

04

Исследование и создание широкополосных рентгеновских зеркал со спектральной полосой пропускания, совпадающей с эмиссионными линиями и возможностью фильтрации

© С.А. Гарахин, И.С. Дубинин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

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

Поступило в Редакцию 27 апреля 2022 г.
В окончательной редакции 27 апреля 2022 г.
Принято к публикации 27 апреля 2022 г.

Рассмотрены методы оптимизации структуры стековых рентгеновских зеркал для различных приложений. Особое внимание уделено сравнению методик оптимизации в зависимости от специфики конкретной задачи. Рассмотрены широкополосные многослойные рентгеновские зеркала на основе структур Mo/Be и Mo/Si с полосой пропускания, совпадающей с эмиссионными линиями Si $L\alpha$ (13.5 nm) и Sn (13.5 nm). Проведено сравнение аperiodического и стекового дизайнов. Описана методика расчетов стековых зеркал, предназначенных для изучения солнечной короны с дополнительной возможностью фильтрации близкорасположенных спектральных линий. В качестве примера рассмотрена структура Mg/Be с защитным фильтрующим покрытием на основе Mo/Si.

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

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52770.118-22

Введение

В настоящее время большой интерес представляют такие оптические элементы, как рентгеновские зеркала. Они применяются для работы с рентгеновским излучением (коллимация, передача, управление пучками электромагнитного излучения). Эти зеркала используются в качестве отражающих элементов как для мягкого, так и для жесткого рентгеновского излучения. Их применяют в таких областях науки, как рентгеновская астрономия, диагностика плазмы, рентгенофлуоресцентный анализ и многое другое.

Рентгеновские зеркала представляют собой многослойную структуру из чередующихся пленок материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости, осажденную на сверхгладкую подложку.

Подбор материалов зеркал и их толщин, оптимизируемых для конкретного поддиапазона длин волн, дает высокий пиковый коэффициент отражения от такой структуры на выбранной длине волны. Наряду с оптическими свойствами материалов, на характеристики зеркал оказывает влияние и качество такой структуры, которое, как правило, зависит от условий синтеза зеркал. Если рассматривать периодические структуры, то в этом случае речь идет о постоянстве периода.

Серьезным препятствием для применения периодических зеркал в экстремально ультрафиолетовой (ЭУФ) области является их ограниченный спектральный диапазон. Спектральная ширина на половине высоты для периодического зеркала зачастую покрывает только

небольшую часть выходного сигнала некоторых ЭУФ источников. Эта проблема решается за счет использования широкополосных зеркал [1–3]. Однако увеличение полосы пропускания неизбежно связано с уменьшением максимальной пиковой отражательной способности. В случае, когда максимальная пиковая отражательная способность не требуется, разумно использовать широкополосные зеркала.

Подобные структуры часто применяются в ЭУФ метрологии, астрономии и микроскопии. Использование таких зеркал в сочетании с широкополосным плазменным источником может обеспечить более высокую эффективность системы и собрать больше излучения от источника. Таким образом, использование аperiodических структур позволяет удовлетворять иным условиям, необходимым в рамках конкретной задачи. Например, расширение углового [4,5] или спектрального [6,7] рабочего диапазона, повышение интегрального коэффициента отражения [8], работа в качестве поляризатора, фильтра [9,10] или управление импульсами электромагнитного излучения субфемтосекундной длительности [11,12]. В каждом из конкретных случаев необходимо накладывать дополнительные условия при оптимизации структуры таких зеркал.

1. Методика оптимизации аperiodического зеркала

Инжиниринг широкополосных зеркал, удовлетворяющих какому-либо наперед заданному критерию, входит

Таблица 1. Рассчитанные характеристики оптимизированных стековых зеркал Mo/Be

Характеристики	Периодическое зеркало	Стек 1 (первая оптимизированная структура Mo/Be)	Стек 2 (вторая оптимизированная структура Mo/Be)
$R_{peak}, \%$	68	45.9	34.5
$R_{integral}, \text{\AA}$	5.48	7.02	7.08
FWHM, \AA	6.19	17.31	21.09

в класс задач на оптимизацию и чаще всего решается при помощи генетического алгоритма. На первом этапе определяется целевая функция F_{gf} . Для различных зеркал задавались целевые функции специального вида, выделяющие нужную область по длинам волн $R(\lambda)$ или углам $R(\theta)$. Далее вводится норма отличия коэффициента отражения от F_{gf} — оценочный функционал F , вычисляемый в области определения F_{gf} и представляющий собой функцию N переменных (в данном случае в качестве подгоночных параметров использовались толщины слоев структуры). Затем находится оптимальная структура слоев путем минимизации функционала [6,7].

$$F = \int [R(\lambda) - F_{gf}]^2 d\lambda.$$

Исходными структурами для первого шага являются периодические зеркала с максимумом отражения при длине волны, соответствующей максимуму эмиссионной линии. Процесс оптимизации осуществлялся с заданными реальными шероховатостями. В любой задаче на оптимизацию есть проблема возможного попадания в локальные минимумы. Поэтому необходимо запускать оптимизацию многократно, а потом выбрать лучшую структуру. Но даже при этом достижение глобального минимума не гарантировано, однако для практики достаточно и решения в близком к глобальному локальном минимуме. При этом процедуру оптимизации требуется запускать многократно для отбора максимально пригодного решения. Методика оптимизации подробно описана в [13,14].

2. Стековые зеркала Mo/Be и Mo/Si со спектральной полосой пропускания, совпадающей с эмиссионными линиями олова и кремния

В настоящее время на основе эмиссионной линии олова разрабатывается источник излучения на длине волны 13.5 nm [15]. Актуальна задача максимального сбора такого излучения. Требуется рассчитать и синтезировать рентгеновское зеркало, которое бы захватывало максимум излучения от источника.

По описанной выше методике были рассчитаны стековые зеркала на основе структуры Mo/Be, которая уже продемонстрировала свою перспективность для создания широкополосных стековых зеркал [16]. В качестве целевой функции задавалась форма эмиссионной линии. Оптимизация проводилась в программе Multifitting [17]. Оптимизированные зеркала состоят из трех периодических структур и обеспечивают максимальный интегральный коэффициент отражения. Два лучших варианта структуры, а также сравнение их параметров с периодическим случаем, представлены в табл. 1.

Интегральная отражательная способность для стековых зеркал примерно на 30% выше, чем периодического (рис. 1). С учетом захвата эмиссионной линии Sn это даст прирост итоговой интенсивности около 6%.

В силу того что прямого доступа к источнику на основе индий-олова в настоящий момент еще нет, методика отработки создания стекового зеркала велась нами для источника на основе рентгеновской трубки на линии Si 13.5 nm. Таким образом, задача стояла в расчете и синтезе зеркала, коэффициент которого повторяет форму эмиссионной линии кремния с максимумом на 13.5 nm. Из-за особых технологических ограничений, которые

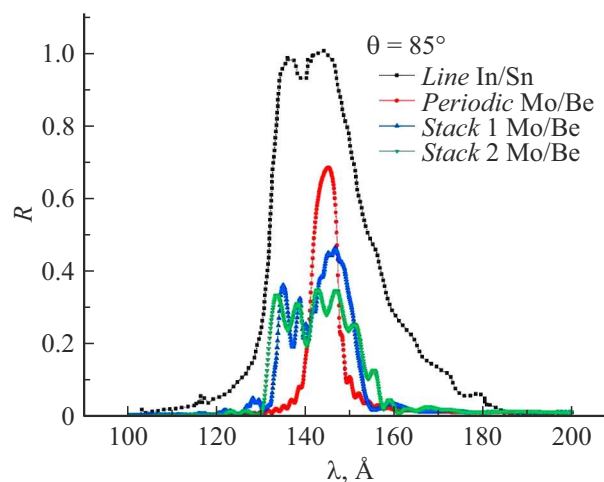


Рис. 1. Эмиссионная линия In/Sn, Stack 1 и Stack 2 — лучшие оптимизированные структуры Mo/Be, состоящие из трех периодических зеркал, которые обеспечивают максимальный интегральный коэффициент отражения. Зависимость Periodic Mo/Be добавлена для сравнения с периодическим случаем.

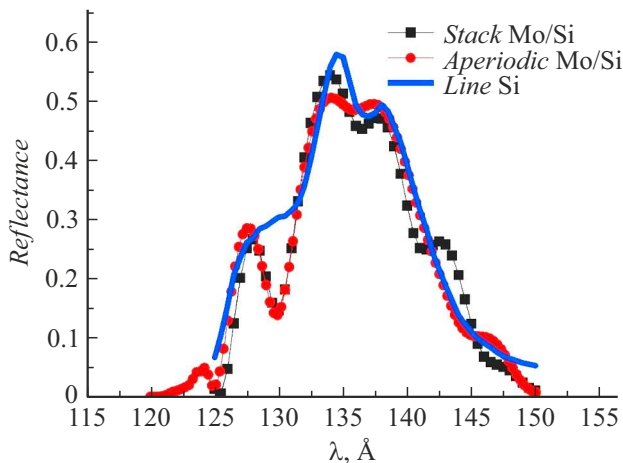


Рис. 2. $R(\lambda)$ стекового и аперидического зеркала, повторяющие профиль эмиссионной линии Si (13.5 nm).

Таблица 2. Параметры стековой структуры Mo/Si. Нумерация стеков от подложки

Стек	1	2	3
N (количество слоев)	11	9	11
Mo	2.9 nm	3.4 nm	3.5 nm
Si	3.7 nm	3.4 nm	3.7 nm

налагаются на работу с Be (специальная лаборатория, вредность), тестирование методики проводилось на классической структуре Mo/Si.

Результаты оптимизации приведены на рис. 2. Рассматривался как стековый, так и аперидический дизайн. Результирующий коэффициент отражения достаточно точно повторяет форму эмиссионной линии Si, при этом структура стекового зеркала гораздо более проста — всего три периодических зеркала (табл. 2 — нумерация от подложки).

3. Синтез стекового зеркала Mo/Si. Калибровка параметров осаждения

Образцы многослойных зеркал Mo/Si изготавливались методом магнетронного напыления в атмосфере аргона при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Torr; в качестве подложек использованы кремниевые пластины для микроэлектронной промышленности [18]. Подробное описание технологической установки содержится в [19]. По данным малоугловой рентгеновской дифракции, полученным с использованием дифрактометра PANalytical X'Pert Pro (длина волны 0.154 nm), решается обратная задача, в результате которой с высокой точностью определяются параметры синтеза толщин слоев. На рабочей длине волны зеркала изучались на разработанном в ИФМ

РАН рефлектометре, в котором монохроматизация излучения осуществляется с помощью высокоразрешающего спектрометра Черни-Тернера с плоской дифракционной решеткой, двумя сферическими коллимирующими зеркалами и лазерно-плазменным источником излучения [20].

Для ускорения процесса калибровки напылялись структуры Mo/Si, которые состоят из двух, а не из трех периодических структур, с фиксированной толщиной одного материала.

Такой подход к калибровке толщин слоев позволяет значительно сократить время работ над конкретным зеркалом, так как позволяет за одно напыление откалибровать три толщины вместо двух.

4. Экспериментальные результаты

На рис. 3 приведено результирующее отражение стекового зеркала и сравнение с периодическим зеркалом. Выигрыш в интегральном коэффициенте отражения, составивший около 24%, близок к теоретическим расчетам.

На рис. 4, а представлена нормированная на единицу эмиссионная линия Si и зависимость коэффициента отражения зеркала для периодического и стекового случаев. Результирующее отражение, попадающее на детектор, будет представлять собой свертку этих двух функций. На рис. 4, б эмиссионная линия нормирована на максимум коэффициента отражения широкополосного зеркала для демонстрации соответствия их профилей.

Выигрыш по сигналу для стекового зеркала по сравнению с периодическим зеркалом составил примерно 6%. Таким образом, применение стековых зеркал уместно для односторонних схем. Однако для многосторонних схем, например, для случая рентгеновской литографии, где может применяться до 9–12 зеркал, такие стековые

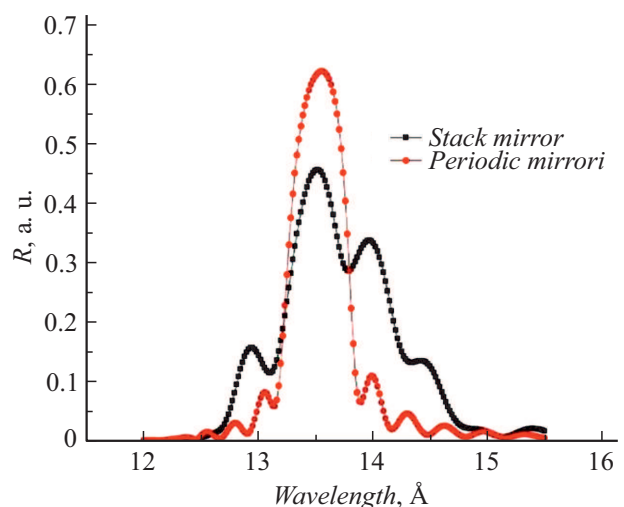


Рис. 3. Сравнение измеренных коэффициентов отражения для периодической и стековой Mo/Si-структур.

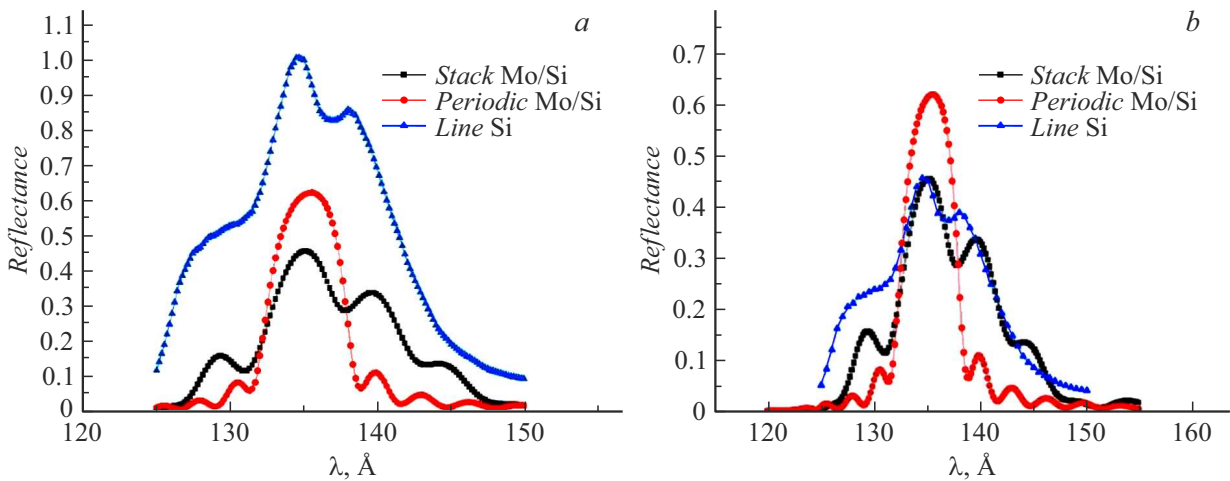


Рис. 4. Расчет эффективности захвата эмиссионной линии Si. *a* — расчет для нормированного на единицу случая, *b* — показано, насколько профиль коэффициента отражения соответствует профилю эмиссионной линии Si.

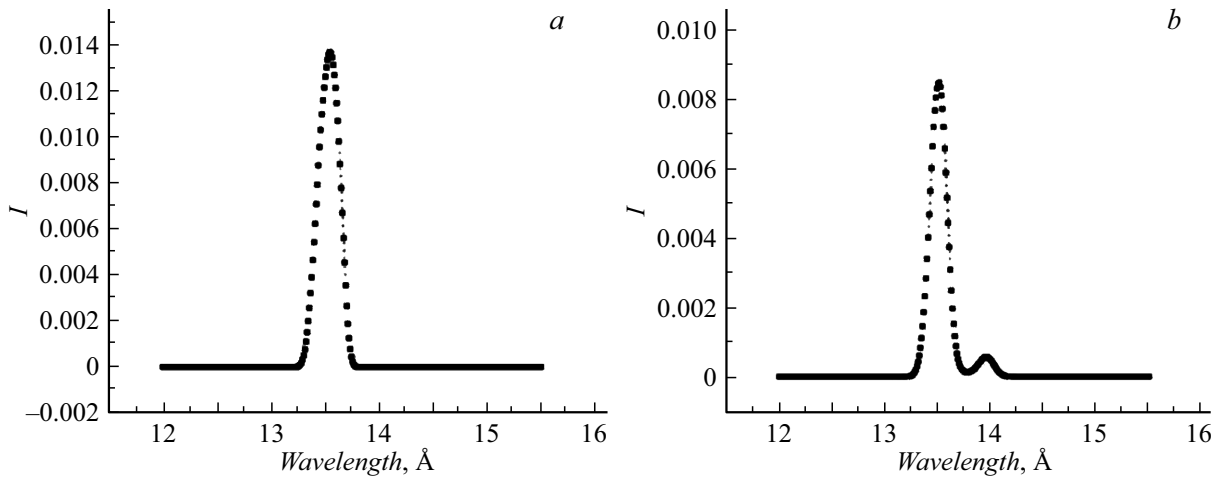


Рис. 5. Результирующий коэффициент отражения для девятизеркальной системы. *a* — использование периодических зеркал в девятизеркальной схеме, *b* — использование стековых зеркал в девятизеркальной схеме.

зеркала не дадут преимуществ, так, в этом случае работает лишь очень узкий спектральный диапазон (рис. 5).

5. Оптимизация дизайна стековых зеркал с возможностью фильтрации близкорасположенных спектральных линий

В разд. 5 показано, как существенно изменяются условия оптимизации для аperiodического (стекового) зеркала при рассмотрении другой сферы применения. Для ряда задач требуются определенные условия на фильтрующие свойства рентгеновских зеркал [21]. Так, существует задача о выделении максимума сигнала на определенной длине волны, например, линии Fe-XV (28.4 nm) в солнечной плазме [22]. С такой задачей хорошо справляется зеркало на основе магния, оно

показывает более высокий коэффициент отражения на этой длине волны по сравнению с другими парами материалов (рис. 6).

Проблема заключается в том, что, во-первых, идет частичный захват соседней линии 30.4 nm — паразитный сигнал, который нужно подавить, поэтому требуется разработать зеркало, которое будет выступать в качестве фильтра, а именно получать максимум информации от полезного сигнала, и подавлять паразитный сигнал. Во-вторых, существенным недостатком зеркал на основе магния является временная нестабильность их отражательных характеристик. Магний — активный материал, подверженный окислению при хранении в комнатных условиях. И если в массивном образце процессы окисления могут быть остановлены в тонком приповерхностном слое, то в тонкопленочных системах сдержать их чрезвычайно трудно. Поэтому важнейшей проблемой

магниевого многослойного структур является разработка защитных покрытий.

В работе [23] авторами был предложен метод оптимизации фильтрующих стековых рентгеновских зеркал, позволяющий минимизировать вклад шума от близкорасположенных спектральных линий в измеренный полезный сигнал. Примененный метод состоит в добавлении подходящего слоя, покрывающего многослойную структуру, который минимально влияет на пик отражательной способности, одновременно подавляя нежелательное излучение от относительно близких линий. Ниже будет показано, что при этом он может выступать еще и в качестве защитного слоя, если оптимизирован на основе стабильной по времени многослойной структуре.

Главная идея метода состоит в рассмотрении распространения падающей и отраженной стоячих волн в структуре от целевой и паразитных линий (рис. 7).

В зависимости от задачи покрывающий слой может быть реализован с использованием многослойной стековой или аперидической структуры (вплоть до одного слоя) из различных материалов, например, для получения дополнительных механических или оптических

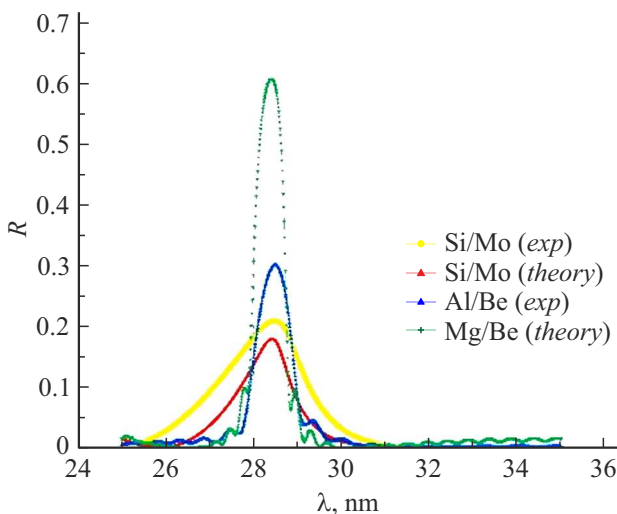


Рис. 6. Сравнение коэффициентов отражения различных периодических структур для спектральной области вблизи 28.4 nm.

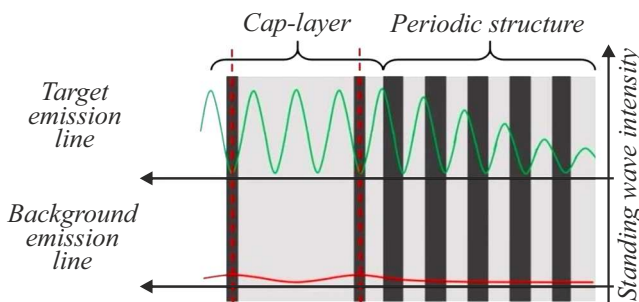


Рис. 7. Принцип разработки фильтрующего слоя для сигнала от паразитной эмиссионной линии [21].

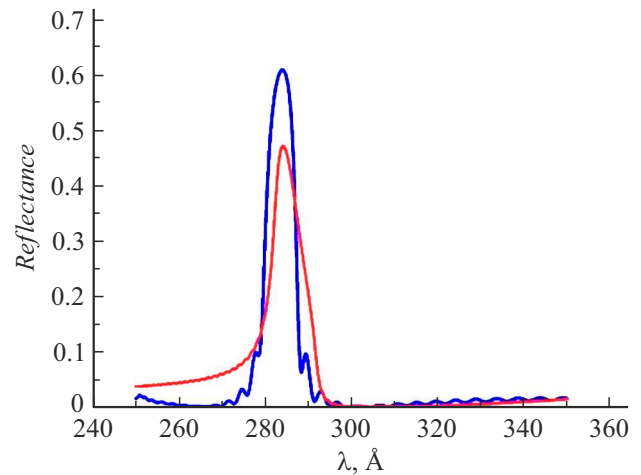


Рис. 8. Фильтрующее зеркало Mg/Be с защитным фильтрующим покрытием (красная кривая (в онлайн версии)) и периодическая структура (синяя кривая (в онлайн версии)).

свойств, таких, как временная стабильность для структур Mg/Be, которые в отсутствие защитного покрытия окисляются со временем. Оптимизация была выполнена в программе IMD [24]. Результаты представлены на рис. 8.

Фильтрация эмиссионной линии 30.4 nm осуществляется на уровне 10^{-4} – 10^{-5} . При этом коэффициент отражения на целевой длине волны 28.4 nm упал не столь значительно.

Заключение

Аперидические и стековые многослойные зеркала позволяют достаточно существенно расширить сферы применения классических периодических зеркал. В зависимости от задачи методика оптимизации таких структур может существенно отличаться.

По итогам работы:

1) Рассчитаны стековые структуры Mo/Be, оптимизированные на максимум интегрального коэффициента отражения, для захвата излучения от источника на основе Sn. Выигрыш в интегральном коэффициенте отражения для стековых зеркал по сравнению с периодическими составил примерно 30%. С захватом эмиссионной линии это даст прирост примерно на 6%.

2) В силу отсутствия доступа к Sn-источнику, для обработки методики были рассчитаны Mo/Si стековые и аперидические зеркала для захвата эмиссионной линии Si. Были изготовлены стековое и периодическое зеркала, максимально захватывающие излучение от линии Si. Выигрыш в интегральном коэффициенте отражения для стекового зеркала по сравнению с периодическим составил 24% что немного ниже теоретически рассчитанного. Выигрыш по сигналу составил около 5–6%. Для случая Sn-источника и Mo/Be-зеркала ожидается такой же выигрыш по сигналу.

3) Сделан общий вывод по актуальности широкополосных зеркал для одно- и многозеркальных схем. Показано, что для литографических установок, содержащих до 9–12 зеркал, стековые зеркала использовать нецелесообразно. Однако широкополосные зеркала дают выигрыш для однозеркальных систем.

4) Для демонстрации сильного различия методики оптимизации в зависимости от задачи и области применения стековых зеркал описан принцип структур, способных не только отражать целевую длину волны, но и подавлять фоновое излучение от близкорасположенных линий. Такие стековые зеркала со специально оптимизированным покровным слоем способны служить эффективными фильтрующими элементами.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-02-00708 и Государственного задания 0030-2021-0022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.А. Вишняков, А.О. Колесников, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин, А.Н. Шатохин. *Апериодические элементы в оптике мягкого рентгеновского диапазона* (Физматлит, М., 2018), с. 136.
- [2] A.L. Aquila, F. Salmassi, F. Dollar, Y. Liu, E.M. Gullikson. *Opt. Express*, **14** (21), 10073 (2006).
- [3] K. Tamura, H. Kunieda, Y. Miyata, T. Okajima, T. Miyazawa, A. Furuzawa, H. Awaki, Y. Haba, K. Ishibashi, M. Ishida, Y. Maeda, H. Mori, Y. Tawara, S. Yamauchi, K. Uesugi, Y. Suzuki. *J. Astronom. Telescopes, Instruments, Systems*, **4** (1), 011209 (2018).
- [4] A.E. Yakshin, I.V. Kozhevnikov, E. Zoethout, E. Louis, F. Bijkerk. *Opt. Express*, **18** (7), 6957 (2010).
- [5] I.V. Kozhevnikov, A.E. Yakshin, F. Bijkerk. *Opt. Express*, **23** (7), 9276 (2015).
- [6] Н.Н. Колачевский, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин. *Квант. электрон.*, **30** (5), 428 (2000).
- [7] Е.А. Вишняков, Ф.Ф. Каменец, В.В. Кондратенко, М.С. Лугинин, А.В. Панченко, Ю.П. Першин, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин. *Квант. электрон.*, **42** (2), 143 (2012).
- [8] P. Van Loevezijn, R. Schlatmann, J. Verhoeven, B.A. Van Tiggelen, E.M. Gullikson. *Appl. Opt.*, **35** (19), 3614 (1996).
- [9] Z. Wang, H. Wang, J. Zhu, F. Wang, Z. Gu, L. Chen, A.G. Michette, A.K. Powell, S.J. Pfauntsch, F. Schafers. *J. Appl. Phys.*, **99** (5), 056108 (2006).
- [10] Z. Wang, H. Wang, J. Zhu, Y. Xu, S. Zhang, C. Li, F. Wang, Z. Zhang, Y. Wu, X. Cheng, L. Chen, A.G. Michette, A.K. Powell, S.J. Pfauntsch, F. Schafers, A. Gaupp, M. MacDonald. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (24), 241120 (2007).
- [11] И.Л. Бейгман, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин. *Письма в ЖЭТФ*, **7** (3), 167 (2001).
- [12] I.L. Beigman, A.S. Pirozhkov, E.N. Ragozin. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4**, 433 (2002).
- [13] T. Kuhlmann, S. Yulin, T. Feigl, N. Kaiser, H. Bernitzki, H. Lauth. *Proc. SPIE*, **4688**, 509 (2002).
- [14] М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало, Е. Meltchakov. *ЖТФ*, **89** (11), 1763 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52770.118-22
- [15] 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. Лакатош, 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), 330 (2019).
- [16] М.М. Barysheva, S.A. Garakhin, A.O. Kolesnikov, A.S. Pirozhkov, V.N. Polkovnikov, E.N. Ragozin, A.N. Shatokhin, R.M. Smertin, M.V. Svechnikov, E.A. Vishnyakov. *Opt. Mater. Express*, **11**, 3038 (2021). DOI: 10.1364/OME.434506
- [17] M. Svechnikov. *J. Appl. Crystallog.*, **53** (1), 244 (2020). <https://doi.org/10.1107/S160057671901584X>
- [18] М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер, Б.А. Грибков, М.В. Зорина, А.Е. Пестов, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салашенко, Н.И. Чхало. *Известия РАН. Серия физическая*, **75** (1), 71 (2011).
- [19] S.S. Andreev, A.D. Akhsakhalyan, M.A. Bibishkin, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. *Centr. Europ. J. Phys.*, **1**, 191 (2003).
- [20] 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). <https://doi.org/10.1063/1.5144489>
- [21] M. Suman, M.G. Pelizzo, D.L. Windt, G. Monaco, S. Zuccon, P. Nicolosi. *Proc. SPIE*, **19** (16), 14838 (2019).
- [22] V.A. Slemzin, F.F. Goryaev, S.V. Kuzin. *Plasma Phys. Reports*, **40** (11), 855 (2014).
- [23] A.J. Corso, M.G. Pelizzo. *Proc. SPIE*, 11116 (2019). DOI: 10.1117/12.2530208
- [24] D.L. Windt. *Comput. Phys.*, **12**, 360 (1998).