda_l) R_m(\lambda_l). \quad (5)$$

Такая ситуация возникает только в случае ЛПИ с мишенью из легких газов [24].

Таблица 1. Используемые в эксперименте многослойные рентгеновские зеркала

Структура	Период, nm	Число периодов	Рабочий диапазон длин волн, nm
Mo/B ₄ C	6.5	60	6.5–11.9
Mo/Be	9.83	50	11.2–18
Be/Si/Al	18.2	40	17–32

Таблица 2. Используемые в эксперименте фильтры

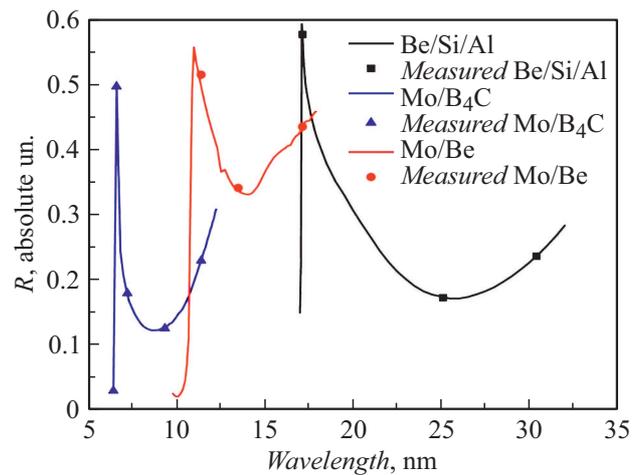
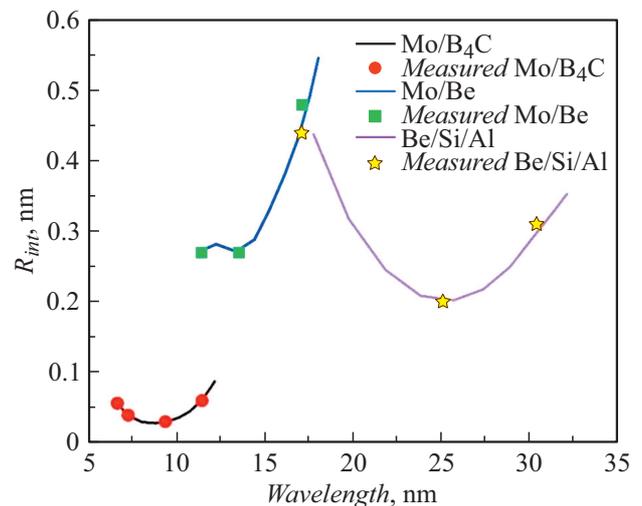
Структура	Период, nm	Число периодов	Рабочий диапазон длин волн, nm
Mo/C	2/0.7	60	6.5–11.9
Mo/Be	3/2	30	11.2–18
MoSi ₂ /Al/MoSi ₂	2.5/150/2.5	1	17–32

Для эффективного перекрытия всего диапазона длин волн, а также подавления сигнала от высших порядков отражения в эксперименте использовались по три типа многослойных зеркал и фильтров. В табл. 1 и 2 приведены их структура и толщины. Телесный угол, из которого регистрировалось излучение, определялся площадью выходной диафрагмы S_2 и ее расстоянием до источника и составил $\Delta\Omega = 4.6 \cdot 10^{-7}$ sr.

Многослойные зеркала и фильтры наносились методом магнетронного распыления. Описание оборудования и технологические параметры процессов распыления подробно описаны в [25]. Выбор конструкций многослойных зеркал, в частности, новой системы Be/Si/Al [26], обусловлен наилучшим сочетанием коэффициентов отражения и спектральной селективности при многолетней стабильности рентгенооптических характеристик. Материалы и конструкция фильтров также обеспечивали оптимальное сочетание высоких коэффициентов пропускания и механической прочности. Подробнее о методах изготовления и физических свойствах тонкопленочных фильтров можно найти в [27,28].

2. Калибровка рентгенооптических элементов

Как следует из соотношения (4), для определения абсолютных значений интенсивности рентгеновского излучения в эксперименте требуется калибровка спектральных зависимостей интегральных коэффициентов отражения многослойных зеркал в своих рабочих диапазонах, коэффициента отражения тороидального зеркала во всем диапазоне, пропускания абсорбционных фильтров в своих диапазонах и спектральной чувствительности детектора.

**Рис. 2.** Измеренные (символы) и расчетные (сплошные линии) значения пиковых коэффициентов отражения Mo/B₄C-, Mo/Be- и Be/Si/Al-многослойных зеркал.**Рис. 3.** Измеренные (символы) и расчетные (сплошные линии) интегральные значения коэффициентов отражения Mo/B₄C-, Mo/Be- и Be/Si/Al-многослойных зеркал.

На рис. 2 и 3 приведены измеренные и расчетные зависимости пиковых и интегральных коэффициентов отражения от длины волны многослойных Mo/B₄C, Mo/Be и Be/Si/Al зеркал. Сплошными линиями показаны рассчитанные кривые, символами — измеренные коэффициенты отражения: Mo/B₄C (синие (online-версии)), Mo/Be (красные (online-версии)) и Be/Si/Al (черные). Спектральные зависимости коэффициентов пропускания фильтров приведены на рис. 4. Измерения коэффициентов отражения и пропускания фильтров проводились на лабораторном рефлектометре [29]. Погрешность измерений не превышала 3–4% и контролировалась по тестовым образцам, ранее измеренным на синхротроне BESSY-2.

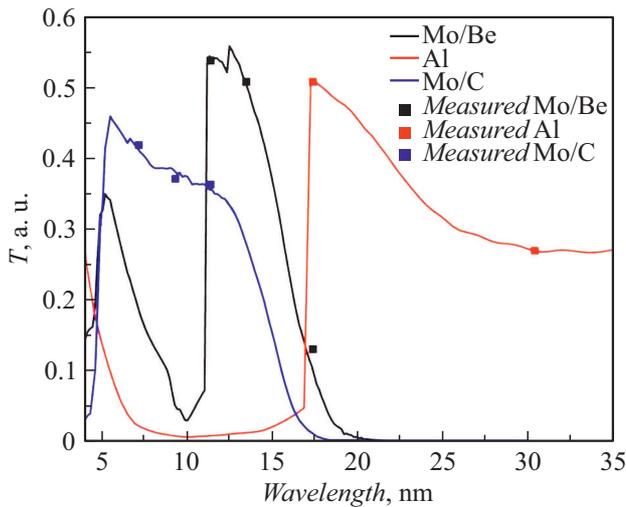


Рис. 4. Измеренные (символы) и расчетные (сплошные линии) коэффициенты пропускания Mo/C-, Mo/Be- и MoSi₂/Al/MoSi₂-фильтров.

При расчете отражательных характеристик многослойных зеркал использовались толщины пленок, ширины и вид интерфейсов, полученные по данным совместной реконструкции кривых рентгеновского отражения на нескольких длинах волн по методике, описанной в [30].

Спектральная зависимость чувствительности детектора SPD-100UV была взята из [31], полученная по результатам исследований на синхротроне BESSY-2. В интересующем нас диапазоне она варьировалась в пределах $s(\lambda) = 0.2-0.25$ A/W. Для простоты расчетов было взято ее среднее значение $\langle s(\lambda) \rangle = 0.225$ A/W.

Тороидальное зеркало с золотым покрытием имело в диапазоне длин волн 6.6–32 nm коэффициент отражения $R_{TM} = 90-95\%$. В дальнейшем для расчетов был взят средний коэффициент отражения $\langle R_{TM} \rangle = 92.5\%$.

С учетом принятых усреднений и ошибок измерений коэффициентов отражения зеркал и пропускания фильтров мы оцениваем ошибку измерений абсолютных значений спектральной плотности мощности излучения $I(\lambda)$ на уровне $\pm 15\%$, что вполне достаточно для большинства применений.

3. Экспериментальные результаты

Исследовалась мишень из нержавеющей стали, которая по сравнению с медной и оловянной показала максимум излучательной способности в изучаемой области [22]. На рис. 5,а приведены спектральные зависимости регистрируемых сигналов (разноцветные линии с символами). Восстановленная по ним с учетом калибровки спектральная зависимость плотности мощности излучения (разноцветные символы) приведена на рис. 5,б. На обоих графиках синий цвет (в online-версии) соответствует измерениям с Mo/B₄C-зеркалом и

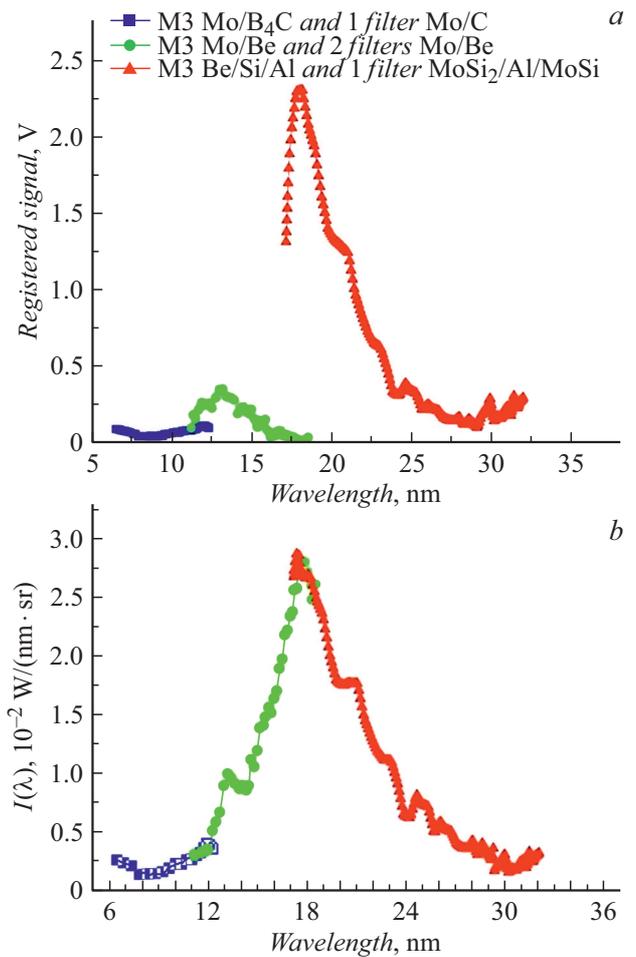


Рис. 5. Спектральные зависимости регистрируемых сигналов (а) и восстановленная по ним с учетом калибровки спектральная плотность мощности излучения (б). Разноцветные линии с символами соответствуют трем поддиапазнам.

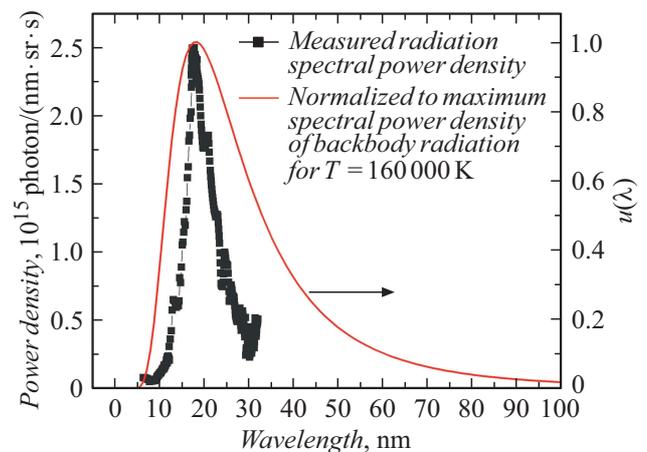


Рис. 6. Спектральная зависимость плотности мощности излучения (линия с символами) и наложенная на нее спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела для температуры $T = 160\,000$ K.

Mo/C-фильтром. Зеленым цветом (в online-версии) представлены результаты измерений с Mo/Be-зеркалом и двумя Mo/Be-фильтрами. Красный цвет (в online-версии) соответствует измерениям с Be/Si/Al-многослойным зеркалом и одним MoSi₂/Al/MoSi₂-фильтром.

Интересно было сравнить спектральную плотность мощности изученного источника с излучением абсолютно черного тела с температурой, соответствующей максимуму его излучательной способности. На рис. 6 линией с символами приведена измеренная спектральная плотность мощности излучения $I(\lambda)$, выраженная в числе фотонов в спектральной полосе 1 nm, излученных в телесный угол 1 стерадиан в секунду [photon/(nm · sr · s)]. Сплошной линией приведена нормированная на максимум спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела для температуры 160 000 К.

Выводы

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1) Измерена спектральная плотность мощности лазерно-плазменного источника МР и ЭУФ излучения в диапазоне длин волн 6.6–32 nm с использованием мишени из нержавеющей стали при возбуждении с помощью Nd:YAG-лазера с параметрами $\lambda = 1064$ nm, $E_{pulse} = 0.45$ J, $\tau = 4$ ns, $\nu = 10$ Hz. Параметры лазера являются характерными для большинства рефлектометров. Максимум плотности мощности пришелся на длину волны $\lambda \approx 18$ nm, что, согласно закону Вина, соответствует температуре $T = 1.6 \cdot 10^5$ К.

2) Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей сшивкой участков кривой спектральной плотности мощности, полученных с различными многослойными зеркалами и фильтрами.

3) Спектральная плотность мощности излучения плохо описывается планковской кривой абсолютно черного тела, что говорит о том, что плазма в этом диапазоне длин волн недостаточно „оптически плотная“ и этой моделью нельзя пользоваться для оценки интенсивности источника.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания 0030-2021-0022 при поддержке грантов РФФИ №№ 19-07-00173, 20-02-00364, 20-02-00708 и 20-32-90169 с использованием оборудования ЦКП „Физика и технологии микро- и наноструктур“ при ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Gullikson, J.H. Underwood, P.C. Batson, V. Nikitin. *J. X-Ray Sci. Technol.*, **3** (4), 283 (1992). DOI: 10.3233/XST-1992-3402
- [2] L. van Loyen, T. Boettger, S. Braun, H. Mai, A. Leson, F. Scholze, J. Tuemmler, G. Ulm, H. Legall, P.V. Nickles, W. Sandner, H. Stiel, C.E. Rempel, M. Schulze, J. Brutscher, F. Macco, S. Muellender. *Proc. SPIE*, **5038** (12), (2003). DOI: 10.1117/12.485042
- [3] A. Miyake, T. Miyachi, M. Amemiya, T. Hasegawa, N. Ogushi, T. Yamamoto, F. Masaki, Y. Watanabe. *Proc. SPIE*, **5037**, 647 (2003). DOI: 10.1117/12.484969
- [4] H. Wang, X. Wang, Bo Chen, Y. Wang, S. Mao, S. Ren, P. Zhou, Y. Liu, T. Huo, H. Zhou. *Optik*, **204**, 164213 (2020). DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164213
- [5] F. Scholze, T. Böttger, H. Enkisch, C. Laubis, L.V. Loyen, F. Macco, S. Schädlich. *Meas. Sci. Technol.*, **18**, 126 (2007). DOI: 10.1088/0957-0233/18/1/015
- [6] D.B. Abramenko, P.S. Antsiferov, L.A. Dorokhin, V.V. Medvedev, Yu.V. Sidelnikov, N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov. *Opt. Lett.*, **44** (20), 4949 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.004949
- [7] С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, И.А. Каськов, А.А. Лопатин, А.Н. Нечай, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, М.В. Свечников. *Квант. электрон.*, **47** (4), 385 (2017). DOI: 10.1070/QEL16300
- [8] Е.А. Vishnyakov, K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, E.N. Ragozin, A.A. Reva, A.S. Ul'yanov, S.V. Shestov. *Quant. Electron.*, **39** (5), 474 (2009). DOI: 10.1070/QE2009v039n05ABEH013902
- [9] E.N. Ragozin, K.N. Mednikov, A.A. Pertsov, A.S. Pirozhkov, A.A. Reva, S.V. Shestov, A.S. Ul'yanov, E.A. Vishnyakov. *Proc. SPIE*, **7360**, 73600N (2009). DOI: 10.1117/12.820750
- [10] Е.А. Vishnyakov, I.A. Kopylets, V.V. Kondratenko, A.O. Kolesnikov, A.S. Pirozhkov, E.N. Ragozin, A.N. Shatokhin. *Quant. Electron.*, **48** (3), 189 (2018). DOI: 10.1070/QEL16574
- [11] V.E. Levashov, K.N. Mednikov, A.S. Pirozhkov, E.N. Ragozin, I.Yu. Tolstikhina. *Quant. Electron.*, **37** (11), 1060 (2007). DOI: 10.1070/QE2007v037n11ABEH013608
- [12] I.L. Beigman, E.A. Vishnyakov, M.S. Luginin, E.N. Ragozin, I.Yu. Tolstikhina. *Quant. Electron.*, **40** (6), 545 (2010). DOI: 10.1070/QE2010v040n06ABEH014313
- [13] Д.Б. Абраменко, П.С. Анциферов, Д.И. Астахов, А.Ю. Виноходов, И.Ю. Вичев, Р.Р. Гаязов, А.С. Грушин, Л.А. Дорохин, В.В. Иванов, Д.А. Ким, К.Н. Кошелев, П.В. Крайнов, М.С. Кривокорытов, В.М. Кривцун, Б.В. Лакагош, А.А. Лаш, В.В. Медведев, А.Н. Рябцев, Ю.В. Сидельников, Е.П. Снегирев, А.Д. Соломянная, М.В. Спиридонов, И.П. Цыгвинцев, О.Ф. Якушев, А.А. Якушкин. *УФН*, **189** (3), 323 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2018.06.038447 [D.B. Abramenko, P.S. Antsiferov, D.I. Astakhov, A.Yu. Vinokhodov, I.Yu. Vichev, R.R. Gayazov, A.S. Grushin, L.A. Dorokhin, V.V. Ivanov, D.A. Kim, K.N. Koshelev, P.V. Krainov, M.S. Krivokorytov, V.M. Krivtsun, B.V. Lakatosh, A.A. Lash, V.V. Medvedev, A.N. Ryabtsev, Yu.V. Sidelnikov, E.P. Snegirev, A.D. Solomyannaya, M.V. Spiridonov, I.P. Tsygvintsev, O.F. Yakushev, A.A. Yakushkin. *Phys. Usp.*, **62**, 304 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2018.06.038447]

- [14] I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov, A. Schafgans, Y. Tao, G. Vaschenko, S. Rokitski, M. Kats, M. Vargas, M. Purvis, R. Rafac, B. La Fontaine, S. De Dea, A. La Forge, J. Stewart, S. Chang, M. Graham, D. Riggs, T. Taylor, M. Abraham, D. Brown. *Adv. Opt. Technol.*, **6**, 173 (2017). DOI: 10.1515/aot-2017-0029
- [15] D.T. Elg, J.R. Sporre, D. Curreli, I.A. Shchelkanov, D.N. Ruzic, K.R. Umstadter. *J. Micro Nanolithogr., MEMS MOEMS*, **14**, 013506 (2015). DOI: 10.1117/1.JMM.14.1.013506
- [16] D. Bleiner, T. Lippert. *J. Appl. Phys.*, **106**, 123301 (2009). DOI: 10.1063/1.3271142
- [17] E.A. Vishnyakov, A.V. Shcherbakov, A.A. Pertsov, V.N. Polkovnikov, A.E. Pestov, D.E. Pariev, N.I. Chkhalo. *Proc. SPIE*, **10235**, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, 102350W (2017). DOI: 10.1117/12.2264814
- [18] S.S. Churilov, R.R. Kildiyarova, A.N. Ryabtsev, S.V. Sadovsky. *Phys. Scr.*, **80** (4), 045303 (2009). DOI: 10.1088/0031-8949/80/04/045303
- [19] T. Otsuka, D. Kilbane, J. White, T. Higashiguchi, N. Yugami, T. Yatagai, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, G. O'Sullivan. *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 111503 (2010). DOI: 10.1063/1.3490704
- [20] D.B. Abramenko, V.S. Bushuev, R.R. Gayazov, V.M. Krivtun, M.V. Spiridonov, A.M. Chekmarev, O.F. Yakushev, K.N. Koshelev. *Proc. 17 Int. Symp. Nanophysics & Nanoelectronics*, **1**, 261 (2013).
- [21] T. Otsuka, B. Li, C. O'Gorman, T. Cummins, D. Kilbane, T. Higashiguchi, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, G. O'Sullivan. *Proc. SPIE*, **8322**, 832214 (2012).
- [22] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (6), 063103 (2020). DOI: 10.1063/1.5144489
- [23] A.O. Kolesnikov, E.A. Vishnyakov, E.N. Ragozin, A.N. Shatokhin. *Quant. Electron.*, **50** (10), 967 (2020). DOI: 10.1070/QEL17350
- [24] A.H. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. *Опт. и спектр.*, **129** (2), 2021. DOI: <https://ojs.ioffe.ru/index.php/os/article/view/1449>
- [25] V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo. *Physics-Uspekhi*, **63** (1), 83–95 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2019.05.038623
- [26] N.I. Chkhalo, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.A. Shaposhnikov, I.L. Stroulea, M.V. Svechnikov, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. *Thin Solid Films*, **631**, 106 (2017). DOI: 10.1016/j.tsf.2017.04.020
- [27] N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, E.B. Kluev, S.V. Kuzin, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, S.Yu. Zuev. *Appl. Opt.*, **55** (17), 4683 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.004683
- [28] N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, S.Yu. Zuev, N.N. Tsybin. *Thin Solid Films*, **653**, 359 (2018). DOI: 10.1016/j.tsf.2018.03.051
- [29] M.S. Bibishkin, D.P. Chekhonadskih, N.I. Chkhalo, E.B. Kluyenkov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Proc. SPIE*, **5401**, 8 (2004). DOI: 10.1117/12.556949
- [30] M. Svechnikov, D. Pariev, A. Nechay, N. Salashchenko, N. Chkhalo, Y. Vainer, D. Gaman. *J. Appl. Cryst.*, **50**, 1428 (2017). DOI: 10.1107/S1600576717012286
- [31] P.N. Aruev, M.M. Barysheva, B.Ya. Ber, N.V. Zabrodskaya, V.V. Zabrodskii, A.Ya. Lopatin, A.E. Pestov, M.V. Petrenko, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, V.L. Sukhanov, N.I. Chkhalo. *Quant. Electron.*, **42** (10), 943 (2012). DOI: 10.1070/QE2012v042n10ABEH014901