

Высокочастотные дифракционные Mo/Be-решетки с малым углом блеска—исследование эффективности

© Л.И. Горай,^{1,2,3,4} А.С. Дашков,^{1,2} Н.А. Костромин,^{1,2} Д.В. Мохов,² Т.Н. Березовская,² К.Ю. Шубина,² Е.В. Пирогов,² В.А. Шаров,⁵ С.А. Гарахин,⁶ М.В. Зорина,⁶ Р.С. Плешков,⁶ Н.И. Чхало,⁶ А.Д. Буравлев^{1,3,4,5}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алферова РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт аналитического приборостроения РАН, 198095 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС, 199226 Санкт-Петербург, Россия

⁵ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁶ Институт физики микроструктур РАН, 603087 Афонино, Кстовский р-он, Нижегородская обл., Россия
e-mail: lig@pcgrate.com

Поступило в Редакцию 17 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2024 г.

Принято к публикации 17 апреля 2024 г.

Представлены результаты исследований дифракционной эффективности решеток с блеском, выполненные путем моделирования в компьютерной программе PCGrate™ с использованием полученных с помощью атомно-силовой микроскопии профилей штрихов и измерений на лабораторном рефлектометре с высоко разрешающим спектрометром Черни-Тёрнера. Высокочастотные дифракционные решетки с плотностью 2500 nm^{-1} и малым углом наклона отражающей грани были изготовлены на пластинах Si(111)1.8° с использованием электронно-лучевой литографии и анизотропного жидкостного травления. Решетка с углом блеска $\sim 1.7^\circ$, покрытая 40 бислоями Mo/Be, продемонстрировала в классической схеме абсолютную дифракционную эффективность минус второго порядка $\sim 38\%$ при угле падения 3° неполяризованного излучения с длиной волны 11.3 nm. С учетом измеренного коэффициента отражения многослойного покрытия ~ 0.6 максимальная относительная (решеточная) эффективность составила $\sim 63\%$.

Ключевые слова: дифракционная Si-решетка с блеском, треугольный профиль штриха, малый угол блеска, многослойное Mo/Be-покрытие, моделирование дифракционной эффективности, граничные интегральные уравнения, случайная шероховатость, атомно-силовая микроскопия, метод Монте-Карло, экстремальный ультрафиолет.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58349.124-24

Введение

Отражательные рентгеновские дифракционные решетки с треугольным профилем штриха (с „блеском“) применяются в спектроскопии неупругого резонансного рентгеновского рассеяния, проекционной литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (ЭУФ) и за его пределами, в приборах космических миссий, на рабочих станциях рентгеновских лазеров на свободных электронах (РЛСЭ) и источников синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения. Достижение высокой абсолютной дифракционной эффективности η (т.е. полученной с учетом коэффициента отражения материала покрытия) высокочастотных рентгеновских решеток с блеском, особенно работающих в коротковолновой части мягкого рентгеновского (МР) диапазона („tender X-ray“), возможно при наличии двух условий: (1) малого угла блеска α ; (2) многослойного покрытия — для

увеличения η и/или критического угла в классической схеме дифракции [1,2]. Глубина штрихов подобных высокочастотных многослойных решеток с малым углом блеска (ВМРМБ) должна составлять от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров, и их профиль не должен меняться после нанесения многослойного покрытия.

В [3] анизотропным травлением была изготовлена Mo/Si ВМРМБ 5250 nm^{-1} с $\alpha = 2^\circ$ и ее измеренная абсолютная дифракционная эффективность составила в $n = -1$ порядке $\eta(-1) = 40\%$ на длине волны $\lambda = 13.3 \text{ nm}$. В [4] аналогично была изготовлена W/W₄C ВМРМБ 2500 nm^{-1} с $\alpha = 1.75^\circ$, у которой удалось получить $\eta(-2) = 13.5\%$ на $\lambda = 1.77 \text{ nm}$. В [5] для Cr/C-решетки 2400 nm^{-1} с $\alpha = 1^\circ$ была получена $\eta(-1) = 60\%$ на $\lambda = 0.4 \text{ nm}$, а также и на $\lambda = 0.3 \text{ nm}$.

Необходимость совершенствования многослойных зеркал на основе Be для продвижения ЭУФ литографии

следующего поколения была сформулирована сравнительно недавно [6], но всего за одну декаду удалось достичь высоких результатов в плане разработки, изготовления и характеристики Mo/Be и других бериллий-содержащих многослойных зеркал не только для целей литографии, но и для задач космоса, рентгеновской микроскопии и др. [7–9]. Недавно нами впервые были изготовлены и исследованы многослойные Mo/Be-решетки с блеском [10]. Частота решеток составила 2500 nm^{-1} и они имели относительно большой угол блеска $\alpha \sim 3.9^\circ$. В настоящей работе теоретико-экспериментальными методами определена η многослойных Mo/Be ВМРМБ 2500 nm^{-1} с $\alpha \sim 1.8^\circ$, предназначенных для работы в ЭУФ и изготовленных с помощью электронно-лучевой литографии, жидкостного анизотропного травления пластин Si и магнетронного напыления многослойного покрытия [11].

1. Методы исследования абсолютной дифракционной эффективности

Изготовленные Mo/Be ВМРМБ предназначены для работы в классической оптической схеме при около-нормальном падении ($\theta \sim 0-10^\circ$) излучения с $\lambda = 11.3 \text{ nm}$. Абсолютная дифракционная эффективность определялась в настоящей работе путем компьютерного моделирования с использованием реалистичных (измеренных с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ)) профилей штрихов и случайной шероховатости и взятых из [12] показателей преломления, а также с помощью прямых измерений абсолютной дифракционной эффективности на лабораторном ЭУФ рефлектометре в неполяризованном излучении. Технология изготовления исследуемых в настоящей работе дифракционных решеток, а также методы характеристики их морфологии (формы штрихов, толщины слоев, межслойной шероховатости/диффузности интерфейсов) представлены в отдельной статье [13].

1.1. Дизайн решетки

Блеск решетки можно охарактеризовать с помощью простой геометрической модели — согласно уравнению решетки для классической (плоскостной) дифракции [14]:

$$\sin \theta_n - \sin \theta = n \frac{\lambda}{d}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

где n — порядок дифракции, $n \in \mathbb{Z}$, θ и θ_n — углы падения и дифракции соответственно, отсчитываемые от нормали (знаки углов выбираются по Картезианскому соглашению).

Если зеркальная волна, отраженная от грани штриха решетки, совпадает по направлению с направлением распространения n -го порядка дифракции, тогда

$$2\alpha = \xi_{\text{dif}} - \xi_{\text{inc}}, \quad (2)$$

где $\xi_{\text{inc}} = 90^\circ - |\theta|$, $\xi_{\text{dif}} = 90^\circ - |\theta_n|$. Условие (2), характеризующее усиление определенного порядка дифракции, называется блеском (резонансом) решетки. Он явно не зависит ни от длины волны, ни от периода решетки и определяет связь угла блеска отражающей грани с углами падения и дифракции излучения. Это весьма общее геометрическое свойство теории рассеяния, которое характерно не только для решеток, но и для квазипериодических рассеивателей, типа самоорганизующихся островков (квантовых точек) с четко выраженными кристаллическими гранями, а также случайных шероховатостей с треугольной формой профиля рассеивателей.

Асимптотическая теория дифракции предсказывает достижение 100% относительной (решеточной) дифракционной эффективности (т.е. полученной с учетом идеальной проводимости материала решетки) для порядка дифракции n на длине волны блеска λ_{blaze} в ТМ поляризации падающего излучения в случае треугольного профиля штриха с прямым углом при вершине при условии [15]:

$$|n| \lambda_{\text{blaze}} = 2d \sin \alpha. \quad (3)$$

Для брэгговской моды с номером k период многослойного покрытия Λ определяется из условия Брэгга-Вульфа:

$$2\Lambda \cos \theta = k\lambda. \quad (4)$$

Отсюда требуемый Λ для ВМРМБ может быть легко оценен с использованием (1) для любого дифракционного порядка и угла блеска [2]:

$$\Lambda = d \sin \alpha / (|n|k). \quad (5)$$

Из (5) в соответствии с предсказаниями скалярной теории дифракции решетка с $d = 400 \text{ nm}$, $\alpha \approx 1.65^\circ$ и блеском для $n = -2$ должна иметь многослойное покрытие с $\Lambda = 5.7 \text{ nm}$ при работе в первом брэгговском порядке. Для высокочастотных, даже неглубоких, решеток эта оценка является приблизительной [2,16], и ее необходимо уточнять прямыми численными расчетами с использованием электромагнитной теории дифракции и реалистичного профиля штрихов, что будет представлено далее. С учетом этого замечания от точности выполнения (5) и учета влияния угла антиблеска (поглощения ВМРМБ) зависит величина максимума абсолютной дифракционной эффективности, которая может быть достигнута на практике [17].

1.2. Моделирование абсолютной дифракционной эффективности

Для анализа дифракционных свойств изготавливаемых ВМРМБ с АСМ-измеренными профилями грани мы использовали хорошо зарекомендовавшие себя ранее модифицированный метод граничных интегральных уравнений [18] и компьютерную программу PCGrateTM [19]. Задача дифракции электромагнитного

излучения на рельефе решетки сводится к решению векторного уравнения Гельмгольца со строгими граничными условиями и условиями излучения. Для решения данной задачи мы используем универсальный и высокоточный метод граничных интегральных уравнений, который был модифицирован для работы в коротковолновом диапазоне и обобщен на случай случайно-шероховатых поверхностей. В результате задача 3D-дифракции плоской волны на решетке общего вида, представляемой как бесконечная однопериодическая структура, сводится к системе уравнений Гельмгольца для одной из компонент электрического и магнитного полей в \mathbb{R}^2 , для которой решения являются квазипериодическими в одном направлении, удовлетворяют условию излучения по отношению к другому направлению и испытывают скачки на интерфейсах между слоями решетки. Для конической дифракции, в отличие от классической, граничные величины выделенных компонент поля, также как их нормальные и тангенциальные производные, связаны. Метод оперирует только с граничными данными, из которых находится как ближнее, так и дальнее поле.

Оказалось, что модифицированный интегральный метод (МИМ) позволяет легко решать сложные дифракционные задачи на отражение и прохождение не только в одномодовом режиме (один интенсивный дифракционный порядок) и при углах, близких или меньших угла полного внешнего отражения (отсчитываемого от поверхности решетки) для данного материала, но и при огромном числе порядков, произвольной геометрии/поляризации падающего излучения и любых параметрах решетки. То есть речь идет о таких входных параметрах дифракционной задачи, когда не работают не только все известные приближенные или асимптотические методы расчета абсолютной дифракционной эффективности решеток и интенсивности диффузного рассеяния, но и большинство строгих методов. Использование МИМ вместе со стохастическим анализом на основе метода Монте-Карло [20] позволяет нам моделировать не только η решеток с реалистичными параметрами, но и определять интенсивность рассеянного света и величину поглощенной энергии. Кроме того, разработанный и широко используемый нами метод граничных интегральных уравнений позволяет за счет быстрой сходимости применить его к намного более сложной дифракционной задаче — задаче синтеза (оптимизационной), что уже было апробировано на примере различных типов решеток, в том числе предназначенных для использования в космической аппаратуре и на концевых станциях РЛСЭ [17,21]. В настоящей работе аналогичный подход будет развит для определения дизайна и анализа η ВМРМБ. Применение современных компьютеров (рабочих станций, имеющих многониточные центральные процессоры и высокопроизводительные графические карты) и алгоритмов с возможностью оптимизации кодов и распараллеливания позволяет увеличить на несколько порядков скорость соответствующего моделирования, что также говорит о перспективности использования данного подхода для

решения тяжелых обратных задач рассеяния [22]. Универсальность и точность PCGrateTM позволяют решать практически любые задачи рассеяния на периодических, квазипериодических и случайных нанорельефах, хотя иногда это требует использования значительных вычислительных ресурсов [17]. Таким образом, использование в настоящей работе вышеописанных теоретических методов анализа и синтеза позволяет не только значительно удешевить затратные эксперименты по изготовлению высококачественные ВМРМБ с заданным профилем штрихов (границ), но и во многом заменить и/или дополнить трудоемкие измерения абсолютной дифракционной эффективности, обычно проводимые на источниках СИ.

Для анализа границ изготовленных ВМРМБ со случайной шероховатостью было применено статистическое усреднение интенсивности рассеяния излучения по методу Монте-Карло. При решении задачи рассеяния на решетке в качестве входных данных мы использовали реалистичные параметры слоев решетки (форма профиля границ, их шероховатость, плотность материала, диффузность интерфейсов). В результате в расчетах абсолютной дифракционной эффективности порядков решетки учитывалась не только усредненная форма (полигональная — полученная из микроскопических измерений или путем моделирования процесса роста) границ ее слоев, но и случайная шероховатость интерфейсов, приводящая к уменьшению η за счет интенсивности диффузного рассеяния. Приближения использовались только на этапе численного решения (обрезания бесконечных рядов/матриц и оценки сходимости процесса). Следует отметить, что при определении интенсивности рассеяния излучения на случайных и случайно-периодических рельефах требуется контролировать сходимость и точность процедуры не только по числу точек дискретизации (коллокации), но и по числу случайных реализаций (наборов случайных границ) в методе Монте-Карло.

1.3. АСМ-измерение реалистичных профилей штрихов

Для обеспечения воспроизводимости и возможности сравнения между собой результатов моделирования абсолютной дифракционной эффективности различных решеток мы разработали и опробовали методики измерений реалистичных профилей (усредненного профиля одного штриха и случайных профилей длиной несколько периодов) и шероховатости (высокочастотной и среднечастотной), используемых для расчета η решеток в программе PCGrateTM. Для моделирования η без учета случайной шероховатости мы используем усредненный профиль одного штриха решетки (рис. 1, *a*), который с высоким разрешением (> 500 точек) экспортируется в компьютерную программу PCGrateTM.

Для моделирования η со строгим учетом высокочастотной и среднечастотной составляющих шероховатости при любой статистике неровностей (по методу

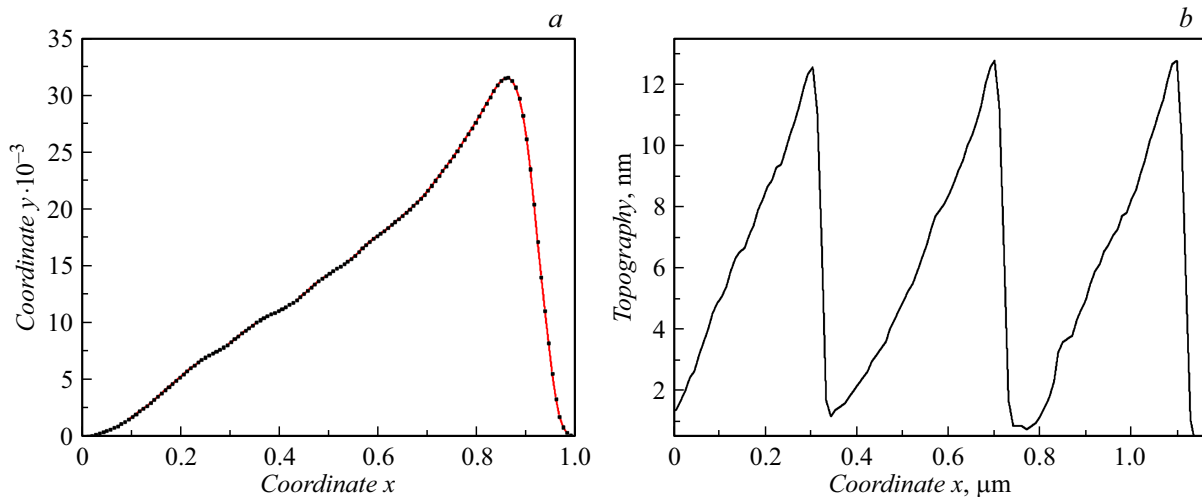


Рис. 1. АСМ измеренные профили штрихов решетки Sv-4-3: *a* — усредненный профиль одного штриха; *b* — случайный профиль длиной три периода.

Таблица 1. Параметры изготовленных решеток

Решетка	Глубина штриха, nm	Длина отражающей грани, nm	Угол блеска, °	Толщина Mo/Be покрытия, nm	Шероховатость, <i>Rms</i> , nm	
					(1 × 1 μm ²)	(20 μm)
Sv-4-1	11.0	345	1.8	230	0.45	0.69
Sv-4-3	11.0	356	1.8	230	0.39	0.70

Монте-Карло) мы используем случайные (не усредненные) профили штрихов длиной три периода (рис. 1, *b*), измеренные в различных областях по апертуре решетки. Следует отметить, что в подобные сканы входит как высокочастотная составляющая случайной шероховатости, так и среднечастотная, т.е. случайная форма профиля штрихов для решеток с малым периодом. В усредненных профилях одного штриха эти составляющие усредняются и профиль „сглаживается“ и „выравнивается“, т.е. форма профиля становится ближе к идеальной. Более подробно эти методики описаны в [23]. Подобные измерения должны проводиться как до, так и после нанесения многослойного покрытия.

По описанной выше методике для характеристики исследуемых ВМРМБ были измерены профили и шероховатость в нескольких областях на атомно-силовом микроскопе NT-MDT NTegra Aura. Во всех сканах было 512 × 512 точек, и использовался полуконтактный метод сканирования. На рис. 1 приведены АСМ профили решетки Sv-4-3, используемые для моделирования абсолютной дифракционной эффективности и интенсивности рассеянного излучения.

1.4. Измерение абсолютной дифракционной эффективности

Параметры изготовленных решеток приведены в табл. 1. Исходя из полученных параметров и

данных расчета η (табл. 2), измерения дифракционной эффективности лучшей (Sv-4-3) решетки были выполнены на высокоразрешающем спектрометре Черни-Тёрнера с плоской дифракционной решеткой и двумя сферическими коллимирующими зеркалами в качестве монохроматора и лазерно-плазменным источником излучения [24]. Абсолютная дифракционная эффективность измерялась в различных порядках дифракции по методике, использовавшейся для исследования аналогичной среднечастотной ($d \approx 2 \mu\text{m}$) многослойной Mo/Si-решетки с блеском, на которой нами была получена рекордная $\eta \sim 40\%$ в -8 порядке на $\lambda = 13.5 \text{ nm}$ неполяризованного излучения [25]. При измерениях на $\lambda = 11.3 \text{ nm}$ угол падения излучения был близок к нормали к плоскости решетки и составлял $3^\circ - 8^\circ$.

2. Результаты и обсуждение

Теоретически (моделированием) и экспериментально (измерениями) мы определяли η решеток Sv-4-1 и Sv-4-3 для неполяризованного излучения с длиной волны $\lambda = 11.3 \text{ nm}$ в классической схеме измерений (в плоскости дисперсии). На рис. 2 для сравнения приведены смоделированные на основе идеального треугольного профиля границ с $\alpha = 1.8^\circ$ и углом антиблеска $\beta = 25^\circ$ кривые дифракционной эффективности первых порядков

Таблица 2. Абсолютная дифракционная эффективность (η) решеток

Решетка	$\eta(-2),\%$			
	Расчет для идеальной решетки	Расчет без учета шероховатости	Расчет с учетом шероховатости	Измерение
Sv-4-1	66.0	53.7	–	–
Sv-4-3		59.7	29.0	38.0

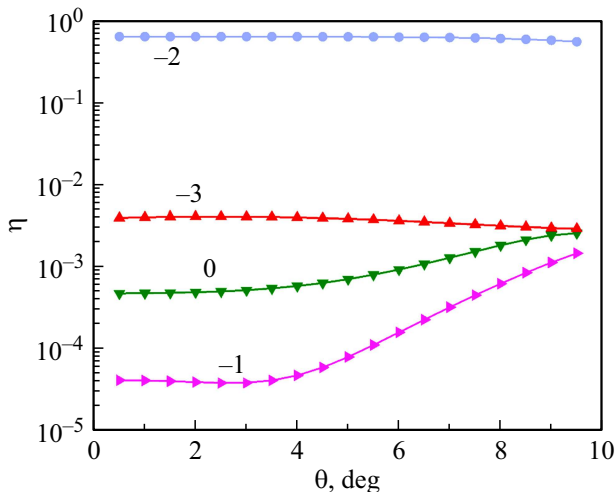


Рис. 2. Абсолютная дифракционная эффективность порядков идеальной 40-бислойной Mo/Be многослойной решетки с $\Lambda = 5.7$ nm и треугольной формой границ с $\alpha = 1.8^\circ$ и $\beta = 25^\circ$ для $\lambda = 11.3$ nm в зависимости от угла падения.

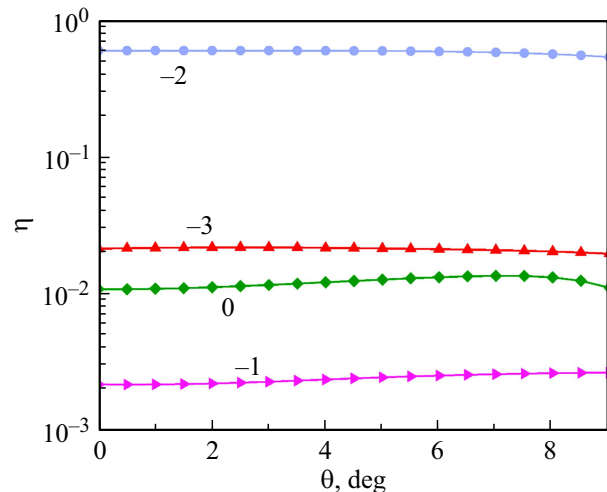


Рис. 3. Абсолютная дифракционная эффективность порядков решетки Sv-4-3 (Mo/Be) при $\lambda = 11.3$ nm в зависимости от угла падения (без учета шероховатости).

идеальной 40-бислойной Mo/Be-решетки с периодом многослойного покрытия $\Lambda = 5.7$ nm в диапазоне углов падения θ от 0.5° до 9.5° . Как следует из приведенных графиков $\eta(-2) \approx 66\%$, а эффективность соседних порядков на несколько порядков меньше.

На рис. 3 показаны смоделированные на основе усредненного профиля одного штриха (без учета шероховатости отражающей грани) графики абсолютной дифракционной эффективности порядков от 0 до -3 решетки Sv-4-3 для $\lambda = 11.3$ nm и θ в диапазоне $0.5^\circ - 9^\circ$. Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, $\eta(-2) \approx 60\%$, т.е. всего на 10% меньше, чем у идеальной решетки. При этом, эффективность соседних порядков в десятки раз меньше, включая нулевой порядок. Максимальная теоретическая η решетки Sv-4-1, определенная с помощью усредненного профиля штриха, оказалась на 6% меньше (табл. 2).

Абсолютная дифракционная эффективность в -2 -м порядке, рассчитанная на основе АСМ измеренных в нескольких областях решетки Sv-4-3 случайных профилей (с учетом случайной шероховатости), составила на $\lambda = 11.3$ nm $\sim 29\%$ (рис. 4), т.е. в два раза меньше, по сравнению с η , рассчитанной для усредненного профиля штрихов без учета случайной шероховатости — как

высокочастотной, так и среднечастотной, т.е. с учетом случайной формы профиля штриха. Следует отметить, что подобная величина η может существенно зависеть от случайного выбора областей решетки (в центре, на краях).

При измерениях решетки Sv-4-3 максимум абсолютной дифракционной эффективности $\sim 38\%$ в -2 порядке детектировался на длине волны 11.3 nm в классической оптической схеме при угле падения $\theta = 3^\circ$ и угле детектора 177° (рис. 5), что с точностью $0.1^\circ - 0.2^\circ$ соответствует теоретическому углу дифракции $\theta(-2) = -0.2^\circ$. Дифракционная эффективность, измеренная в -2 порядке при больших углах падения, плавно уменьшается с увеличением угла падения и составляет $\sim 30\%$ при $\theta = 8^\circ$ (рис. 5), что хорошо согласуется с теоретическими значениями.

Для исследования однородности измеряемой дифракционной эффективности была оценена отражательная способность при перемещении решетки Sv-4-3 с помощью подвижки по координате, перпендикулярной штрихам (насколько позволяет используемая подвижка), и фиксированном угле падения $\theta = 5^\circ$. На рис. 6 приведен график $\eta(-2)$, измеренной на длине волны неполяризованного излучения $\lambda = 11.3$ nm в классической схеме в зависимости от координаты столика при сканировании

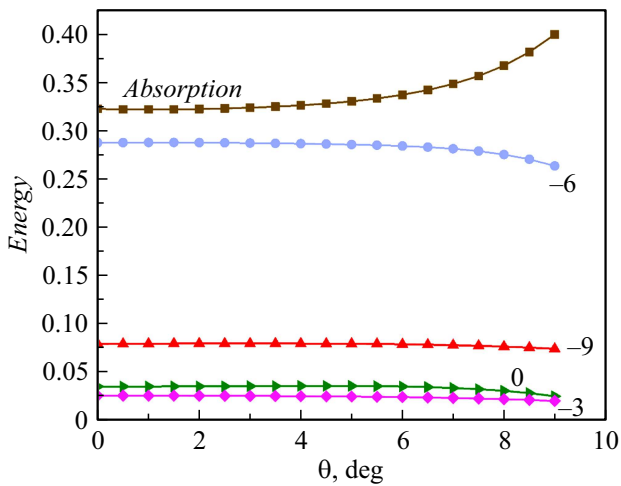


Рис. 4. Абсолютная дифракционная эффективность порядков (номера умножены на три) и поглощение решетки Sv-4-3 (Mo/Be) при $\lambda = 11.3 \text{ nm}$ в зависимости от угла падения (с учетом шероховатости).

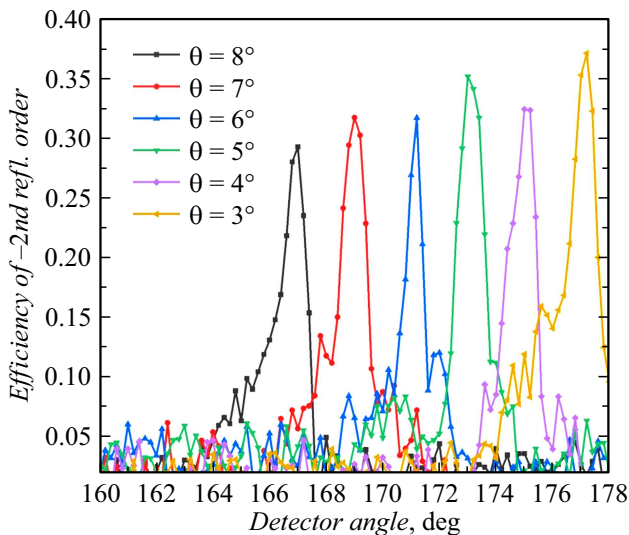


Рис. 5. Абсолютная эффективность -2 порядка решетки Sv-4-3, измеренная в неполяризованном излучении с $\lambda = 11.3 \text{ nm}$ в классической схеме при $\theta = 3^\circ - 8^\circ$, от угла сканирования детектора.

решетки Sv-4-3. На рис. 6 видно, что при сканировании решетки на длине 11 mm (координата столика изменяется от 189 до 200 mm) $\eta(-2)$ изменяется от 0.28 до 0.36 . Таким образом, неоднородность значений абсолютной дифракционной эффективности, вычисленная как отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению, составляет $\pm 8.3\%$.

В табл. 2 приведены максимальные значения η исследуемых решеток, полученные: 1) моделированием в программе PCGrateTM для идеальной решетки с аналогичными параметрами; 2) моделированием в программе PCGrateTM для изготовленной решетки без учета случайной шероховатости поверхности отражающей грани;

3) моделированием в программе PCGrateTM для изготовленной решетки с учетом случайной шероховатости поверхности отражающей грани; 4) измерениями изготовленной решетки с помощью рефлектометра на длине волны 11.3 nm . Из табл. 2 видно, что для решетки Sv-4-1 расчетное значение η на 6.0% меньше, чем для решетки Sv-4-3, что можно объяснить меньшей длиной отражающей грани. Максимальный коэффициент отражения для выбранного многослойного покрытия при $N = 40$ составляет $R = 0.72$; следовательно, относительная дифракционная эффективность идеальной решетки составляет 91.7% , а максимальная относительная дифракционная эффективность решетки Sv-4-3 по результатам моделирования с реалистичным профилем, но без учета случайной шероховатости, составила 82.9% , что всего на 8.8% меньше теоретически достижимого расчетного значения. Это означает, что средний профиль решетки Sv-4-3 близок к идеальному треугольному несимметричному.

Максимальный коэффициент отражения нанесенного Mo/Be-покрытия по измерениям свидетеля составил ~ 0.60 ; таким образом, максимальная относительная эффективность решетки Sv-4-3 по результатам измерений составила 63.3% , что на 19.6% меньше теоретического значения с учетом ACM измеренного усредненного профиля штрихов. Такое отклонение измеренной эффективности от моделированного значения для реалистичного профиля вызвано несколькими причинами: 1) неточностью согласования профиля штриха решетки и периода многослойного покрытия; 2) рассеянием излучения на неровностях поверхности (случайной шероховатости); (3) отсутствием рисунка (отражающих граней) на $5-7\%$ площади решетки из-за ститчинга при записи электронно-литографической маски [13]; 4) изогнутостью отражающей грани из-за не полностью удаленных Si-выступов (работает не вся длина отражающей

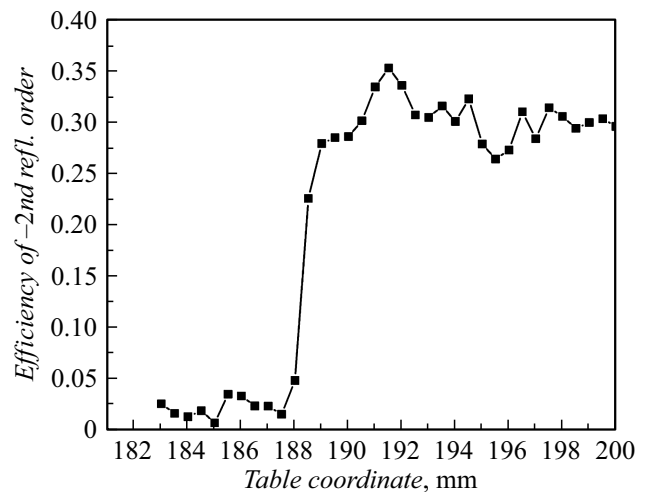


Рис. 6. Зависимость абсолютной эффективности -2 порядка решетки Sv-4-3, измеренная в неполяризованном излучении с $\lambda = 11.3 \text{ nm}$ в классической схеме при $\theta = 5^\circ$, в зависимости от координаты столика при перемещении решетки.

грани) [26]; 5) неоднородностью штрихов по апертуре решетки.

Заключение

Были выполнены теоретико-экспериментальные исследования дифракционной эффективности высокочастотных многослойных Mo/Be-решеток с $d \sim 400$ nm и малым углом блеска $\sim 1.7^\circ$. Моделирование проводилось с помощью созданной на основе строгого метода граничных интегральных уравнений компьютерной программы PCGrate™ и усредненных и случайно-шероховатых профилей штрихов, полученных из данных АСМ. Данные расчетов верифицировались путем прямых измерений в ЭУФ диапазоне, выполненных на лабораторном оборудовании с использованием рефлектометра с высокоразрешающим спектрометром Черни-Тёрнера. Дифракционные решетки с блеском были изготовлены на пластинах Si(111)1.8° с применением методов электронно-лучевой литографии и жидкостного анизотропного травления. После нанесения методом магнетронного напыления 40 периодов Mo/Be-покрытия общей толщиной ~ 230 nm решетки имели близкий к идеальному треугольный несимметричный профиль штрихов с приемлемым значением шероховатости поверхности отражающих граней, о чем свидетельствуют результаты моделирования эффективности и измерений профилей на атомно-силовом микроскопе.

Измеренная абсолютная дифракционная эффективность решетки Sv-4-3 составила $\sim 38\%$ в -2 порядке на длине волны 11.3 nm в классической оптической схеме дифракции при угле падения 3° , отсчитываемого относительно нормали к поверхности решетки. Максимальная относительная эффективность решетки составила $\sim 63\%$, что на 30% меньше теоретически достижимой, полученной для идеального треугольного профиля штрихов. Как следует из проведенного анализа, уменьшение эффективности связано, в первую очередь, с наличием случайной шероховатости, а также дефектностью маски (ститчингом) при изготовлении кремниевой решетки.

Наши дальнейшие усилия будут направлены на оптимизацию режимов записи электронно-лучевой маски с целью устранения ститчинга, а также улучшения профиля штрихов (уменьшения случайной шероховатости) и однородности параметров решетки по площади. Это позволит заметно увеличить относительную дифракционную эффективность высокочастотных многослойных решеток с малым углом блеска и приблизить ее к теоретическому пределу. Если к этому добавить совершенствование процесса нанесения многослойных покрытий для увеличения отражательной способности, то вместе это позволит достичь рекордных значений абсолютной дифракционной эффективности ВМРМБ — столь необходимых для различных приложений в ЭУФ и МР, а также и в жестком рентгеновском излучении.

Благодарности

Авторы благодарны АО „Светлана-Электронприбор“ за проведение научно-исследовательской работы.

Финансирование работы

Работа Л.И. Горая, А.С. Дашкова, Н.А. Костромина и А.Д. Буравлева выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в части экспериментальных исследований (№ 075-01438-22-06, FSEE-2022-0018). В плане теоретических исследований, работа Л.И. Горая, А.С. Дашкова и Н.А. Костромина выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 23-29-00216).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Goray, W. Jark, D. Eichert. *J. Synchrotron Rad.* **25** (6), 1683 (2018). DOI: 10.1107/S1600577518012419
- [2] D.L. Voronov, L.I. Goray, T. Warwick, V.V. Yashchuk, H.A. Padmore. *Opt. Express*, **23** (4), 4771 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.004771
- [3] D.L. Voronov, E.M. Gullikson, F. Salmassi, T. Warwick, H.A. Padmore. *Opt. Lett.*, **39** (11), 3157 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.003157
- [4] D.L. Voronov, F. Salmassi, J. Meyer-Ilse, E.M. Gullikson, T. Warwick, H.A. Padmore. *Opt. Express*, **24** (11), 11334 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.011334
- [5] A. Sokolov, Q. Huang, F. Senf, J. Feng, S. Lemke, S. Alimov, J. Knedel, T. Zeschke, O. Kutz, T. Seliger, G. Gwalt, F. Schäfers, F. Siewert, I. Kozhevnikov, R. Qi, Z. Zhang, W. Li, Z. Wang. *Opt. Express*, **27** (12), 16833 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.016833
- [6] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko. *AIP Advances*, **3** (8), 082130 (2013). DOI: 10.1063/1.4820354
- [7] M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.N. Nechay, D.E. Pariev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.A. Tatarskiy, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, Y.A. Vainer, M.V. Zorina. *Opt. Express*, **26** (26), 33718 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.033718
- [8] N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, S.Yu. Zuev. *AIP Advances*, **8** (10), 105003 (2018). DOI: 10.1063/1.5048288
- [9] V.N. Polkovnikov, N.I. Chkhalo, R.S. Pleshkov, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, M.V. Svechnikov, S.Yu. Zuev. *Opt. Lett.*, **44** (2), 263 (2019). DOI: 10.1364/OL.44.000263
- [10] Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, В.А. Шаров, А.С. Дашков, Н.А. Костромин, М.В. Зорина, М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, К.В. Николаев, С.Н. Якунин, Б.С. Рошин, Н.И. Чхало, В.Е. Асадчиков, А.Д. Буравлев. Сборник тез. конф. „Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике“ КЭЛТ-23 (Черноголовка, Россия, 2023), с. 219.

- [11] Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.В. Нащекин, В.А. Шаров, Л.И. Горай. *ЖТФ*, **92** (8), 1192 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52782.74-22 [D.V. Mokhov, T.N. Berezovskaya, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.V. Nashchekin, V.A. Sharov, L.I. Goray. *Tech. Phys.*, **92** (8), 1009 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.08.54564.74-22]
- [12] Электронный ресурс. Режим доступа: https://henke.lbl.gov/optical_constants/
- [13] Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, Е.В. Пирогов, К.Ю. Шубина, Н.Д. Прасолов, М.В. Зорина, С.А. Гарахин, Р.С. Плешков, Н.И. Чхало, А.С. Дашков, Н.А. Костромин, Л.И. Горай, А.Д. Буравлев. *ЖТФ*, **94** (7), (2024).
- [14] Ф.М. Герасимов, Э.А. Яковлев. *Современные тенденции в технике спектроскопии* сб. статей, ред. С.Г. Раутиан (Новосибирск, Наука, 1982), с. 24–93. [F.M. Gerasimov, E.A. Yakovlev. *Current Trends in Spectroscopy Technology*, ed. by S.G. Rautian (Nauka, Novosibirsk, 1982, in Russian)]
- [15] E.G. Loewen, E. Popov. *Diffraction Gratings and Applications* (CRC Press, 2018), 630 p.
- [16] Л.И. Горай. *Известия РАН. Сер. физическая*, **69** (2), 211 (2005). [L.I. Gorai. *Bull. Russian Academy Sciences. Physics*, **69** (2), 231 (2005).]
- [17] L. Goray. *J. Synchrotron Rad.*, **28** (1), 196 (2021). DOI: 10.1107/S160057752001440X
- [18] L.I. Goray, G. Schmidt. *Gratings: Theory and Numerical Applications* (Presses Universitaires de Provence, Marcel, 2014), Ch. 12.
- [19] Л.И. Горай, С.Ю. Садов. Компьютерная программа PCGrate™. URL: www.pcgrate.com
- [20] D.P. Kroese, T. Taimre, Z.I. Botev. *Handbook of Monte Carlo Methods* (Wiley, 2011), 772 p.
- [21] H. Marlowe, R.L. McEntaffer, C.T. Deroo, D.M. Miles, J.H. Tutt, L.I. Goray, F. Scholze, A.F. Herrero, C. Laubis, V. Soltwisch. *Appl. Opt.*, **55** (21), 5548 (2016).
- [22] L.I. Goray, A.S. Dashkov, N.A. Kostromin, D.A. Barykin, 2023 Days on Diffraction (DD), *Proc. IEEE*, 101 (2023). DOI: 10.1109/DD58728.2023.10325796.
- [23] Л.И. Горай, В.А. Шаров, Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков, А.Д. Буравлев. *ЖТФ*, **93** (7), 859 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55738.66-23 [L.I. Goray, V.A. Sharov, D.V. Mokhov, T.N. Berezovskaya, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov, A.D. Bouravlev. *Tech. Phys.*, **68** (7), 797 (2023). DOI: 10.61011/TP.2023.07.56619.66-23]
- [24] 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
- [25] Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, В.А. Шаров, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков, А.В. Нащекин, М.В. Зорина, М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, Н.И. Чхало. *Квантовая электроника*, **52** (10), 955 (2022). <https://www.mathnet.ru/rus/qe18114> [L.I. Goray, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, V.A. Sharov, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov, A.V. Nashchekin, M.V. Zorina, M.M. Barysheva, S.A. Garakhin, S.Yu. Zuev, N.I. Chkhalo. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50** (2), S250 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623140063]
- [26] L.I. Goray, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, V.A. Sharov, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov. *J. Surf. Invest.*, **17** (1), S104 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070145