

01

Кремниевые решетки с блеском для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения: влияние формы профиля штриха и случайной шероховатости на дифракционную эффективность

© Л.И. Горай,^{1,2,3,4} В.А. Шаров,⁵ Д.В. Мохов,² Т.Н. Березовская,² К.Ю. Шубина,² Е.В. Пирогов,²
А.С. Дашков,^{1,2} 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. Алфёрова РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

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

⁴ Университет при Межпарламентской ассамблее ЕвразЭС, 194044 Санкт-Петербург, Россия

⁵ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: lig@pcgrate.com

Поступило в Редакцию 31 марта 2023 г.

В окончательной редакции 31 марта 2023 г.

Принято к публикации 31 марта 2023 г.

Исследовано влияние формы профиля штриха и случайной шероховатости отражающей грани пяти дифракционных кремниевых решеток (угол блеска $1-4^\circ$, период 0,4, 1,4, 2 и $4\ \mu\text{m}$, различные покрытия), работающих в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах излучения, на отток дифракционной эффективности из рабочих порядков. Дифракционные решетки были изготовлены жидкостным травлением вицинальных пластин Si(111) и охарактеризованы методом атомно-силовой микроскопии для определения формы профиля штриха и шероховатости. На основе реалистичных профилей штрихов компьютерным моделированием в программе PCGrateTM, учитывая интенсивность рассеяния с помощью поправок типа Нево-Кросе или Дебая-Валлера и по методу Монте-Карло (строго), была рассчитана дифракционная эффективность решеток, работающих в схемах классической и конической дифракции. Показано влияние формы профиля штриха и шероховатости на дифракционную эффективность изготавливаемых Si-решеток.

Ключевые слова: дифракционная решетка, треугольный профиль штрихов, шероховатость поверхности отражающей грани, АСМ, моделирование дифракционной эффективности.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55738.66-23

Введение

Целью настоящей работы является оценка разброса формы профиля штрихов по апертуре решетки и допустимой шероховатости отражающей грани, не оказывающих существенного влияния на максимально достижимую дифракционную эффективность изготавливаемых решеток, работающих в мягком рентгеновском (МР) и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазонах в конической и классической схемах. Для этого сравниваются значения эффективности, полученные с помощью компьютерной программы (PCGrateTM и моделирование интенсивности рассеяния по методу Монте-Карло) без учета и с учетом случайного рельефа шероховатости [1,2]. Оценка правильности моделированных значений эффективности обычно проводится путем их сравнения с результатами рефлектометрических измерений. В работе [3] нами было продемонстрировано, что результаты моделирования на основе метода граничных

интегральных уравнений и рефлектометрических измерений эффективности решеток имеют хорошее совпадение между собой, в том числе с учетом влияния случайной шероховатости на отток эффективности из рабочих порядков.

Ранее подобное исследование никем не проводилось, а допустимое значение среднеквадратичного отклонения (СКО) шероховатости отражающей поверхности σ , как правило, оценивалось как $\sigma \ll \lambda/6 \cos \theta$ [4], где λ — длина волны падающего излучения, θ — угол падения, отсчитанный от нормали. Для применений в ЭУФ считается приемлемым σ поверхности решетки $\sim 0.5-1\ \text{nm}$ [5], а для МР диапазона $\sim 0.3-0.4\ \text{nm}$ [6]. Исследование влияния формы профиля штрихов и шероховатости поверхности отражающей грани на отток дифракционной эффективности из рабочего порядка проводилось для Si-решеток с углом блеска $1-4^\circ$, периодом 0,4, 1,4, 2 и $4\ \mu\text{m}$ и различными покрытиями для МР и

ЭУФ излучения. Решетки предназначались для работы в диапазоне длин волн МР 0.6–1.4 nm и на длинах волн ЭУФ 11.3, 13.6, 17.1 и 30.4 nm. Исследуемые дифракционные решетки были изготовлены жидкостным травлением вицинальных пластин кремния (111) по усовершенствованной нами технологии, подробно описанной в [7,8].

1. Теория рассеяния на случайной шероховатости

Создание строгой электромагнитной (ЭМ) теории рассеяния (упругого) света на частицах и неровностях (шероховатостях) началось в середине 20-го века, когда стали появляться компьютеры и соответствующие математические теории и численные методы. К этому времени было известно всего несколько точных решений задач дифракции на одиночных элементах: круговой цилиндр (Рэлей — 1882 г.), идеальная полуплоскость (Зоммерфельд — 1896 г.) и сфера (Ми — 1908 г.). Сегодня, если для волнового числа k и характерного размера рассеивателя a выполняется условие $ka \ll 1$ (приближение Рэля) или $ka \gg 1$ (геометрическая оптика — скалярный интеграл Кирхгофа), то известно огромное число изящных и эффективных аналитических, полуаналитических и быстросходящихся численных решений для задач дифракции на различных препятствиях во всевозможных областях знаний. Примерами для коротковолнового диапазона могут служить борновское приближение (ВА), борновское приближение деформированной волны (DWBA), теория Бекмана и Спицикино.

Рентгеновским диапазоном будем далее называть излучение с длиной волны λ от ~ 0.04 до ~ 60 nm, т. е. вместе жесткий рентген (ЖР), МР и ЭУФ. Освоение рентгеновского диапазона началось с ЖР: теория дифракции рентгеновского излучения на кристаллах была развита еще в начале прошлого века в работах Эвальда, Брэгга, Дарвина и Принца. За открытия в этом диапазоне в прошлом веке было получено около 20 нобелевских премий. С появлением тонкопленочных покрытий в середине 20-го века в работах Абея, Власова, Роуарда, Хевенса, Паррата и Бреховских были впервые изложены простейшие оптические теории, описывающие аналогичные явления, но с других позиций — уравнений Максвелла. Динамическая теория рентгеновского рассеяния в ее полной и точной постановке дает те же результаты, что и соответствующая оптическая теория, т. е. эти теории эквивалентны. Однако ввиду большей универсальности ЭМ теории и колоссального развития численных методов и компьютеров, все большее значение в рентгеновском диапазоне приобретают исследования на основе ЭМ методов.

Многоволновая и многократная дифракция, преломление, поглощение, волноводные эффекты и деформация фронтов в значительной степени определяют рассеяние

МР и ЭУФ излучения и холодных нейтронов на наношероховатостях сплошных сред и слоев. Учет этих чисто динамических эффектов, требующий применения ЭМ теории, позволяет вычислить абсолютную интенсивность зеркальной и диффузной компонент, которые могут иметь резонансные пики. Однако при размерах неоднородностей, отличающихся на 3–5 порядков, например, в случае дифракционной решетки с периодом $d \sim 1–10 \mu\text{m}$ и СКО шероховатости $\sigma \sim 1–0.1$ nm, точный учет явления дифракции представляет серьезную вычислительную задачу даже для современных рабочих станций.

Из ВА известна амплитудная поправка Дебая-Валлера (DW),

$$r_{\text{DW}}(k) = \exp\{-2(2\pi\sigma(k) \cos \theta_k / \lambda)^2\},$$

для учета оттока мощности из зеркальной компоненты на шероховатости (диффузности) интерфейса с номером k , которая чаще применяется в области, где угол падения θ_k , измеренный от нормали к поверхности, меньше критического угла. Другая модель с коэффициентом Нево-Кросе (NC),

$$r_{\text{NC}}(k) = \exp[-2(2\pi\sigma(k)/\lambda)^2 n_{k+1} \cos \theta_{k+1} n_k \cos \theta_k],$$

получаемая из DWBA, обычно используется при скольжении падения за пределами критического угла из среды с действительной частью показателя преломления n_k . Оба фактора уменьшения зеркального отражения справедливы для гауссовой статистики шероховатости и гауссовой автокорреляционной функции, строго говоря, в случае малой высоты шероховатости границ h и очень большой (DW) или очень малой (NC) корреляционной длины ξ [4,9,10]. Любые аппроксимации имеют сильные ограничения, в первую очередь, на максимальные значения h [11–14]. DWBA, как правило, используют для учета произвольных h , однако по определению приближение работает только при $h \cos \theta / \lambda \ll 1$ и $\xi k \cos^2 \theta \ll 1$, λ — длина волны в вакууме. Известно, что DWBA второго порядка и теория возмущений по высоте шероховатости могут быть использованы с учетом произвольной длины корреляции и более общей статистики шероховатости. Однако параметров σ и ξ становится недостаточно для описания распределения интенсивности диффузной компоненты, если $\sigma \cos \theta > \lambda/10$ [15].

Новый подход в коротковолновой рефлектометрии, основанный на строгой теории дифракции ЭМ излучения с использованием методов граничных интегральных уравнений и Монте-Карло [1,16], был предложен сравнительно недавно, когда удалось добиться сходимости соответствующих уравнений для $\lambda/\xi \sim 10^{-6}$ [17,18]. Подобные строгие расчеты интенсивности рассеяния на случайных шероховатостях вместе с точным учетом поглощения получили в литературе название глубокой рентгеновской рефлектометрии (DXRR) [19,20]. Метод

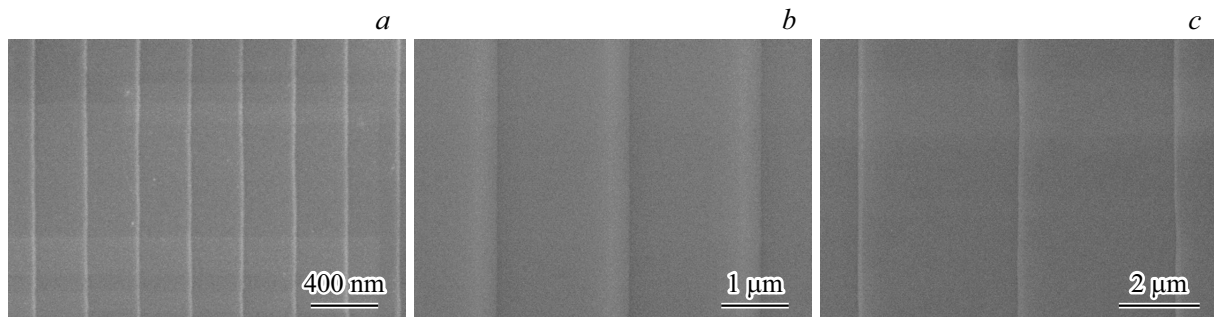


Рис. 1. РЭМ изображения поверхности решетки: *a* — Sv-1, 100 К; *b* — Si-p-6, 50 К; *c* — Si-13-2, 30 К.

DXRR может точно описывать любые ситуации — от полного внешнего отражения до полного поглощения коротковолнового излучения. В дополнение к коэффициентам зеркального отражения он позволяет точно определять интенсивность рассеянного света и поглощение [21]. С применением этого метода и программы PCGrate™ [22] были выполнены расчеты коэффициентов зеркального и диффузного (дифракционного) отражения: однослойных Ge/Si [23] и многослойных (мультиплицированных) In(Ga)As/GaAs квантовых точек (островков) [24]; золотых шероховатых зеркал [4,21]; шероховатых подложек GaAs [19,20] и многослойных гетероструктур Al(Ga)As/GaAs [25]; многослойных рентгеновских Mo/Si и Al/Zr зеркал [9,10]; WB₄/C- и Cr/C-дифракционных решеток на основе данной модели роста реалистичных границ при произвольной статистике неровностей [26]; поверхности гидрозоля с 10 nm частицами SiO₂, обогащенными CsOH [27]; сплошных и многослойных решеток с измеренной шероховатостью границ [1,21,28]. В частности, большие различия между строгим подходом и применением поправки, в том числе по величине восстанавливаемых параметров шероховатости были обнаружены для коэффициентов зеркального (брэгговского) отражения Au и многослойных зеркал с различной статистикой неровностей в широком диапазоне длин волн и углов падения [4,10].

2. Параметры штрихов решетки, методы характеристики и моделирования эффективности

Для определения параметров решетки измеряют профиль на длине 10 периодов в нескольких областях в зависимости от размера решетки. Затем рассчитывают эффективность с помощью специализированного программного обеспечения и усредненных параметров решетки и слоев отражающего покрытия. В табл. 1 приведены параметры исследуемых нами решеток (на пластинах толщиной 1.5 mm, кроме решетки Si-13-2 толщиной ~ 0.4 mm), где в последнем столбце указано отражающее покрытие и длина волны в блеске. Решетки с золотым или платиновым покрытием могут работать

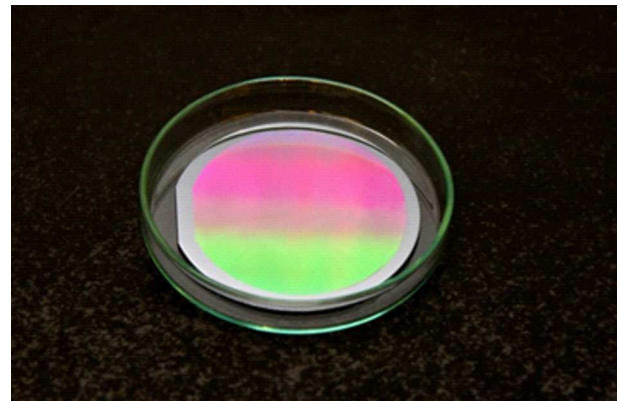


Рис. 2. Фотография решетки Si-p-3.

как в классической, так и в конической схеме в ЭУФ и МР диапазонах; решетки с многослойными покрытиями предназначены для работы в классической схеме в ЭУФ. Подходящее многослойное покрытие (период Λ и толщины слоев) подбирались с учетом выбранной длины волны (диапазона) и параметров изготовленных решеток — прежде всего, периода штрихов и угла блеска (т.е. глубины штриха), а также возможности работать в высоком порядке спектра, что определяется плоскостностью и длиной рабочей грани [29].

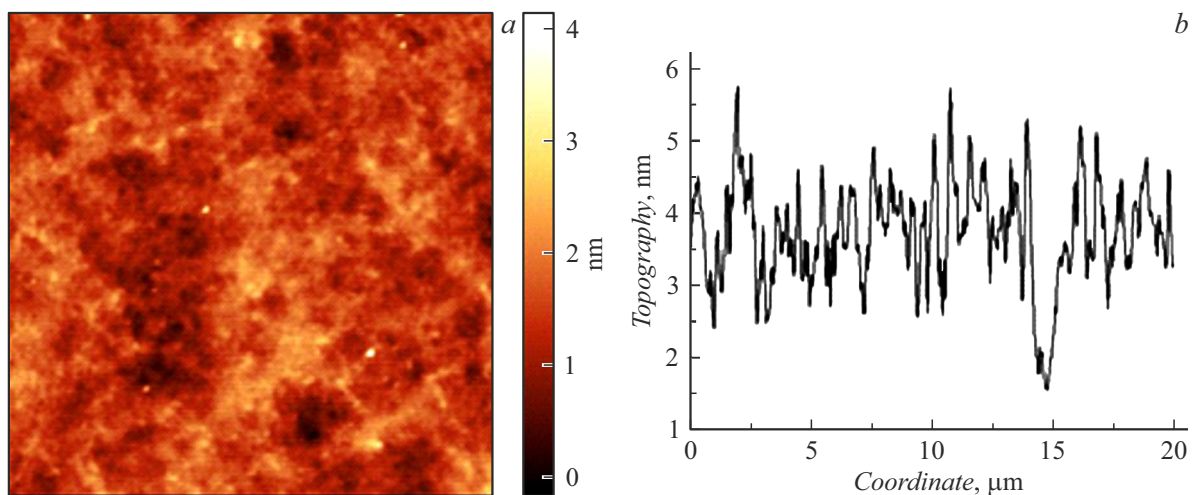
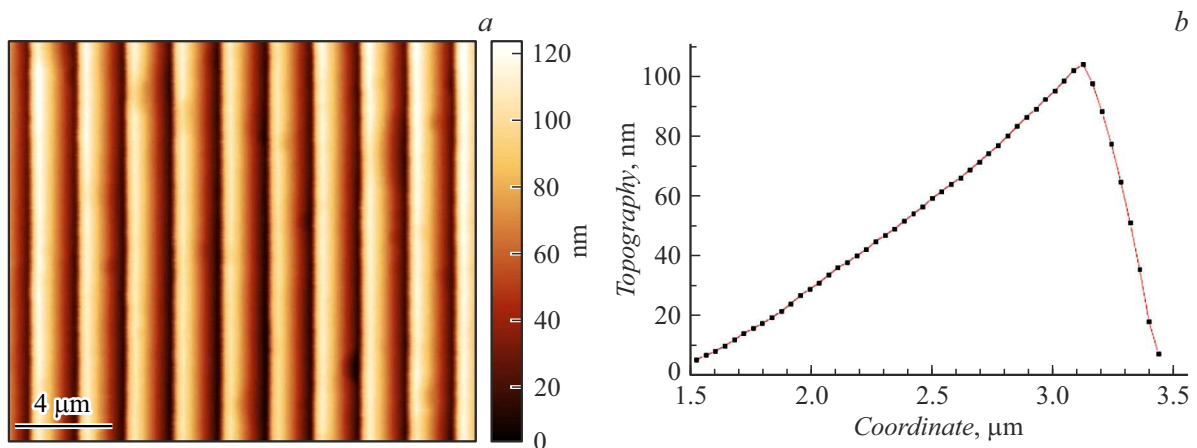
На рис. 1 представлены изображения поверхности некоторых изготовленных нами решеток, полученные при разном увеличении методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Supra25.

На рис. 2 представлена фотография решетки Si-p-3, изготовленной на кремниевой пластине диаметром 76.2 mm.

Шероховатость. На поверхности отражающей грани изготовленной Si-решетки наблюдается высокочастотная и среднечастотная (волнистость) шероховатость, на которой происходит рассеяние падающего излучения. Высокочастотная (σ) шероховатость измерена с помощью атомно-силового микроскопа в поле $1 \times 1 \mu\text{m}^2$, среднечастотная (R_q) — на длине $20 \mu\text{m}$ вдоль штриха на поверхности отражающей грани (рис. 3). Расчеты шероховатости выполнены в программе Gwyddion [30].

Таблица 1. Параметры решеток

№ образца	Период, μm	Длина рабочей грани, nm	Угол наклона рабочей грани, deg	Изогнутость рабочей грани, deg	Угол наклона нерабочей грани, deg	СКО шероховатости, nm		Тип отражающего покрытия/длина волны в блеске, nm
						σ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$	R_q $20 \mu\text{m}$	
Sv-1	0.4	339	3.9	—	28	0.34	2.20	Mo–Be/11.3
Si-p-8-2	1.4	1085	3.9	0.74	15	0.58	4.38	Au/11.3, 0.8
Si-p-6	2.0	1600	3.5	0.80	19	0.42	2.72	Au/17.1
Si-p-3	4.0	3677	3.4	0.57	28	0.49	1.19	Be–Mg/30.4
Si-13-2	4.0	3191	1.2	0.81	10	0.55	2.40	Pt/13.6

Рис. 3. Шероховатость отражающей грани решетки: *a* — АСМ топография, $\sigma = 0.35$ nm; *b* — скан поверхности, $R_q = 0.77$ nm.Рис. 4. Моделируемая решетка с периодом $2 \mu\text{m}$: *a* — АСМ топография поверхности площадью $20 \times 20 \mu\text{m}^2$; *b* — профиль усредненного штриха решетки.

Усредненный профиль. Для определения параметров решеток, приведенных в табл. 1, проводится сканирование поля, в которое входит 10 периодов решетки. Пример АСМ топографии $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ для решетки с периодом $2 \mu\text{m}$ приведен на рис. 4, *a*. Для минимизации арте-

фактов сканирование проводится в поперечном, т. е. перпендикулярном штрихам направлении. Из сканов можно получить усредненный по 128 строкам профиль, отражающий некоторые средние параметры решетки [31]. Для получения реалистичного усредненного профиля

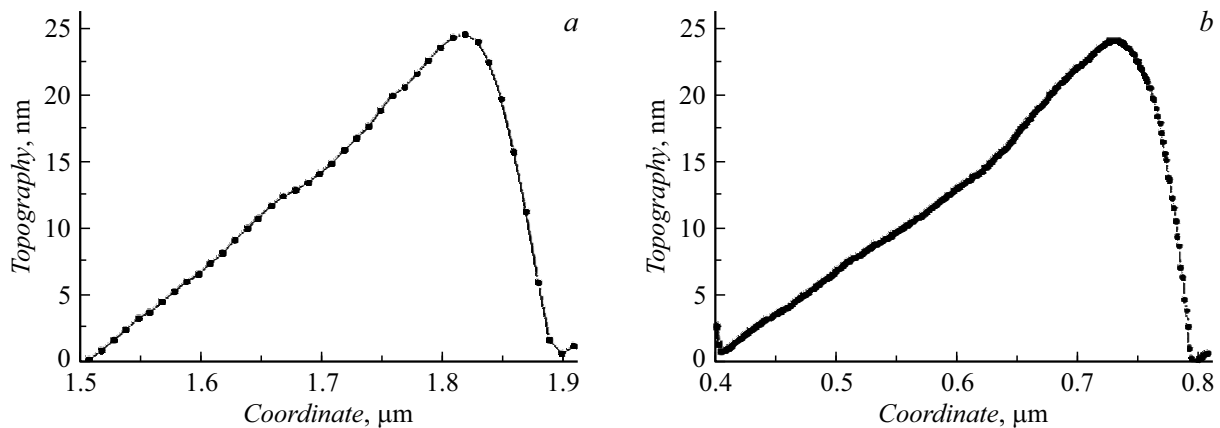


Рис. 5. Профили одного штриха решетки Sv-1, измеренные: *a* — со средней; *b* — с высокой дискретизацией.

одного штриха с целью моделирования эффективности аналогичная процедура проводится в поле с длиной 1.5 периода решетки, из которого берутся точки, которые точно соответствуют одному периоду. Уменьшение размера скана необходимо для увеличения числа точек на профиле штрихов и учета случайной шероховатости. Пример усредненного профиля одного штриха решетки с периодом $2\ \mu\text{m}$ показан на рис. 4, *b*. Подобный профиль используется в программе PCGrateTM для расчета дифракционной эффективности.

Случайный профиль. Для точного учета случайной шероховатости используются несколько не усредненных АСМ сканов профиля штрихов решетки, состоящих из нескольких периодов. В настоящей работе были выполнены измерения случайных профилей штрихов на длине трех периодов в различных областях решетки с высокой дискретизацией (при минимальной скорости сканирования). При режиме измерений с большим числом точек сканирования на профиле учитываются все высоты и пространственные частоты статистической поверхности (обычно определяемые с помощью σ , R_q и ξ), влияющие на рассеяние падающего излучения в том случае, если длина волны сравнима с амплитудой шероховатости с учетом угла падения. Такой подход позволяет использовать полученные статистические профили штрихов в строгих расчетах эффективности и интенсивности рассеянного излучения по методу Монте-Карло.

На рис. 5 для высокочастотной решетки Sv-1 приведены случайные профили одного периода, измеренные со средней и высокой дискретизацией, т.е. со средней и низкой скоростью измерения профиля решетки. Сканирование профилей и измерение шероховатости поверхности решеток выполнены с помощью атомно-силового микроскопа NTegra Aura (Россия).

Моделирование эффективности. Абсолютную дифракционную эффективность исследуемых решеток мы моделировали с использованием полученных реалистичных (усредненных и наборов случайных) профилей штрихов и излучения с различными длинами волн:

0.6–1.4, 11.3, 13.6, 17.1, 30.4 nm. Эффективность определялась с помощью программы PCGrateTM v.6.7.1 [22].

Для моделирования эффективности без учета шероховатости мы использовали усредненный профиль (рис. 4, *b*) штриха решетки. При моделировании эффективности с приближенным учетом шероховатости интерфейсов мы использовали усредненный профиль штриха и поправки NC или DW для полученных значений шероховатости σ [16,31]. Для моделирования эффективности со строгим учетом высокочастотной (σ) и среднечастотной (R_q) шероховатости при любой статистике неровностей (по методу Монте-Карло) мы использовали несколько наборов измеренных (не усредненных) профилей штрихов с несколькими периодами, взятых из различных областей решеток.

3. Численные результаты моделирования и обсуждение

В табл. 2 приведены максимальные значения абсолютной эффективности исследуемых решеток в неполяризованном излучении как в схеме классической (излучение падает и отражается в порядке в плоскости дисперсии — перпендикулярно штрихам), так и конической дифракции (излучение падает вдоль штрихов — при полярном угле, равном углу блеска — и отражается в порядке, располагаемые по конусу) [1,32]. Эффективности в максимумах порядков решетки Si-p-6 на длине волны 17.1 nm и решетки Si-p-3 на длине волны 30.4 nm, рассчитанные в классической схеме без учета и с приближенным учетом шероховатости, практически не отличаются (разность $\leq 1\%$). Для этих ЭУФ решеток с малой σ критерии применимости поправок на шероховатость выполняются с запасом, и нет необходимости использовать точные расчеты по методу Монте-Карло, поэтому в табл. 2 данные таких расчетов не приведены. Аналогично для решетки Si-p-8-2 с золотым покрытием на $\lambda = 11.3\ \text{nm}$ и для решетки Si-13-2 с платиновым покрытием на $\lambda = 13.6\ \text{nm}$ в классической

Таблица 2. Результаты моделирования абсолютной эффективности

Решетка/покрытие/ Λ , nm	Параметры моделирования эффективности		Максимальная абсолютная дифракционная эффективность в неполяризованном излучении, %		
	схема работы/ длина волны, nm	порядок дифракции	без учета σ и R_q	учет σ , приближенно	учет σ и R_q , Монте-Карло
Sv-1/20xMo-Be/11.4	Классическая/11.3	-1	1.7	2.6	18.0
		-2	6.4	3.1	28.2
		-3	42.3	29.5	37.0
		-4	18.5	24.5	6.1
Si-p-8-2/Au	Классическая/11.3	-1	12.1	12.1	15.1
		-2	19.4	19.4	23.7
		-3	29.7	29.5	25.6
		-4	29.5	29.2	18.8
		-5	24.8	24.4	10.3
	Коническая/0.8 nm	-1	61.7	61.6	–
		-2	57.6	57.3	–
		-3	51.5	50.9	–
		-4	45.7	44.7	–
		-5	39.4	38.8	–
		-6	33.7	32.6	–
		-7	28.2	26.4	–
		-8	22.4	20.6	–
		-9	17.5	16.4	–
Si-13-2/Pt	Классическая/13.6 nm	-1	54.0	54.0	–
		-2	37.5	35.8	–
		-3	19.5	17.5	–
		-4	13.1	12.2	–
Si-p-3/10xBe-Mg/32.16	Классическая/30.4 nm	-6	1.8	1.7	–
		-7	8.0	7.9	–
		-8	28.8	28.0	–
		-9	23.2	22.2	–
		-10	5.0	4.6	–
Si-p-6/Au	Классическая/17.1 nm	-1	13.4	13.3	–
		-2	23.2	23.2	–
		-3	29.5	29.4	–
		-4	25.1	25.0	–
		-5	18.6	18.5	–
		-6	11.8	11.8	–

схеме дифракции максимальные эффективности без учета и с приближенным учетом шероховатости различаются незначительно, не более 1–2%. На $\lambda = 0.8$ nm для решетки Si-p-8-2 в конической схеме различие эффективностей с учетом и без учета шероховатости того же порядка ($\leq 1.8\%$), что тоже несущественно. Однако результаты моделирования по методу Монте-Карло, строго учитывающие рассеяние на реалистичных случайно-шероховатых профилях штрихов, показывают значительно большее снижение эффективности для решетки Si-p-8-2. Так, дифракционная эффективность на $\lambda = 11.3$ nm в классической схеме, рассчитанная со строгим учетом шероховатости, меньше на 4.1% в –3-м порядке и в два с лишним раза — в –5-м порядке.

Такое большое различие связано с высокой среднечастотной шероховатостью отражающей поверхности ($R_q = 4.38$ nm), которая не учитывается в приближенном подходе (учитывается только высокочастотная шероховатость), но сильно влияет на уменьшение максимальной дифракционной эффективности и/или ее перераспределение по порядкам и между порядками. Для решетки Si-p-8-2 даже при $\sigma = 2.32$ nm, которая в четыре раза превышает полученную из АСМ оценку высокочастотной составляющей шероховатости, результат приближенного расчета показывает уменьшение эффективности –3 порядка всего на 2%. Еще большие различия между строгим и приближенными подходами наблюдаются для высокочастотной многослойной решетки Sv-1 в предположении вертикальной корреляции границ и шероховатости. Из-за заметного различия формы профиля штрихов по апертуре решетки и даже формы профиля отдельных штрихов в одном АСМ скане эффективность порядков и интенсивность рассеянного излучения меняются значительно — до одного порядка величины — при учете тех или иных реалистичных профилей штрихов. Из данных табл. 2 следует, что приближенный учет шероховатости не работает для случая высокочастотной решетки с малой глубиной и широким спектром корреляционных длин. Для корректной обработки результатов в подобных случаях требуются многочисленные статистические измерения профиля и вычисления на основе точных методов.

Заключение

В работе была подробно исследована форма профиля штрихов и случайная шероховатость пяти дифракционных решеток с различными периодами, углами блеска и покрытиями, изготовленных жидкостным травлением вихриальных пластин Si(111) и предназначенных для применений в МР и ЭУФ диапазонах излучения. Измеренные методом АСМ и статистически усредненные и случайные профили штрихов использовались при моделировании абсолютной дифракционной эффективности на основе строгого метода граничных интегральных уравнений и метода Монте-Карло в программе

PCGrateTM. Точный учет случайной шероховатости сравнивался с приближенным подходом на основе поправок типа Нево-Кросе или Дебая-Валлера. Несмотря на значительные затраты компьютерных ресурсов при точном подходе, данные моделирования не только сравнимы с результатами измерения на синхротроне, но и позволяют определить величину ошибки при использовании любых приближений. Кроме того, данный подход является единственно возможным при учете среднечастотной составляющей шероховатости, что, как показали наши исследования, особенно важно при моделировании эффективности высокочастотных решеток (с периодом сотни нанометров), а также решеток с периодом около одного микрометра. Несмотря на почти идеальный треугольный профиль и малые величины СКО шероховатости изготовленных нами Si-решеток, параметр σ определяет вклад только высокочастотной составляющей шероховатости. Поэтому требуются дополнительные параметры (R_q в нашем случае) и исследования для точного определения статистики неровностей исследуемой поверхности и корректного использования данных при моделировании дифракционной эффективности решеток с реалистичным профилем штрихов и учетом случайной шероховатости.

Финансирование работы

Работа Л.И. Горая, А.С. Дашкова, Д.В. Мохова, Е.В. Пирогова и К.Ю. Шубиной поддержана Российским научным фондом (РНФ) (19-12-00270-П) в экспериментальной части. В части численных расчетов работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) (19-29-12053-мк).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликт интересов.

Список литературы

- [1] L.I. Goray, G. Schmidt. In: *Gratings: Theory and Numerical Applications*, ed. by E. Popov (Institut Fresnel, AMU, 2014), p. 447.
- [2] L. Goray, M. Lubov. *J. Appl. Cryst.*, **46**, 926 (2013). DOI: 10.1107/S0021889813012387
- [3] Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, В.А. Шаров, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков, А.В. Нашекин, М.В. Зорина, М.М. Барышева, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев, Н.И. Чхало. *Квант. электрон.*, **52**(10), 955 (2022). <https://www.mathnet.ru/rus/qe/v52/i10/p955>
- [4] L.I. Goray. *J. Appl. Phys.*, **108**, 033516 (2010). DOI: 10.1063/1.3467937
- [5] D.L. Voronov, E.H. Anderson, R. Cambie, F. Salmassi, E.M. Gullikson, V.V. Yashchuk, H.A. Padmore, M. Ahn, C.-H. Chang, R.K. Heilmann, M.L. Schattenburg. *Proc. SPIE*, **7448**, 74480J (2009). DOI: 10.1117/12.826921

- [6] L. Golub, P. Cheimets, E.E. DeLuca, C.A. Madsen, K.K. Reeves, J. Samra, S. Savage, A. Winebarger, A.R. Brucoleri. *J. Space Weather Space Clim.*, **10**, 37 (2020). DOI: 10.1051/swsc/2020040
- [7] Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, В.А. Шаров, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков. *ЖТФ*, **91**(10), 1538 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51368.81-21
- [8] Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.В. Нашекин, В.А. Шаров, Л.И. Горай, *ЖТФ*, **92**(8), 1192 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52782.74-22
- [9] L. Goray, M. Lubov. *J. Surf. Invest. X-ray Synchrotron Neutron Tech.*, **8**(3), 444 (2014). DOI: 10.1134/S1027451014030057
- [10] L. Goray, M. Lubov. *Opt. Express*, **23**(8), 10703 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.010703
- [11] J.A. Ogilvy. *Rep. Prog. Phys.*, **50**, 1553 (1987). DOI: 10.1088/0034-4885/50/12/001
- [12] D.K.G. de Boer. *Phys. Rev. B*, **51**, 5297 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevB.51.5297
- [13] D.G. Stearns, D.P. Gaines, D.W. Sweeney, E.M. Gullikson. *J. Appl. Phys.*, **84**(2), 1003 (1998). DOI: 10.1063/1.368098
- [14] I.V. Kozhevnikov, M.V. Pyatakhin. *J. X-ray Sci. Tech.*, **8**(4), 253 (1998).
- [15] M. Saillard, D. Maestre, J.P. Rossi. *Opt. Acta*, **33**, 1193 (1986).
- [16] L.I. Goray. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, **536**(1–2), 211 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2004.07.173
- [17] L. Goray. *Proc. SPIE*, **6617**, 661719 (2007). DOI: 10.1117/12.726038
- [18] L. Goray. *Proc. SPIE*, **7390**, 73900V (2009). DOI: 10.1117/12.827444
- [19] Л.И. Горай, Е.В. Пирогов, М.С. Соболев, Н.К. Поляков, А.С. Дашков, М.В. Свечников, А.Д. Буравлев. *ЖТФ*, **90**(11), 1906 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49982.108-20 [L.I. Goray, E.V. Pirogov, M.S. Sobolev, N.K. Polyakov, A.S. Dashkov, M.V. Svechnikov, A.D. Bouravlev. *Tech. Phys.*, **65**(11), 1822 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110134]
- [20] L. Goray, E. Pirogov, M. Sobolev, I. Pkiv, A. Dashkov, E. Nikitina, E. Ubyivovk, L. Gerchikov, A. Ipatov, Yu. Vainer, M. Svechnikov, P. Yunin, N. Chkhalo, A. Bouravlev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 455103 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/aba4d6]
- [21] L. Goray. *J. Synchrotron Radiat.*, **28**, 196 (2021). DOI: 10.1107/S160057752001440X
- [22] I.I.G., Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://pcgrate.com>, свободный (дата обращения 06.03.2023).
- [23] Л.И. Горай, Н.И. Чхало, Ю.А. Вайнер. *Письма в ЖТФ*, **36**(3), 31 (2010). [L.I. Goray, N.I. Chkhalo, Yu.A. Vainer, *Tech. Phys. Lett.*, **36**(2), 108 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010020057]
- [24] Л.И. Горай, Н.И. Чхало, Г.Э. Цырлин. *Письма в ЖТФ*, **79**(4), 117 (2009). [L.I. Goray, N.I. Chkhalo, G.E. Tsyrlin. *Tech. Phys.*, **54**, 561 (2009). DOI: 10.1134/S1063784209040185]
- [25] Л.И. Горай, Е.В. Пирогов, М.В. Свечников, М.С. Соболев, Н.К. Поляков, Л.Г. Герчиков, Е.В. Никитина, А.С. Дашков, М.М. Борисов, С.Н. Якунин, А.Д. Буравлев. *Письма в ЖТФ*, **47**(15), 7 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51225.18824 [L.I. Goray, E.V. Pirogov, M.V. Svechnikov, M.S. Sobolev, N.K. Polyakov, L.G. Gerchikov, E.V. Nikitina, A.S. Dashkov, M.M. Borisov, S.N. Yakunin, A.D. Bouravlev. *Tech. Phys. Lett.*, **47**(10), 757 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021080071]
- [26] M. Lubov, L. Goray. *J. Synchrotron Rad.*, **26**, 1539 (2019). DOI: 10.1107/S1600577519006337
- [27] L.I. Goray, V.E. Asadchikov, B.S. Roshchin, Yu.O. Volkov, A.M. Tikhonov. *OSA Continuum*, **2**(2), 460 (2019). DOI: 10.1364/OSAC.2.000460
- [28] L.I. Goray, J.F. Seely. *Appl. Opt.*, **41**(7), 1434 (2002). DOI: 10.1364/AO.41.001434
- [29] Л.И. Горай, Т.Н. Березовская, Д.В. Мохов, В.А. Шаров, К.Ю. Шубина, Е.В. Пирогов, А.С. Дашков. *Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед.*, **8**, 3 (2023).
- [30] Gwyddion download [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gwyddion.net/download.php>, свободный (дата обращения 22.05.2023).
- [31] L.I. Goray, In: *Recent Developments in Atomic Force Microscopy and Raman Spectroscopy for Materials Characterization*, ed. by C.S. Pathak, S. Kumar (IntechOpen, 2022), 274 p. DOI: 10.5772/intechopen.94185
- [32] L. Goray, W. Jark, D. Eichert. *J. Synchrotron Radiat.*, **25**, 1683 (2018). DOI: 10.1107/S1600577518012419