

## Многослойные рентгеновские зеркала на основе бора для спектрального диапазона 6.7–9 nm

© Р.А. Шапошников, Н.В. Загайнов, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев

Институт физики микроструктур РАН,  
603087 Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., Россия  
e-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2024 г.

Принято к публикации 12 апреля 2024 г.

Приведены результаты исследования отражательных характеристик и структурных параметров многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/B<sub>4</sub>C, оптимизированных на рабочий диапазон длин волн 67–90 Å. Приведено сравнение данных структур с зеркалами Mo/B<sub>4</sub>C и La/B<sub>4</sub>C.

**Ключевые слова:** многослойные рентгеновские зеркала, синхротронные приложения, монохроматоры рентгеновского излучения, рентгеновская литография.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58553.119-24

### Введение

Одним из важных практических приложений многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) является проекционная литография. На данный момент проекционная литография на длине волны 193 nm является основным методом, применяемым при производстве микросхем. Однако последние годы для изготовления критических с минимальными размерами слоев стала применяться литография на длине волны 13.5 nm (EUV-extreme ultraviolet). Важными характеристиками литографа являются пространственное разрешение и производительность.

В соответствие с критерием Рэлея минимальный разрешаемый размер объекта равен

$$a_{\min} = \frac{k \cdot \lambda}{NA}, \quad (1)$$

где  $k$  — связанный со свойствами источника излучения и способом засветки маски коэффициент пропорциональности (порядка единицы),  $NA$  — числовая апертура объектива,  $\lambda$  — длина волны излучения. Для улучшения пространственного разрешения можно либо увеличивать  $NA$ , либо осуществлять переход к более коротким рабочим длинам волн. Первый вариант в большей степени связан с технологическими сложностями изготовления соответствующего объектива [1]. В настоящей работе мы рассматриваем только второй вариант.

Производительность системы, в свою очередь, зависит от мощности и спектральных характеристик источника излучения, а также отражательных свойств многослойных зеркал, из которых проектируется оптическая схема литографа.

На практике для корректного сравнения эффективности различных источников и оптических систем, учитывая спектральную ширину полосы пропускания оптиче-

ской системы, используется следующее соотношение [2]:

$$E = R^{10} S(\lambda) \Delta \lambda = R^{10} CE, \quad (2)$$

где  $CE$  — коэффициент конверсии, характеризующий долю полной энергии, потребляемой источником (к примеру, энергии излучения лазера, падающего на мишень), которая излучается в полупространство в спектральную полосу пропускания оптической системы,  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $R(\lambda)$  — зависимость коэффициента отражения от длины волны МРЗ в оптической схеме литографа (степень 10 соответствует системе, состоящей из 10 зеркал). Таким образом,  $CE$  зависит от свойств источника и пропускающей способности системы.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что выбор рабочей длины волны для литографии должен быть осуществлен исходя из двух факторов: наличия многослойных рентгеновских зеркал с высокими коэффициентами отражения на рабочей длине волны, а также наличия эффективных источников излучения. Именно эти факторы являются определяющими при выборе перспективной рабочей длины волны литографии следующего поколения.

В настоящее время при производстве микросхем применяется проекционная литография на рабочей длине волны 135 Å. Для этих целей используются установки серии NXE:3400 от компании ASML, Нидерланды [3]. Анализ свойств источников излучения и многослойных структур показывает, что перспективной длиной волны для литографии следующего поколения может стать длина волны в окрестности 67 Å. Во-первых, в данной спектральной области находится  $K$ -край поглощения бора ( $\lambda_K \sim 66.3$  Å), что позволяет выбрать данный материал в качестве слабопоглощающего для синтеза на его основе эффективных МРЗ [4]. Во-вторых, источники на основе тербия и гадолиния [5,6] могут обеспечить

высокую эффективную мощность системы. В-третьих, в соответствии с формулой (1) переход к данной длине волны при том же значении  $NA$  позволяет вдвое повысить разрешение по сравнению с активно развиваемой литографией с рабочей длиной волны  $135 \text{ \AA}$ .

Другим важным практическим применением МРЗ, оптимизированных на рабочую длину волны  $67 \text{ \AA}$ , является рентгенофлуоресцентный анализ, представляющий собой неразрушающий метод изучения исследуемых объектов. Такой метод может применяться, например, для измерения концентрации примесей бора в алмазе [7], что является важной задачей для развития алмазной электроники. В рамках данного метода излучение источника фокусируется на образец с помощью зеркала-монокроматора, позволяющего из спектра излучения выбрать рабочую длину волны. Далее отраженное от первого зеркала монокроматическое излучение попадает на образец, что приводит к ионизации атомов. Часть вышедшего из образца флуоресцентного излучения захватывается вторым зеркалом-монокроматором и фокусируется на входной щели детектора. Анализ излучения, принятого детектором, позволяет сделать вывод об атомном составе исследуемого образца. Для эффективной работы прибора необходимо обеспечить максимально возможный коэффициент отражения многослойных зеркал в оптической схеме.

Еще одним практическим применением МРЗ является разработка монокроматоров для станций синхротронного излучения, где в качестве оптических элементов, обеспечивающих монокроматизацию пучка, используются МРЗ [8]. В данном случае требуется обеспечить не только высокий коэффициент отражения, но и высокую степень монокроматизации излучения ( $\Delta\lambda/\lambda$  обычно лучше, чем 1%), причем в широком спектральном диапазоне. Это приводит к необходимости синтеза структур с узкой полосой пропускания, как и в случае использования многослойных рентгеновских зеркал в задачах спектроскопии [9].

Для применения МРЗ в качестве отражательных элементов в оптической схеме литографа необходимо, чтобы они обеспечивали максимально возможный интегральный (т.е. с учетом спектральной полосы пропускания) коэффициент отражения, так как от этого зависит время засветки фоторезиста, а следовательно, время, затрачиваемое на производство микросхем. Для задач спектроскопии, напротив, требуется как можно более узкая спектральная ширина пика отражения.

На рис. 1 представлены теоретические зависимости пикового значения коэффициента отражения (рис. 1, *a*) и спектральной полосы пропускания (рис. 1, *b*) для идеальных (т.е. без шероховатостей и с табличными значениями плотностей материалов) МРЗ на основе различных материалов в диапазоне от  $60$  до  $90 \text{ \AA}$ .

Из представленных зависимостей видно, что наибольший пиковый коэффициент отражения  $80\%$  (в окрестности длины волны  $67 \text{ \AA}$ ) позволяют получить структуры на основе пары материалов лантана и бора. Замена бора

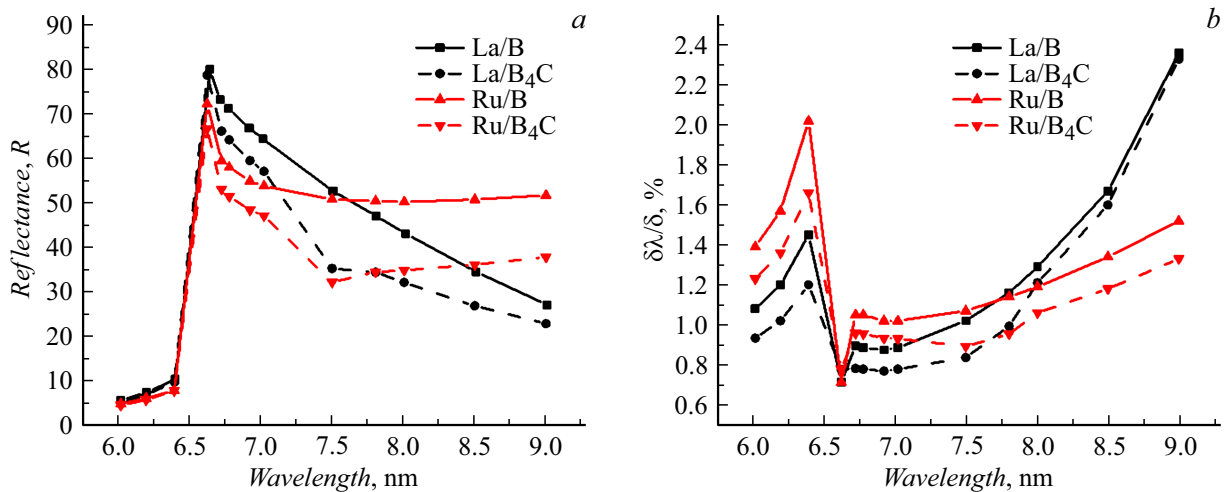
на оптически близкий карбид бора снижает коэффициент отражения для всех рассматриваемых структур. Зеркала на основе Ru позволяют достичь более высоких коэффициентов отражения, чем структуры на основе La при рабочих длинах волн, больше  $78 \text{ \AA}$ . Этот диапазон интересен как для рентгенофлуоресцентного анализа, так и для создания монокроматоров на синхротронных станциях. Таким образом, зеркала на основе La и Ru могут рассматриваться как перспективные для решения ряда практических задач.

Наиболее изученными являются МРЗ на основе La. Важно отметить, что известные на данный момент экспериментально полученные коэффициенты отражения для La/B и La/B<sub>4</sub>C многослойных рентгеновских зеркал существенно уступают теоретическим. Одним из главных факторов, определяющих отличие экспериментальных и теоретических результатов, является наличие протяженных границ между слоями в силу взаимной диффузии и химической активности материалов, а также наличие в структурах межслоевых шероховатостей. В настоящей работе был получен коэффициент отражения  $R = 40\%$  на длине волны  $66.6 \text{ \AA}$  для La/B<sub>4</sub>C многослойного зеркала с периодом  $d = 33.5 \text{ \AA}$  [10]. В работе [11] был использован один из распространенных методов уменьшения величины межслоевых интерфейсов и шероховатостей — добавление в структуру барьерных слоев. При нанесении прослоек углерода с толщиной  $2.5\text{--}3 \text{ \AA}$  на более протяженную границу La-on-B<sub>4</sub>C был получен коэффициент отражения  $58.6\%$  для La/B<sub>4</sub>C/C-структур на длине волны  $66.6 \text{ \AA}$  при угле скольжения  $69.1 \text{ deg}$ .

Другим методом уменьшения величины интерфейсов является нитридизация слоев La, что может быть осуществлено путем напуска газа N<sub>2</sub> во время синтеза структур. В статье [12] исследовались отражательные характеристики La/B<sub>4</sub>C-, LaN/B<sub>4</sub>C- и La/C/B<sub>4</sub>C-структур, оптимизированных на рабочую длину волны  $67 \text{ \AA}$ . В ходе экспериментов были получены значения коэффициента отражения. Для La/B<sub>4</sub>C:  $R = 51.1\%$  при угле падения  $10 \text{ deg}$  и периоде  $d = 34 \text{ \AA}$ . Для LaN/B<sub>4</sub>C:  $R = 58.1\%$  при угле падения  $10 \text{ deg}$  и периоде  $d = 34 \text{ \AA}$ . Из полученных результатов следует, что нитридизация слоев La позволила существенно увеличить коэффициент отражения. Добавление прослоек углерода также позволило повысить отражательную способность структур. Для структуры La/C/B<sub>4</sub>C (прослойка углерода на поверхности слоев лантана) был получен коэффициент отражения  $R = 56.8\%$  при угле падения  $10 \text{ deg}$ .

Лучшие результаты с точки зрения коэффициента отражения для зеркал на основе лантана были получены в работе [13]. В статье авторы приводят значение коэффициента отражения  $R = 64.1\%$  для LaN/B-структур при угле падения  $1.5 \text{ deg}$  от нормали и длине волны  $66.5 \text{ \AA}$ .

Стоит отметить, что на данный момент приведенное выше значение коэффициента отражения является рекордным среди полученных экспериментально. При этом оно существенно уступает предельному теоретически



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента отражения (а) и спектральной селективности (б) для идеальных структур La/B (черная сплошная кривая), La/B<sub>4</sub>C (черная штриховая кривая), Ru/B (красная сплошная кривая), Ru/B<sub>4</sub>C (красная штриховая кривая) в диапазоне 6–9 нм при угле скольжения излучения 90 deg.

возможному  $R_{th} = 80\%$ . Можно отметить, что в литературе отсутствуют данные об отражательной способности зеркал La/B и La/B<sub>4</sub>C в диапазоне длин волн  $\lambda > 67 \text{ \AA}$ .

Менее изученным является вопрос о рутений-содержащих зеркалах. Имеется относительно небольшое количество работ о структурах Ru/B<sub>4</sub>C, и полностью отсутствует информация о Ru/B. При этом даже для Ru/B<sub>4</sub>C нет данных об отражательной способности в рассматриваемом спектральном диапазоне.

В работе [14] было исследовано влияние отжига на Ru/B<sub>4</sub>C- и Ru/C-структуры с периодами  $d = 35 \text{ \AA}$ . Показано, что отжиг при температуре 600°C в течение 1 h привел к увеличению шероховатостей Ru/C-структур, в то время как шероховатости Ru/B<sub>4</sub>C- структур практически не изменились.

В работе [15] исследуется влияние отжига при температуре 200°C на внутренние напряжения Ru/B<sub>4</sub>C-структур. Показано, что увеличение времени отжига приводит к снижению величины внутренних напряжений при любой доле рутения в периоде структуры.

В работе [16] исследовалось влияние отжига на Ru/B<sub>4</sub>C-структуры с периодами  $d = 39 \text{ \AA}$ . Измерение угловой зависимости коэффициента отражения при энергии излучения 20 keV показало отсутствие снижения коэффициента отражения в первом брэгговском пике при отжиге структуры при температуре 550°C.

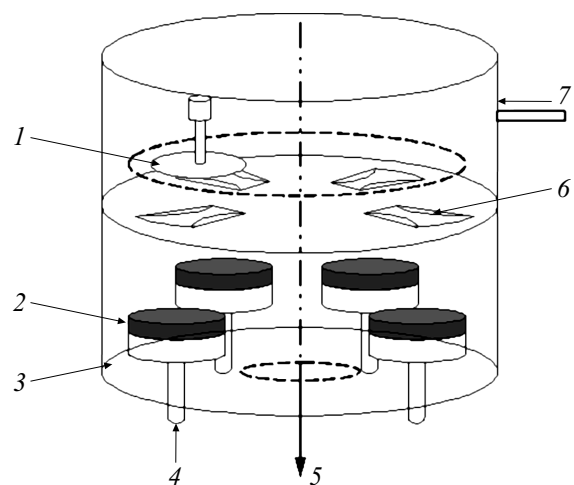
В работе [17] изучались Ru/B<sub>4</sub>C-структуры, синтезированные в смеси аргона и азота. Показано, что добавление азота позволяет существенно снизить внутренние напряжения в структуре и увеличить коэффициент отражения. Так, структуры, синтезированные при парциальном давлении азота 15%, имели практически нулевой стресс (–28 МПа), а также существенно более высокий коэффициент отражения — 67% при энергии излучения 8.04 keV, в то время как структуры, синтезированные в чистом аргоне, — 54%.

Стоит отметить, что в указанных выше работах Ru/B<sub>4</sub>C-структуры изучались в области жесткого рентгеновского излучения. Однако вопрос синтеза и исследования многослойных зеркал на основе рутения в области мягкого рентгеновского диапазона длин волн остается открытым.

В настоящей работе изучались отражательные свойства и структурные параметры МРЗ Ru/B<sub>4</sub>C.

## 1. Методика эксперимента

Исследуемые в настоящей работе многослойные зеркала синтезировались методом магнетронного распыления на установке [18], схема которой представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 — подложка с двигателем, 2 — мишень, 3 — магнетрон, 4 — охлаждение, 5 — система откачки, 6 — фигурные диафрагмы, 7 — подача аргона в камеру.

Данная установка представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру, высотой 0.5 м и диаметром 0.8 м, оснащенную четырьмя магнетронами планарного типа, на которых находятся мишени распыляемого вещества. В ходе технологического процесса подложка поочередно проходит над каждым магнетроном, что позволяет в ходе одного рабочего процесса послойно наносить до 4 различных веществ в одной структуре. Между подложкой и магнетронами находятся фигурные диафрагмы. Форма диафрагм задает распределение распыляемого вещества на подложке. В зависимости от задач может требоваться обеспечить как равномерное распределение вещества по поверхности, так и распределение с заданным законом. Круговое движение подложки обеспечивается шаговым двигателем. Скорость прохождения подложки над магнетронами позволяет определять толщину слоя, наносимого на подложку за один проход. Питание магнетронов обеспечивается источниками стабилизированного тока, разработанными в ИФМ РАН. Токи в разряде могут варьироваться от 100 до 1200 мА, напряжения при этом обычно находятся на уровне 200–400 В. Синтез зеркал происходит при давлении остаточных газов в вакуумном объеме на уровне  $10^{-7}$  Торр. При работе с такими химически активными материалами, как стронций и лантан, попадание атмосферных газов в вакуумный объем приводит к быстрой деградации мишеней. Проблема синтеза качественных структур на основе карбида бора также возникает при напуске атмосферного воздуха в рабочий объем. Для решения обозначенных выше проблем установка была оснащена специальным вакуумным шлюзом, отделенным вакуумным затвором от основного объема.

Отражательные характеристики синтезированных образцов измерялись на четырехкристальном дифрактометре Panalitcal X'Pert PRO, который позволяет проводить исследование структур методом малоугловой дифракции. Кроме измерения отражательных характеристик исследуемых структур в области жесткого рентгеновского диапазона ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ), также проводилось измерение коэффициентов отражения в области мягкого рентгеновского диапазона на длинах волн  $\lambda = 9.89, 17.59, 93.4 \text{ \AA}$  на лабораторном рефлектометре, оснащенном монохроматором РСМ-500 [19].

Определение структурных параметров синтезированных образцов осуществлялось с помощью методики, реализованной в программном продукте Multifitting, разработанном в ИФМ РАН [20]. Данная программа позволяет проводить расчет спектральных и угловых зависимостей коэффициента отражения от модельной структуры путем решения системы рекуррентных соотношений, а также осуществлять одновременную подгонку нескольких экспериментальных кривых, снятых в различных спектральных диапазонах. Чем большее количество кривых одновременно обрабатывается программой, тем более близкими к реальным будут являться полученные значения параметров модельной структуры. Поэтому, как правило, для определения структурных параметров синтези-

рованного образца одновременно проводится подгонка кривых отражения, измеренных как в области жесткого, так и мягкого рентгеновского излучения. Параметрами структуры, определяемыми в ходе подгонки, являются ее период, толщины материалов в периоде, ширины переходных областей, плотности материалов. На основании полученных структурных параметров представляется возможным провести расчет отражательных характеристик структуры в других спектральных и угловых диапазонах.

Одним из главных преимуществ данной программы является учет размытия границ слоев в структуре (межслоевых интерфейсов), который задается через суперпозицию функций зависимости профиля диэлектрической проницаемости от координаты вглубь образца. Помимо зеркальных кривых, в программе Multifitting также представляется возможным проводить анализ кривых диффузного рассеяния для разделения вкладов перемешивания слоев и геометрических шероховатостей в кривые отражения.

Кроме отражательных свойств МРЗ Ru/V<sub>4</sub>C в настоящей работе изучались и их механические свойства. А именно внутренние напряжения, возникающие в структурах в процессе роста.

Практически все пленки вне зависимости от способа их получения находятся в состоянии напряжения. Напряжения в пленке (сплошной или многослойной) могут быть растягивающими, когда пленка как бы старается сжаться на подложке — сила противодействует сжатию, „растягивает“ пленку и направлена от центра подложки к периферии. В этом случае принято величине внутренних напряжений приписывать знак „плюс“. Напряжения могут иметь и сжимающий характер — силы направлены от периферии к центру. Тогда принято говорить об отрицательных напряжениях и приписывать им „минус“. При знаке „плюс“ система пленка + подложка принимает вогнутый характер, при знаке „минус“ — выпуклый, пленкой вонне. Наличие внутренних напряжений в многослойных структурах может привести к деформациям формы оптических элементов, что, в свою очередь, может привести к отклонению хода лучей от расчетного.

Для определения внутренних напряжений используется формула Стони

$$\sigma = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{d_{\text{sub}}^2}{d_f} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (3)$$

где  $\sigma$  — напряжения,  $E$  — модуль Юнга материала пластины,  $\nu$  — коэффициент Пуассона материала пластины,  $d_{\text{sub}}$  — толщина подложки,  $d_f$  — толщина пленки,  $R_1$  — исходный радиус кривизны подложки,  $R_2$  — радиус кривизны подложки после осаждения пленки. Таким образом, задача сводится к измерению радиуса кривизны исходной поверхности и радиуса кривизны поверхности после нанесения на нее многослойной структуры.

Определение радиусов кривизны подложек до напыления и подложек с покрытием после напыления

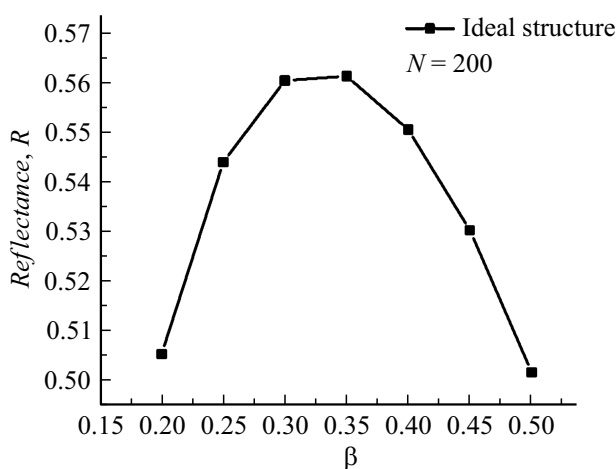
проводилось интерферометрическим методом с помощью лазерного интерферометра Zygo VeriFire 4. Более подробно методика измерения внутренних напряжений описана в [21].

## 2. Результаты и их обсуждение

Первым этапом исследований многослойных структур Ru/V<sub>4</sub>C являлся теоретический расчет зависимости коэффициента отражения от параметра  $\beta$ , который определяется как отношение толщины сильнопоглощающего материала в периоде к величине периода. В данном случае  $\beta = d_{\text{Ru}}/d$ , где  $d_{\text{Ru}}$  — толщина рутения в периоде структуры,  $d$  — период многослойного зеркала. Расчет проводился для идеальных структур с нулевыми межслоевыми шероховатостями, отсутствием дрейфа величины периода и табличными значениями плотностей материалов. Число периодов в данном расчете было выбрано  $N = 200$ . Увеличение числа слоев не приводит к росту коэффициента отражения в силу поглощения падающего излучения структурой. Данный расчет зависимости  $R(\beta)$  представлен на рис. 3. Период структур  $d = 33.7 \text{ \AA}$ , что соответствует случаю нормального падения излучения на длине волны  $67 \text{ \AA}$ . Соответственно величина отражения на рис. 3 приведена для этой длины волны.

Из представленной зависимости можно сделать вывод, что максимальный теоретически возможный коэффициент отражения составляет  $R = 56\%$  и достигается при значениях  $\beta = 0.3-0.35$ . При уменьшении или увеличении данного параметра относительно оптимального значения коэффициент отражения начинает падать. При этом стоит также отметить, что в диапазоне  $\beta = 0.25-0.4$  падение коэффициента отражения не является существенным и составляет величину порядка 2%.

Следующим этапом исследований являлся синтез многослойных структур Ru/V<sub>4</sub>C и исследование их струк-



**Рис. 3.** Теоретическая зависимость коэффициента отражения для идеального МРЗ Ru/V<sub>4</sub>C от параметра  $\beta = d_{\text{Ru}}/d$  на длине волны  $67 \text{ \AA}$ .

Структурные параметры изученных образцов

Период, $\text{\AA}$	$\beta$	S_Ru, $\text{\AA}$	S_V <sub>4</sub> C, $\text{\AA}$
34.45	0.6	1.9	1.9
34.55	0.45	2.3	2.3
35.45	0.33	2.2	2

Примечание. S\_Ru и S\_V<sub>4</sub>C — ширины переходных слоев на границах V<sub>4</sub>C-на-Ru и Ru-на-V<sub>4</sub>C соответственно.

турных параметров. В настоящей работе изучался набор МРЗ Ru/V<sub>4</sub>C с периодами около  $34-35 \text{ \AA}$  и различными значениями  $\beta$ . Их структурные параметры приведены в таблице.

Приведенные в таблице параметры получены подгонкой кривых отражения, снятых на длинах волн  $1.54, 9.89$  и  $17.59 \text{ \AA}$ . На рис. 4 представлен пример такой подгонки для образца с  $\beta = 0.45$ . Здесь приведены экспериментальные зависимости коэффициента отражения от угла скольжения излучения для длин волн  $\lambda = 1.54, 9.89, 17.59 \text{ \AA}$ , а также подгонка экспериментальных данных.

На рис. 5 представлены восстановленные профили действительной части добавки к диэлектрической проницаемости  $\delta$  (где  $\epsilon = 1 - \delta + i\gamma$ ,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость) для образцов с  $\beta = 0.6$  (рис. 5, a),  $0.45$  (рис. 5, b) и  $0.3$  (рис. 5, c).

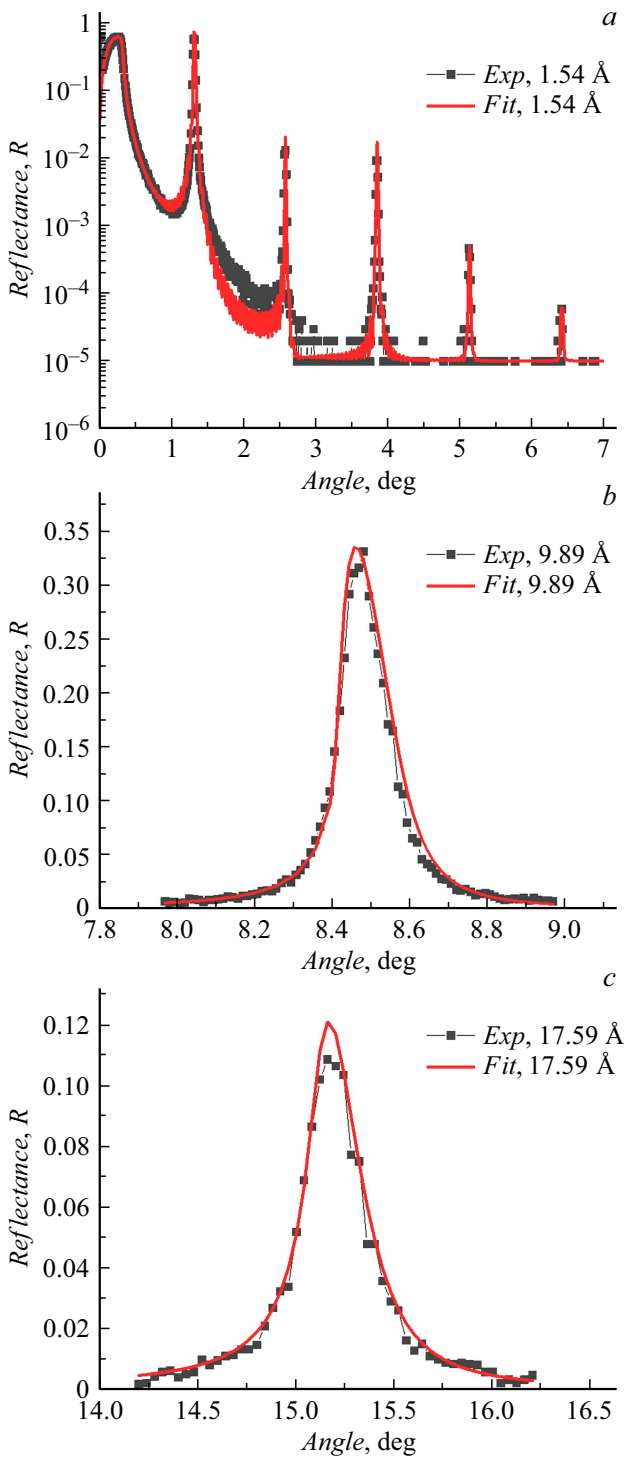
Подгонка экспериментальных данных позволила установить, что значения переходных областей составляют  $2.3 \text{ \AA}$  для обеих границ. Данные значения ширины переходных областей получаются следующим образом. При подгонке экспериментальных данных профиль переходной области задается линейной комбинацией функций с различными весовыми коэффициентами. Значение ширины переходной области, которое приводится в настоящей работе, входит в данные функции в качестве аргумента. В настоящей работе были использованы функция ошибок и линейная функция. Явный вид функций приведен в статье [20]. Эти значения соответствуют полученным ранее для структур Mo/V<sub>4</sub>C [22]. При этом пара материалов Ru/V<sub>4</sub>C обладает лучшими оптическими характеристиками для обеспечения максимального коэффициента отражения, чем Mo/V<sub>4</sub>C в диапазоне длин волн  $6.7-9 \text{ nm}$ . Таким образом, можно заключить, что Ru/V<sub>4</sub>C-структуры могут являться хорошей альтернативой зеркалам на основе Mo/V<sub>4</sub>C.

Определенные при подгонке значения ширины переходных слоев являются достаточно низкими, что исключает необходимость применения методик интерфейсинжиниринга в отличие от La/V<sub>4</sub>C-структур.

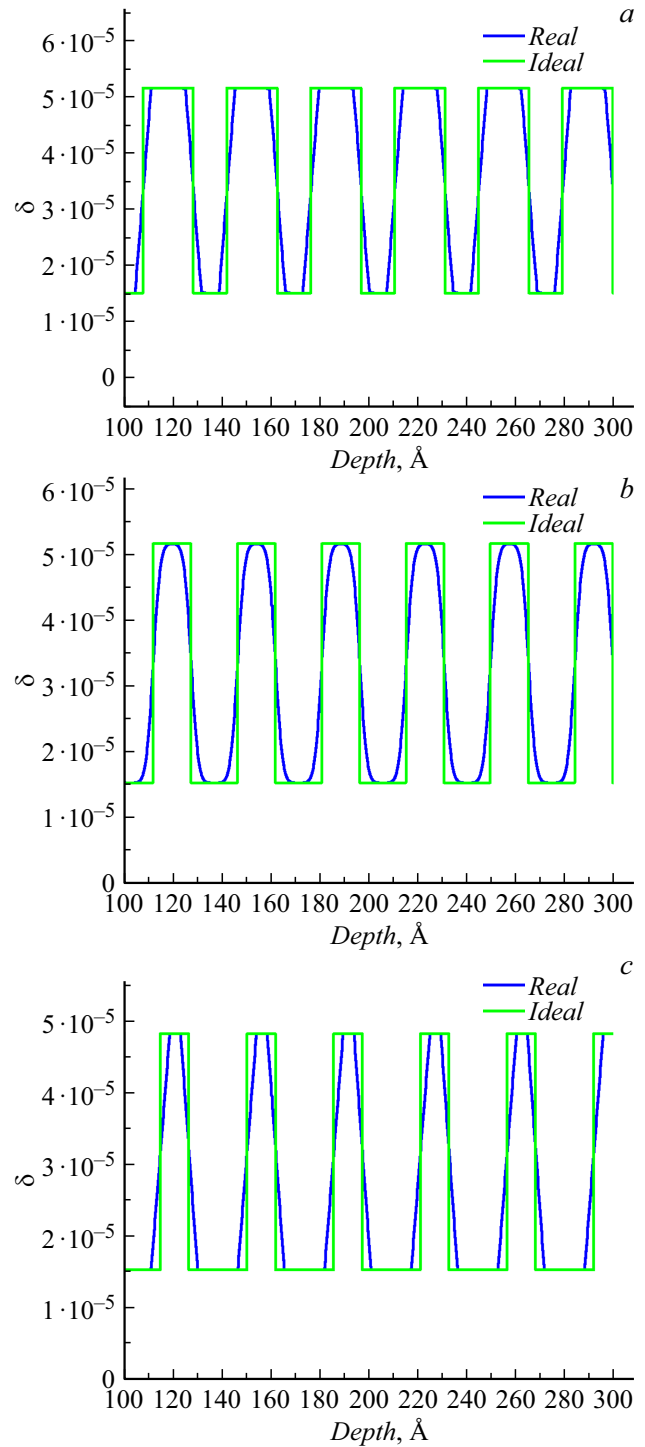
Полученные параметры позволяют теоретически предсказать значения коэффициентов отражения для МРЗ Ru/V<sub>4</sub>C в широком спектральном диапазоне. Мы продемонстрировали это на примере МРЗ Ru/V<sub>4</sub>C с периодом  $51.4 \text{ \AA}$ . На рис. 6 приведено сравнение экспериментально полученных коэффициентов отражения и теоретически вычисленных на основе полученных

ранее структурных параметров для МРЗ Ru/B<sub>4</sub>C с периодом 51.4 Å. Отражение получено для  $\lambda = 1.54$  и 93.4 Å.

Видно хорошее совпадение экспериментальных и теоретически предсказанных кривых.

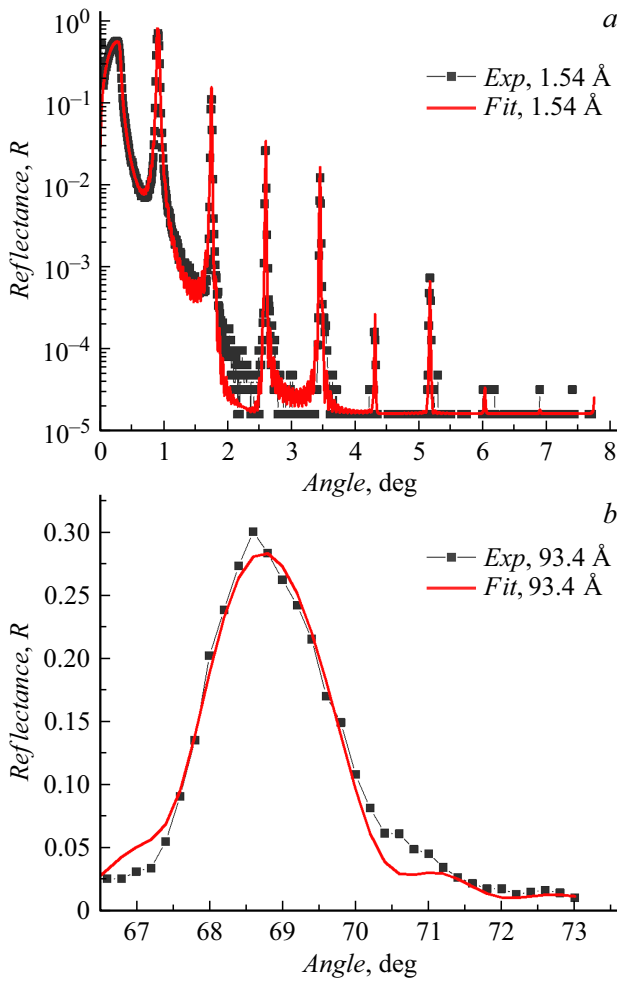


**Рис. 4.** Экспериментально измеренные зависимости коэффициента отражения (черные кривые) от угла скольжения излучения и их фиттинг (красные кривые) для длин волн  $\lambda = 1.54$  (a), 9.89 (b) и 17.59 Å (c).



**Рис. 5.** Профили действительной части добавки к диэлектрической проницаемости для реальной структуры с учетом межслоевых интерфейсов (синяя кривая) и для идеальной структуры с нулевой шириной переходных областей (зеленая кривая).

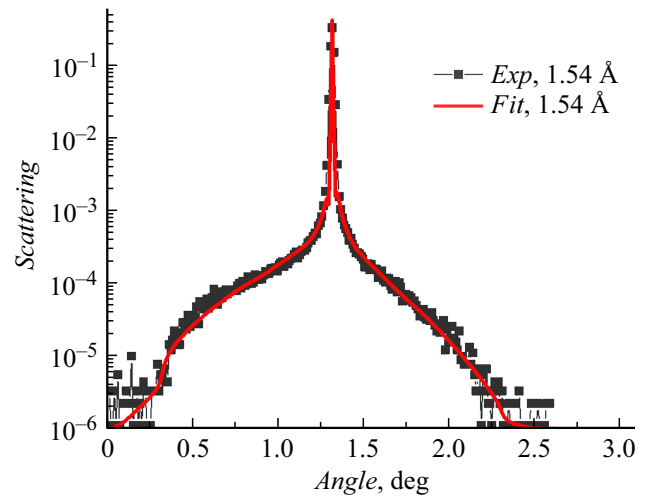
На рис. 7 представлена кривая диффузного рассеяния, снятая в первом брэгговском пике для структуры с параметрами  $N = 150$  (число периодов),  $d = 34.55$  Å (величина периода),  $\beta = 0.45$  (доля рутения в периоде).



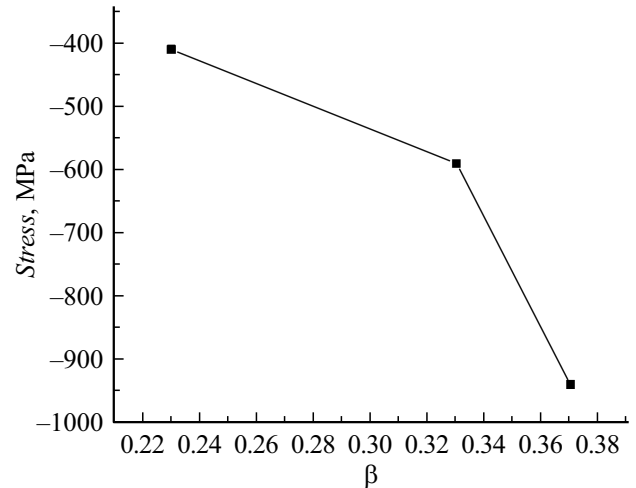
**Рис. 6.** Экспериментально измеренные (черные кривые) и теоретически рассчитанные (красные кривые) с учетом восстановленных структурных параметров зависимости коэффициента отражения от угла скольжения для длин волн 1.54 (а) и 93.4 Å (b).

Совместный анализ кривых диффузного рассеяния и зеркального отражения позволяет провести разделение между геометрической шероховатостью, являющейся результатом деформации границы между слоями разных материалов как целого, а также диффузной шероховатостью, являющейся следствием перемешивания материалов на границе в силу диффузии атомов и химического взаимодействия. В рамках выбранной модели предполагалось, что геометрическая шероховатость одинаковая для обеих границ. Для расчета шероховатостей границ была выбрана линейная модель роста [23,24], в рамках которой PSD-функция (power spectral density, т.е. спектральная плотность мощности) интерфейсов частично наследуется от предыдущих, а частично заменяется на ростовую:

$$PSD_{2D}(v) = PSD_{sub}(v)e^{-b(v)h} + \Omega \frac{1 - e^{-b(v)h}}{e^{-b(v)h}},$$



**Рис. 7.** Экспериментальная кривая диффузного рассеяния (черная кривая), снятая в первом брэгговском пике, и ее фиттинг (красная кривая).



**Рис. 8.** Зависимость внутренних напряжений от доли рутения в периоде.

где  $PSD_{sub}(v)$  соответствует подложке,  $e^{-b(v)h}$  — фактор наследования,  $\Omega$  — объем осаждаемой частицы (атома, молекулы или кластера),  $h$  — толщина пленки,  $b(v)$  — функция релаксации поверхности,  $v$  — пространственная частота. В качестве модели, описывающей PSD-функцию подложки, была выбрана ABC-модель [24]. PSD-функция подложки при этом имеет вид

$$PSD_{sub}(v) = \frac{4\pi\sigma^2\xi^2\alpha}{(1 + \xi^2(2\pi v)^2)^{\alpha+1}},$$

где  $\sigma$  — полная среднеквадратичная шероховатость подложки,  $\alpha$  — фрактальная размерность, определяющая скорость, с которой спектр спадает в область высоких частот,  $\xi$  — длина кросс-корреляции (поперечная длина корреляции, т.е. вдоль слоя).

Значение шероховатости слоев при этом получалось путем интегрирования PSD-функции в заданном диа-

пазоне пространственных частот, который определялся из условия:  $2\pi\nu = k(\cos\vartheta_0 \cos\vartheta)$ , где  $\nu$  — значение пространственной частоты,  $\vartheta_0$  — угол, соответствующий зеркальному отражению,  $\vartheta$  — угол рассеяния,  $k$  — волновой вектор. В качестве нижней границы интегрирования выбиралось значение угла рассеяния, близкое к брэгговскому пику, для верхней границы — значение, соответствующее углу максимального рассеяния.

Из представленных данных следует, что величина геометрической шероховатости составляет  $\sigma = 0.74 \text{ \AA}$ .

Зависимость внутренних напряжений, измеренных для ряда синтезированных структур интерферометрическим методом, от доли рутения в периоде многослойного зеркала, приведена на рис. 8. Исходя из представленных данных, можно сделать несколько выводов. Во-первых, внутренние напряжения имеют отрицательный знак во всем диапазоне исследуемого параметра  $\beta$ . Во-вторых, величина внутренних напряжений растет по модулю с увеличением доли рутения в структуре. Для компенсации внутренних напряжений может быть проведена процедура отжига структуры или нанесения „антистрессового“ подслоя, который бы имел противоположный, в данном случае — положительный, знак внутренних напряжений.

## Заключение

В рамках представленной работы было проведено исследование отражательных и структурных характеристик многослойных рентгеновских зеркал на основе пары материалов Ru/W<sub>4</sub>C. Исследование ширины переходных областей показало, что они находятся на уровне 2 Å, что исключает необходимость использования интерфейс-инжиниринга для повышения коэффициента отражения. Определенные в экспериментах структурные параметры позволяют проводить предсказание отражательных свойств МРЗ Ru/W<sub>4</sub>C в широком спектральном диапазоне. Исследование внутренних напряжений ряда образцов показало, что их знак имеет отрицательную величину для всех значений доли рутения в периоде. Для компенсации внутренних напряжений предлагается проводить термический отжиг структур, а также наносить дополнительный „антистрессовый“ подслоя, который бы имел противоположный знак внутренних напряжений.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Pirati, J. van Schoot, K. Troost, R. van Ballegoij, P. Krabbendam, J. Stoeldraijer, E. Loopstra, J. Benschop, J. Finders, H. Meiling, E. van Setten, N. Mika, J. Dredonx, U. Stamm, B. Kneer, B. Thuring, W. Kaiser, T. Heil, S. Migura. Proc. SPIE., **10143**, 101430G (2017). DOI: 10.1117/12.2261079
- [2] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. AIP Advances, **3** (8), 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [3] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>
- [4] N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. Her. Russ. Acad. Sci., **78**, 279 (2008). DOI: 10.1134/S1019331608030155
- [5] S.S. Churilov, R.R. Kildiyarova, A.N. Ryabtsev, S.V. Sadovsky. Phys. Scr., **80**, 045303 (2009). DOI:10.1063/1.3524494
- [6] 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
- [7] С.А. Гарахин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **3**, 10 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819030077
- [8] А.А. Ахсаханян, Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, К.А. Елина, П.С. Заверткин, С.Ю. Зуев, Д.В. Ивлюшкин, А.Н. Нечай, А.Д. Николенко, Д.Е. Парьев, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Н.И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 14 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819010025
- [9] J. K. Lepson, P. Beiersdorfer, J. Clementson, M.F. Gu, M. Bitter, L. Roquemore, R. Kaita, P.G. Cox, A.S. Safronova. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **43**, 144018 (2010). DOI: 10.1088/0953-4075/43/14/144018
- [10] С.С. Андреев, М.М. Барышева, Н.И. Чхало, С.А. Гусев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Н. Рогачев, Н.Н. Салащенко, Ю.А. Вайнер, С.Ю. Зуев. ЖТФ, **80** (8), 93 (2010). [S.S. Andreev, M.M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.N. Rogachev, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer, S.Yu. Zuev. Tech. Phys., **55** (8), 168 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210080153]
- [11] N.I. Chkhalo, S. Kunstner, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, F. Schafers, S.D. Starikov. Appl. Phys. Lett., **102**, 011602 (2013). DOI: 10.1063/1.4774298
- [12] P. Naujok, S. Yulin, N. Kaiser, A. Tünnermann. Proc. SPIE, **9422**, 94221K-1 (2015). DOI: 10.1117/12.2085764
- [13] D.S. Kuznetsov, A.E. Yakshin, J.M. Sturm, R.W.E. van de Kruijs, E. Louis, F. Bijkerk. Opt. Lett., **40** (16), 3778 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.003778
- [14] T.D. Nguyen, R. Gronsky, J.B. Kortright. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **280**, (1993). DOI: 10.1557/PROC-280-161
- [15] C. Borel, C. Morawe, A. Rommeveaux, C. Huguenot, J.-C. Peffen. Proc. SPIE, **6317**, 63170I-1 (2006). DOI: 10.1117/12.678472
- [16] Ch. Borel, Ch. Morawe, E. Ziegler, Th. Bigault, J.-Y. Massonnat, J.-Ch. Peffen, E. Debourg. Proc. SPIE, **5918**, 591801 (2005). DOI: doi.org/10.1117/12.613873
- [17] Qiushi Huang, Yang Liu, Yang Yang, Runze Qi, Yufei Feng, I.V. Kozhevnikov, Wenbin Li, Zhong Zhang, Hui Jiang, Ling Zhang, Aiguo Li, Jie Wang, Zhanshan Wang. Opt. Express, **26** (17), 21803 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.021803



- [18] И.Г. Забродин, Б.А. Закалов, И.А. Каськов, Е.Б. Ключенков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, С.Д. Стариков, Л.А. Суслов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **7**, 37 (2013). DOI: 10.7868/S0207352813070202
- [19] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **543**, 333 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.01.251
- [20] M.J. Svechnikov. Appl. Crystallogr., **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X
- [21] R.M. Smertin, N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, R.A. Shaposhnikov, S.Yu. Zuev. Thin Solid Films, **782**, 140044 (2023). DOI: 10.1016/j.tsf.2023.140044
- [22] R. Shaposhnikov, V. Polkovnikov, S. Garakhin, Y. Vainer, N. Chkhalo, R. Smertin, K. Durov, E. Glushkov, S. Yakunin, M. Borisov. J. Synchrotron Rad., **31**, 268 (2024). DOI: 10.1107/S1600577524000419
- [23] V.E. Asadchikov, I.N. Bukreeva, A. Duparré, I.V. Kozhevnikov, Y.S. Krivososov, C. Morawed, M.V. Pyatakhin, J. Steinert, A.V. Vinogradov, E. Ziegler. *Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II Proceed. V. 4449*, (2001). DOI: 10.1117/12.450102
- [24] M. Bass. Handbook of Optics, **1**, 1 (1995).