09

Изготовление и исследование характеристик металлических реплик дифракционных решеток с блеском для рентгеновского диапазона

© Т.Н. Березовская,[1] Д.В. Мохов,[1,2] Н.А. Костромин,[1,2] К.Ю. Шубина,[1] Н.Д. Прасолов,[3] Е.В. Пирогов,[1] Л.И. Горай,[1,2,4] А.Д. Буравлев[2,3,4]

[1] Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия
[3] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[4]Институт аналитического приборостроения РАН,
198095 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: dm_mokhov@rambler.ru

Поступило в Редакцию 15 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 15 апреля 2026 г.
Принято к публикации 15 апреля 2026 г.

Для точной передачи неглубоких треугольных профилей и сохранения безупречных характеристик дифракционных решеток с блеском, предназначенных для использования в рентгеновских приборах, включая синхротроны четвертого поколения и рентгеновские лазеры на свободных электронах, были использованы атомно-уровневые бесконтактные методы нанесения металлов на поверхность штрихов. Предложенный нами способ позволяет воспроизводить наноразмерные треугольные профили штрихов, сохраняя при этом угол блеска и субатомную шероховатость, тем самым обеспечивая минимальное поглощение и рассеяние рентгеновского излучения. Профили Si-мастер-решеток с плотностью штрихов 250 mm^{-1}, углами блеска ~ 1 и $\sim 4^\circ$, глубиной штриха 60 и 230 nm были успешно перенесены в слой золота термическим напылением. В качестве выравнивающего слоя использовали никель гальванического осаждения.

Ключевые слова: рентгеновский диапазон, дифракционная Si-решетка с блеском, треугольный профиль штриха, нанокопирование, металлическая реплика решетки, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63507.104-26

Введение

Отражательные дифракционные решетки с блеском используются в спектроскопии мягкого рентгеновского излучения высокого разрешения, в резонансном неупругом рассеянии рентгеновского излучения, в проекционной литографии в крайнем ультрафиолетовом диапазоне и за его пределами, в приборах космических миссий, а также в первичных пучках и экспериментальных станциях источников синхротронного излучения четвертого поколения и рентгеновских лазеров на свободных электронах [1–5].

Наша группа занимается изготовлением и исследованием отражающих кремниевых дифракционных решеток с асимметричным треугольным профилем с плотностью штрихов от 100 до 2500 mm^{-1}, получаемых методом анизотропного жидкостного травления и предназначенных для применения в широком спектральном диапазоне, от мягкого рентгеновского до дальнего инфракрасного излучения. Мы достигли прогресса в изготовлении и тестировании рентгеновских дифракционных кремниевых решеток- мастеров с блеском, работающих в высоких порядках с рекордной эффективностью [6–8]. Тем не менее по-прежнему изготовление высококачественных крупногабаритных кремниевых мастер-решеток с любой плотностью штрихов является сложной технологической задачей.

Для обеспечения возможности изготовления дифракционных решеток с одинаковыми характеристиками, а также решеток большой площади (например, для космических телескопов), требуется эффективный метод копирования кремниевых мастер-решеток. В настоящее время для копирования наноразмерных объектов используется контактная печать (наноимпринтинг), основанная на впечатывании мастера или штампа в мягкую полимерную пленку с последующим термическим или УФ отверждением (NIL), или субстратконформная импринт-литография (SCIL). Воспроизведенные $3D$-нанообъекты используются в качестве конечных структур или для производства многоразового штампа. На основе результатов по копированию одного и того же Si-мастера высокочастотной решетки с блеском (период 160 nm, глубина штриха ~ 70 nm, угол блеска $\sim 29.5^\circ$, $RMS = 0.4$ nm) методом NIL с использованием дорогостоящего оборудования для наноимпринтинга NX-2000 от Nanonex Corp. [9] и методом SCIL с ис-

пользованием золь-гелевого процесса на оборудовании Philips SCIL Nanoimprint Solutions [10] можно сделать вывод, что коммерческие методы переноса профиля штриха Si-решетки-мастера в копию контактной печатью как NIL, так и SCIL не обеспечивают необходимую точность передачи формы профиля штрихов решетки-мастера из-за скругления углов, уменьшения угла блеска и глубины штриха вследствие усадки материала, увеличения шероховатости и изогнутости поверхности отражающей грани, что приводит к уменьшению дифракционной эффективности копии. Кроме того, материалы копий рентгеновской дифракционной решетки должны обеспечивать долговечность и работоспособность в условиях высокоэнергетического излучения, например, должны быть твердыми, но не хрупкими, иметь хорошую теплопроводность для возможности охлаждения из-за нагрева высокоэнергетическим излучением синхротрона или рентгеновского лазера на свободных электронах, чего не могут обеспечить ни УФ- или термоотверждаемые резисты в NIL, ни золь-гель резисты в SCIL. Следовательно, необходимы новые подходы для точного переноса формы профиля и тонкой структуры штрихов с оригинала в копию, особенно при малых углах блеска и высоких порядках, необходимых для рентгеновских дифракционных решеток [11].

Мы используем при копировании бесконтактные методы осаждения металлов (Au и Ni) на атомном уровне на поверхность штрихов Si мастер-решеток для точной передачи неглубоких треугольных профилей и сохранения высокой дифракционной эффективности. Металл, как материал для копий или штампов дифракционных решеток, обладает многими преимуществами по сравнению с полимерами: прочностью, твердостью, теплопроводностью, электропроводностью, высокой износостойкостью, а такие металлы, как Au, Pt и Al, имеют высокую отражательную способность в различных спектральных диапазонах. Мы применяем следующие критерии хорошего качества получаемых копий: изменение угла наклона в пределах $\pm 5\,\%$; изменение глубины штриха в пределах $\pm 10\,\%$; изогнутость отражающей грани не должна увеличиваться более чем на $0.2\,^\circ$; среднеквадратичная шероховатость RMS (в поле $1 \times 1\,\mu\mathrm{m}^2$) должна соответствовать требованиям к дифракционным решеткам в зависимости от их рабочего спектрального диапазона; снижение абсолютной эффективности дифракции не более чем на $10\,\%$ от максимального значения для соответствующего блестящего порядка решетки-мастера.

В настоящей работе мы представляем результаты исследований реплик среднечастотных Si-мастер-решеток, сравнивая мастер-решетки и полученные на их основе реплики по характеристикам профиля (значениям угла блеска, глубины штриха, изогнутости и шероховатости отражающей грани), измеренным методами АСМ и РЭМ, и по дифракционной эффективности, рассчитанной с использованием компьютерной программы PCGrate^{TM} [12], путем сравнения по выше изложенным критериям.

Кроме того, мы предлагаем новый способ оценки качества полученных копий путем сравнения прямого профиля мастер-решетки с инвертированным профилем реплики или, наоборот, сравнением инвертированного профиля мастер-решетки с прямым профилем реплики, используя при этом как характеристики профиля, так и моделированные значения дифракционной эффективности.

1. Описание мастер-решеток

В качестве мастер-решеток для получения реплик мы использовали ранее изготовленные нашей группой среднечастотные кремниевые решетки с плотностью штрихов $250\,\mathrm{mm}^{-1}$ в виде фрагментов размером 1/4 часть пластины Ø 76.2 mm. Выбранные решетки с блеском должны иметь практически идеальный треугольный профиль штрихов с гладкой и плоской поверхностью отражающих граней, который описывается следующими количественными характеристиками. Асимметрия профиля треугольных штрихов характеризуется отношением угла антиблеска β к углу блеска α, которое должно составлять, по крайней мере, несколько единиц для высокоэффективных рентгеновских решеток с блеском. Углом антиблеска называют угол наклона грани, противоположной отражающей грани. Гладкость отражающей поверхности штрихов характеризуется значениями высокочастотной шероховатости, $RMS \leq 0.50\,\mathrm{nm}$ (в поле $1 \times 1\,\mu\mathrm{m}^2$), и среднечастотной шероховатости, $RMS \leq 1.5\,\mathrm{nm}$ (на длине $20\,\mu\mathrm{m}$ вдоль отражающей поверхности) [6]. Плоскостность отражающих граней характеризуется параметром изогнутости $C \lesssim 0.1\alpha$ [7]. Характеристики Si мастер-решеток, использованных в данном исследовании для получения реплик, представлены в табл. 1. Погрешность измерения линейных размеров используемого атомно-силового микроскопа NTegra Aura составляет $\pm 1.2\,\%$.

2. Изготовление и характеризация реплик дифракционных решеток

2.1. Изготовление реплик дифракционных решеток

Процесс копирования дифракционной решетки включает пять стадий. В процессе получения металлической копии на поверхности Si мастер-решетки формируют слои в следующей последовательности: 1) антиадгезивный слой — тонкий слой диоксида кремния, получаемый обработкой Si мастер-решетки в „пиранье“ ($H_2SO_4 + H_2O_2$) при нагревании; 2) рельефообразующий слой — термически осажденное золото толщиной 30–40 nm; 3) выравнивающий слой — никель, гальванически осаждаемый из сульфаматного электролита при нагревании до $50\,^\circ\mathrm{C}$, перемешивании с помощью магнитной мешалки и поддержании pH в

Таблица 1. Характеристики мастер-решеток по АСМ измерениям

Характеристика/единица измерения	Si-13-2		Si-11-1-5	
	Значение	СКО	Значение	СКО
Глубина штриха, nm	56	3	226	4
Угол блеска, ° (α)	1.11	0.13	3.70	0.09
Изогнутость грани, ° (C)	0.49	0.12	0.23	0.13
Шероховатость грани, nm (в поле $1 \times 1\,\mu m^2$)	0.49	–	0.42	–
Шероховатость грани, nm ($20\,\mu$m length)	1.04	–	0.98	–
Угол антиблеска (верх/низ), ° (β)	4	–	13/28	–

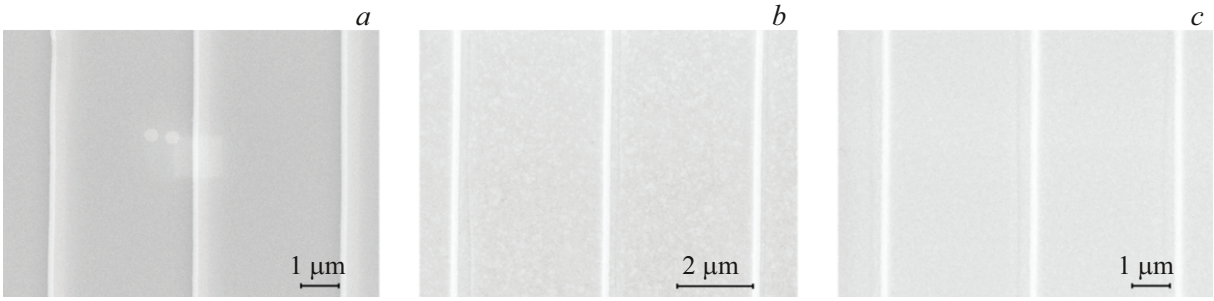

Рис. 1. РЭМ изображения поверхности решетки Si-11-1-5 при увеличении 30 K: *a* — Si мастер-решетка; *b* — Au/Ni-пленка копии; *c* — Ni-пленка копии после удаления слоя Au.

узком диапазоне; 4) затем подложка копии прижимается к плоскости выравнивающего слоя копии, на который предварительно нанесен адгезивный слой; 5) после отверждения адгезива копия-на-подложке (реплика) механически отделяется от Si мастер-решетки по разделительному слою. Подробности разработки и параметры пяти стадий процесса копирования изложены в [13].

2.2. Исследование копий и характеризация реплик дифракционных решеток

Металлическую копию, которая самопроизвольно отделилась от мастер-решетки в виде Au/Ni-пленки, будем далее называть копией. Копию-на-подложке (т. е. Au/Ni-пленку-на-подложке), которую отделили от Si мастер-решетки по разделительному слою, будем называть репликой. Полученные реплики и копии исследовали с помощью АСМ и РЭМ (с помощью РЭМ мы измеряли только период решетки). Пределы допускаемой погрешности измерения линейных размеров с помощью РЭМ Supra25 в диапазоне от 0.8 до $5000\,\mu$m составляют не более 4 %.

Первую металлическую копию решетки Si-11-1-5 толщиной $\sim 9\,\mu$m, которая самопроизвольно отделилась от мастера в виде Au/Ni-пленки, исследовали с помощью РЭМ (рис. 1, *b*). По результатам РЭМ измерений период решетки Si-11-1-5 составил для мастера $3.94\,\mu$m (рис. 1, *a*), для Au/Ni-пленки копии $3.87\,\mu$m. Ранее мы также наблюдали для решетки Si-11-1-6 уменьшение периода у самопроизвольно отделившейся Au/Ni-пленки по сравнению с периодом мастера на $0.03\,\mu$m [13]. Скорее всего, наблюдаемое уменьшение периода Au/Ni-пленки копии по сравнению с периодом мастера можно объяснить сжимающим напряжением пленки никеля, которая, скорее всего, из-за напряжения сжатия самопроизвольно отслаивается от поверхности мастера.

Затем мы удалили золото с Au/Ni-пленки копии Si-11-1-5 селективным травлением в водном растворе KJ/J_2 (рис. 1, *c*). После удаления золота с поверхности Au/Ni-пленки копии значение периода решетки для Ni-пленки увеличилось на $0.05\,\mu$m и составило $3.92\,\mu$m. Это можно объяснить релаксацией Ni-пленки после удаления золота или ее растяжением при операциях в процессе удаления золота, или и тем и другим.

После самопроизвольного отделения Au/Ni-пленки от решетки-мастера Si-11-1-5, мы удалили остатки металлов с поверхности мастер-решетки кипячением в царской водке. Для получения реплики № 2 мы обработали мастер-решетку Si-11-1-5 в „пиранье“ и выполнили остальные стадии процесса копирования, кратко описанные в разд. 2.1. Аналогично была получена реплика решетки Si-13-2. Результаты АСМ измерений характеристик двух реплик дифракционных решеток с блеском приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики реплик по АСМ измерениям

Характеристика/единица измерения	Si-13-2, реплика № 1		Si-11-1-5, реплика № 2	
	Значение	СКО	Значение	СКО
Глубина штриха, nm	60	2	236	12
Угол блеска, ° (α)	1.16	0.16	4.02	0.19
Изогнутость грани, ° (C)	−0.52*	–	−0.34*	–
Шероховатость грани, nm (в поле $1 \times 1\,\mu m^2$)	1.17	–	3.67	–

Примечание. * знак минус означает выпуклость.

2.3. Моделирование дифракционной эффективности

Ранее в нашей работе [8] было показано на примере двух дифракционных решеток (одна с Au-покрытием, другая с покрытием пятью бислоями Mo/Si), что результаты измерений и моделирования дифракционной эффективности решетки показывают хорошее совпадение: разность экспериментальных и теоретических значений эффективности составляет 0.04 %–0.35 % в абсолютных значениях, что находится в диапазоне погрешностей измерений и расчетов. Сравнение с данными измерений эффективности, выполненными на источнике синхротронного излучения, и результатами моделирования для другой нашей решетки было получено в [14].

Все расчеты дифракционной эффективности выполнены с использованием компьютерной программы PCGrate™ [12], основанной на разработанном в нашей группе строгом методе граничных интегральных уравнений, и усредненных АСМ-измеренных профилей штрихов. Показатели преломления материала покрытия брались из базы данных LBNL, Беркли, США (CXRO — Henke et al. [15]). Погрешность расчетов, оцененная из энергетического баланса, составила не более 0.1 %.

В табл. 3 представлены результаты моделирования абсолютной дифракционной эффективности в классической схеме для мастеров и реплик: для решетки Si-13-2 с Pt-покрытием при падении неполяризованного излучения с длиной волны 13.6 nm, для обеих (Si-13-2 и Si-11-1-5) решеток с Au-покрытием при падении излучения с TE-поляризацией и длиной волны 11.3 nm. Знаки углов блеска выбираются по Картезианскому соглашению (минус соответствует внутреннему порядку).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Критерии точности передачи профилей дифракционных решеток

Авторы поставили перед собой задачу разработать способ точной передачи особенностей неглубоких треугольных профилей. Ранее [11] мы предложили сравнивать мастер-решетку и реплику по значениям характеристик профиля и дифракционной эффективности в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом излучении. При таком подходе остается нерешенной проблема объективного сравнения собственно формы профилей штрихов с точки зрения точности передачи особенностей профиля мастера в профиль металлической копии. Во-первых, как передается изгиб отражающей грани, ведь в мастер-решетке он проявляется как вогнутость, а в копии становится выпуклостью, и как сравнивать вогнутость отражающей грани мастера с выпуклостью отражающей грани реплики? Во-вторых, насколько валидным является сравнение дифракционной эффективности мастер-решетки, имеющей вогнутые отражающие грани, с дифракционной эффективностью копии, имеющей выпуклые отражающие грани? В этом случае изменение дифракционной эффективности может быть связано с изменением знака изгиба отражающей грани, а не с точностью передачи особенностей профиля. Поэтому, в-третьих, возникает необходимость исследовать, как изменяется дифракционная эффективность решетки с блеском при изменении знака изгиба отражающей грани с „плюс“ (вогнутость) на „минус“ (выпуклость) при одинаковом численном значении характеристики изгиба. Таким образом мы сможем выяснить, что в данном случае влияет на дифракционную эффективность: отклонения характеристик профиля или знак (направление) изгиба отражающих граней.

Проблема сравнения формы профиля мастера и копии решается довольно просто, если сравнивать инвертированный профиль мастера с прямым профилем реплики или сравнивать прямой профиль мастера с инвертированным профилем реплики. Поскольку при получении реплики происходит инверсия профиля мастера по обеим осям X и Y, такое сравнение профилей будет логичным. Разработанная нашей группой программа обработки профилей дифракционных решеток с блеском GratingAnalyzer позволяет получать из прямого профиля инвертированный и определять его характеристики.

С помощью программы PCGrate™ была смоделирована дифракционная эффективность решеток (результаты в табл. 3), чтобы выяснить влияние на ее значение изменения изгиба отражающей грани с вогнутости на выпуклость. При моделировании использовали сгенерированные в программе GratingAnalyzer усредненные про-

Таблица 3. Расчетные значения дифракционной эффективности мастеров и реплик решеток

Решетка/покрытие/длина волны, nm	Порядок дифракции	Максимальная абсолютная дифракционная эффективность,%			
		Профиль мастера		Профиль реплики	
		Прямой	Инвертированный	Прямой	Инвертированный
1	2	3	4	5	6
Si-13-2/Pt/13.6	−1	53.8	–	49.0	–
Si-13-2/Au/11.3	−1	57.0	51.7	50.1	59.1
	−2	37.1	34.0	33.8	45.4
	−3	22.7	22.0	23.5	30.2
Si-11-1-5/Au/11.3	−9	33.8	33.5	28.8	26.0
	−10	34.0	33.9	29.2	26.2
	−11	33.6	33.3	28.4	26.7

фили одного штриха для прямого и инвертированного профилей реплики и мастера решеток Si-11-1-5 и Si-13-2.

3.2. Характеристики профиля штриха

В программе GratingAnalyzer были рассчитаны такие значения характеристик плоскостности отражающих граней как общепринятые кривизна („curvature“, μm^{-1}) и прогиб („deflection“, μm), иногда называемый провисанием („sagging“, „sag“, nm) [16], так и ранее [7] предложенная нами характеристика изогнутость („camber“, °). В табл. 4 приведены средние значения углов блеска, глубины штриха и характеристик плоскостности отражающих граней для прямого и инвертированного профилей мастеров и реплик решеток по АСМ измерениям.

Для понимания погрешности при оценке совпадения и несовпадения сравниваемых профилей на рис. 2 приведены прямые усредненные профили одного штриха мастер-решетки Si-11-1-5, сгенерированные с помощью программы GratingAnalyzer на основе измеренных в трех областях профилей длиной от 8 до 10 периодов (в области № 1 выполнено два измерения: на длине 8 и 10 периодов). Как видно на рис. 2, профили практически идеально сливаются в одну линию как отражающими

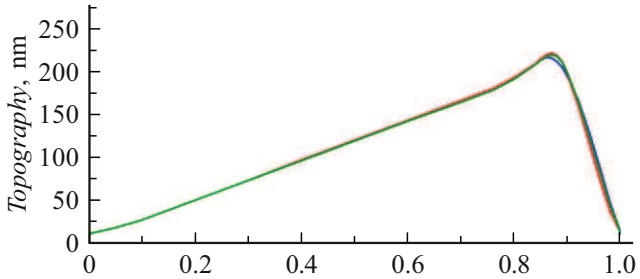

Рис. 2. Усредненные профили одного штриха мастер-решетки Si-11-1-5, измеренные в разных областях решетки: область 1 — усреднение по 10 периодам (синий) и по 8 периодам (красный); область 2 — усреднение по 9 периодам (зеленый); область 3 — усреднение по 9 периодам (оранжевый).

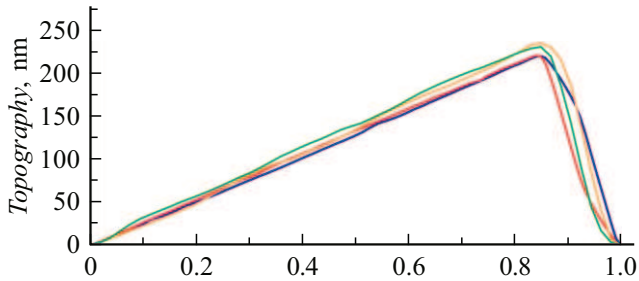

Рис. 3. Усредненные профили одного штриха решетки Si-11-1-5: мастер — прямой (синий), инвертированный (красный); реплика — прямой (зеленый), инвертированный (оранжевый).

гранями, так и гранями антиблеска, и различаются только глубиной штриха, варьируемой от 224 до 230 nm (средние значения для измеренных областей).

На рис. 3 приведены прямой и инвертированный усредненные профили одного штриха мастера и реплики решетки Si-11-1-5, на котором видно, что в нижней части профиля отражающие грани четырех профилей постепенно сливаются в одну линию, но заметно расходятся в верхней части профиля, поскольку различаются знаком и значением изгиба отражающих граней (табл. 4). Со стороны грани антиблеска наблюдаются заметные различия линий профилей, при этом более близки между собой профиль мастера (синий) и инвертированный профиль реплики (оранжевый), а также инвертированный профиль мастера (красный) и прямой профиль реплики (зеленый). На рис. 3 также видно, что глубина штриха прямого и инвертированного профилей практически совпадает как для мастера (синий и красный), так и для реплики (зеленый и оранжевый).

На рис. 4 приведены прямой и инвертированный усредненные профили одного штриха мастера и реплики решетки Si-13-2, на котором видно, что прямой профиль мастера (красный) и инвертированный профиль реплики (оранжевый) очень похожи и полностью сливаются отражающими гранями в одну линию. При этом на

Таблица 4. Характеристики плоскостности отражающих граней мастеров и реплик

Характеристика/единица измерения	Si-13-2				Si-11-1-5			
	Мастер		Реплика № 1		Мастер		Реплика № 2	
	Прямой	Инвертированный	Прямой	Инвертированный	Прямой	Инвертированный	Прямой	Инвертированный
Глубина штриха, nm	56	57	60	58	226	223	236	236
Угол блеска, ° (α)	1.11	1.09	1.16	1.10	3.70	3.71	4.02	4.03
Изогнутость грани, °	0.49	−0.53*	−0.52*	0.43	0.23	−0.18*	−0.34*	−0.18*
Кривизна грани, μm^{-1}	0.49	−0.53*	−0.52*	0.43	0.23	−0.17*	−0.34*	−0.18*
Прогиб грани (max), nm	−9.1	9.1	11.5	−10.0	−4.2	4.2	16.8	−16.8

Примечание. * знак минус означает выпуклость.

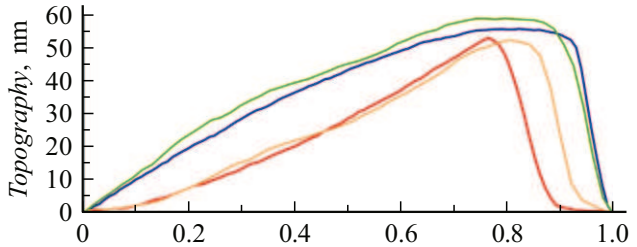

Рис. 4. Усредненные профили одного штриха решетки Si-13-2: мастер — прямой (красный), инвертированный (синий); реплика — прямой (зеленый), инвертированный (оранжевый).

инвертированном профиле реплики (оранжевый) длина отражающей грани больше на 115 nm, а изогнутость отражающей грани меньше на 0.06°, чем на прямом профиле мастера (красный). Увеличение длины и уменьшение изогнутости отражающей грани привели к увеличению значений абсолютной дифракционной эффективности при длине волны $\lambda = 11.3$ nm на 2.1 % в −1-м порядке, на 8.3 % в −2-м порядке, на 7.5 % в −3-м порядке для реплики с инвертированным профилем в сравнении с дифракционной эффективностью мастера с прямым профилем (табл. 3, столбцы 3 и 6). Примечательно, что с увеличением порядка дифракции увеличивается прирост дифракционной эффективности.

3.3. Дифракционная эффективность мастеров и реплик

3.3.1. Инверсия профилей мастеров и реплик

Чтобы выяснить, влияет ли на эффективность дифракции изменение изгиба отражающей грани с вогнутости на выпуклость и наоборот с выпуклости на вогнутость, была рассчитана абсолютная дифракционная эффективность с использованием прямого и инвертированного профилей мастера и реплики решеток Si-11-1-5 и Si-13-2.

Для мастера Si-11-1-5 снижение значений абсолютной эффективности дифракции инвертированного профиля в сравнении с прямым профилем составило 0.3 % для −9-го порядка, 0.1 % для −10-го порядка и 0.3 % для −11-го порядка (табл. 3, столбцы 3 и 4). Этот результат означает, что инверсия профиля мастера не привела к существенному изменению дифракционной эффективности. Для реплики Si-11-1-5 значения абсолютной эффективности дифракции инвертированного профиля в сравнении с прямым профилем снизились на 2.8 % для −9-го порядка, на 3.0 % для −10-го порядка и на 1.7 % для −11-го порядка (табл. 3, столбцы 5 и 6). Этот результат означает, что инверсия профиля реплики приводит к некоторому уменьшению дифракционной эффективности, что, по-видимому, связано с изменением знака (направления) прогиба и численного значения изогнутости (кривизны) отражающей грани.

Для мастера Si-13-2 снижение значений абсолютной эффективности дифракции инвертированного профиля в сравнении с прямым профилем составило 5.3 % для −1-го порядка, 3.1 % для −2-го порядка, 0.7 % для −3-го порядка (табл. 3, столбцы 3 и 4). Этот результат означает, что инверсия профиля мастера приводит к уменьшению дифракционной эффективности, что, по-видимому, связано с изменением знака (направления) прогиба и изогнутости (кривизны), а также с увеличением численного значения изогнутости (кривизны) отражающей грани. Для реплики Si-13-2 наблюдается увеличение значения абсолютной эффективности дифракции инвертированного профиля в сравнении с прямым профилем на 9.0 % для −1-го порядка, на 11.6 % для −2-го порядка и на 6.7 % для −3-го (табл. 3, столбцы 5 и 6). Этот результат означает, что инверсия профиля реплики приводит к существенному увеличению дифракционной эффективности, что, по-видимому, связано с изменением знака изгиба отражающей грани „минус“ (выпуклость) на „плюс“ (вогнутость) и уменьшением численного значения изогнутости (кривизны) отражающей грани.

3.3.2. Сравнение эффективности мастера и реплики по прямым профилям

Реплика Si-11-1-5 показала снижение абсолютной дифракционной эффективности относительно максимального значения для мастер-решетки при $\lambda = 11.3$ nm на 14.8 % для −9-го порядка, на 14.1 % для −10-го порядка и на 15.5 % для −11-го порядка (табл. 3, столбцы 3 и 5), что превышает установленное нами требование (относительное уменьшение не более чем на 10 %). Однако следует отметить, что реплика Si-11-1-5 все еще имеет достаточно высокие значения абсолютной дифракционной эффективности и может использоваться в высоких порядках. Абсолютная эффективность дифракции при $\lambda = 11.3$ nm реплики Si-13-2 относительно максимального значения для мастер-решетки уменьшилась на 12.1 % для −1-го порядка и на 8.9 % для −2-го порядка, при этом для −3-го порядка немного увеличилась — на 3.5 % (табл. 3, столбцы 3 и 5), что соответствует установленному нами требованию.

4. Выводы

Результаты исследования характеристик профиля и дифракционной эффективности полученных реплик показывают, что выбранные нами атомно-уровневые бесконтактные методы нанесения металлов на поверхность штрихов обеспечивают точность передачи особенностей асимметричных треугольных профилей, сохраняя при этом малый угол блеска и характеристики штриха. Инверсия профиля мастер-решетки с приемлемой изогнутостью не приводит к существенному изменению абсолютной дифракционной эффективности. При этом инверсия профилей мастера с высокой изогнутостью и реплик влечет за собой значимое изменение (увеличение или уменьшение) абсолютной дифракционной эффективности, связанное, по-видимому, с изменением знака и численных значений прогиба и изогнутости (кривизны) отражающей грани. Требуются дополнительные исследования для выяснения причин изменения (увеличения или уменьшения) эффективности дифракции при инверсии профилей как мастера, так и реплики.

Заключение

С использованием бесконтактных методов осаждения металлов (Au и Ni) на поверхность штрихов Si мастер-решеток были получены реплики двух Si мастер-решеток с одинаковой плотностью штрихов 250 mm^{-1} и различными углами блеска и глубиной штриха. Согласно расчетам, абсолютная дифракционная эффективность реплики с углом блеска $\sim 4^\circ$ и глубиной штриха 236 nm, с Au-покрытием составила 29.2 % в −10-м порядке на длине волны 11.3 nm. Реплика с углом блеска $\sim 1^\circ$ и глубиной штриха 60 nm продемонстрировала абсолютную дифракционную эффективность с Pt-покрытием 49.0 % в −1-м порядке при длине волны 13.6 nm, а с Au-покрытием 50.1 % в −1-м порядке при длине волны 11.3 nm.

Результаты АСМ исследований характеристик профиля полученных реплик показали, что неглубокие треугольные профили точно перенесены в слой золота, что обеспечило высокую дифракционную эффективность реплик кремниевых мастер-решеток в рентгеновском диапазоне. Таким образом, предложенный нами способ позволяет точно передавать особенности неглубоких треугольных профилей, сохраняя при этом малый угол блеска и субатомную шероховатость, что обеспечивает минимальное поглощение и рассеяние рентгеновского излучения.

Мы также предложили и использовали для анализа новый способ оценки качества полученных реплик, используя сравнение прямого профиля мастер-решетки с инвертированным профилем реплики или сравнение инвертированного профиля мастер-решетки с прямым профилем реплики, учитывая при этом как характеристики профиля, так и расчетные значения дифракционной эффективности.

Наши дальнейшие усилия будут направлены на улучшение качества изготовления реплик, в первую очередь уменьшение шероховатости отражающей грани и ее кривизны. Мы предполагаем изготовить вторую реплику, используя первую реплику в качестве мастера, что позволит нам сравнить прямой профиль полученной второй реплики с профилем мастера и инвертированным профилем первой реплики. Таким образом мы сможем проверить надежность предложенного нами нового способа оценки качества полученной реплики путем сравнения с прямым профилем мастер-решетки инвертированного профиля реплики.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 25-12-00139).

Теоретическое исследование было частично поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации (№ FSRM-2026-0034).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Q. Huang, V. Medvedev, R. van de Kruijs, E. Yakshin, A. Louis, F. Bijkerk. Appl. Phys. Rev., **4**, 011104 (2017). https://doi.org/10.1063/1.4978290

[2] D.L. Voronov, E.H. Anderson, R. Cambie, S. Cabrini, S.D. Dhuey, L.I. Goray, E.M. Gullikson, F. Salmassi, T. Warwick, V.V. Yashchuk, H.A. Padmore. Opt. Express, **19** (7), 6320 (2011). https://doi.org/10.1364/OE.19.006320

[3] H. Kierey, K.F. Heidemann, B.H. Kleemann, R. Winters, W.J. Egle, W. Singer, F. Melzer, R. Wevers. M. Antoni. Proc. SPIE, **5193**, 70 (2004) https://doi.org/10.1117/12.507741
[4] H.N. Chapman. IUCrJ, **10** (3), 246 (2023). https://doi.org/ 10.1107/S2052252523003585
[5] N. Huang, H. Deng, B. Liu, D. Wang, Z. Zhao. Innovation, **2** (2), 100097 (2021). https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021. 100097
[6] L.I. Goray, V.A. Sharov, D.V. Mokhov, T.N. Berezovskaya, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov, A.D. Bouravleuv. Tech. Phys., **68** (1), S51 (2023), https://doi.org/10.1134/S1063784223090062
[7] L.I. Goray, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, V.A. Sharov, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov. J. Surf. Investig., **17** (1), S104 (2023). https://doi.org/10.1134/S1027451023070145
[8] 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.Y. Zuev, N.I. Chkhalo. Bull. Lebedev Phys. Inst., **50** (2), S250 (2023). https://doi.org/10.3103/S1068335623140063
[9] D.M. Miles, J.A. McCoy, R.L. McEntaffer, C.M. Eichfeld, G. Lavallee, M. Labella, W. Drawl, B. Liu, C.T. DeRoo, T. Steiner. Astrophys. J., **869**, 95 (2018). https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaec73
[10] J.A. McCoy, M.A. Verschuuren, D.M. Miles, R.L. McEntaffer. OSA Continuum, **3** (11), 3141 (2020). https://doi.org/10.1364/OSAC.402405
[11] S. Park, F. Riminucci, D.L. Voronov, H.A Padmore. Nanotechnology, **37**, 045301 (2026). https://doi.org/10.1088/1361-6528/ae36b3
[12] Л.И. Горай, С.Ю. Садов. *Компьютерная программа PCGrate*™ [Интернет-ресурс]. URL: www.pcgrate.com (дата обращения 03.03.2026).
[13] D.V. Mokhov, T.N. Berezovskaya, L.I. Goray, A.V. Uvarov, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, N.D. Prasolov, N.A. Kostromin, A.D. Bouravleu. Radiation Phys. Chem., **244**, 113759 (2026). https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2026.113759
[14] K.V. Nikolaev, L.I. Goray, P.S. Savchenkov, A.V. Rogachev, A.A. Chouprik, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, A.D. Buravleuv, S.N. Yakunin. Submitted to JACr (2025), https://arxiv.org/abs/2507.23513
[15] B. Henke, E. Gullikson, J. Davis. Atomic Data and Nuclear Data Tables, **54** (2), 181 (1993). https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092640X83710132
[16] D.L. Voronov, P. Lum, P. Naulleau, E.M. Gullikson, A.V. Fedorov, H.A. Padmore. Appl. Phys. Lett., **109**, 043112 (2016). http://dx.doi.org/10.1063/1.4960203