09

Изготовление дифракционных решеток с блеском с переменной плотностью штрихов

© Д.В. Мохов,[1,2] Т.Н. Березовская,[1] К.Ю. Шубина,[1] Е.В. Пирогов,[1] Н.Д. Прасолов,[3] Л.И. Горай,[1,2,4,5] 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
[5] Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Россия
e-mail: dm_mokhov@rambler.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 29 апреля 2025 г.
Принято к публикации 29 апреля 2025 г.

Решетки с блеском и переменным расстоянием между штрихами (VLS) изготовлены на кремниевых подложках с использованием прямой лазерной литографии и анизотропного жидкостного травления. Параметры решеток в процессе изготовления контролировались с помощью методов растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Сообщено о деталях изготовления и характеристиках прототипов VLS-решетки с различными углами блеска, предназначенной для полихроматора солнечно-слепой части УФ диапазона.

Ключевые слова: дифракционная Si-решетка, решетка с переменным периодом, угол блеска, треугольный профиль штриха, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, солнечно-слепой ультрафиолет.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61339.75-25

Введение

В справочнике по дифракционным решеткам [1] указывается, что в 1893 г. M.A. Cornu понял, что изменения в расстоянии между штрихами изменяют кривизну дифрагированных волновых фронтов, и плоская классическая решетка будет фокусировать дифрагированный свет, если разметить ее с систематической „ошибкой“ в расстоянии между штрихами. M.A. Cornu проверил это, разметив три решетки, положения штрихов которых были заданы как изменяющиеся при разметке каждого штриха. Такие решетки, в которых рисунок прямых параллельных штрихов имеет переменный, но четко определенный (хотя и не периодический) интервал между последовательными штрихами, теперь называются решетками с переменным расстоянием между штрихами (Varied Line Spacing — далее VLS).

Для удовлетворения высоких требований по разрешению и эффективности дифракционные решетки должны иметь большую однородную апертуру, точное положение штрихов и оптимизированную форму профиля канавки. VLS-решетки часто используются в оптических схемах с сохранением яркости, поскольку они сочетают в одном оптическом элементе как дифракционные, так и фокусирующие возможности [2]. Плотность штрихов VLS-решетки меняется по длине решетки по полиноминальному закону, описываемому формулой

$$p_x = mp_0 + mp_1 \cdot x + mp_2 \cdot x^2 + mp_3 \cdot x^3 + mp_4 \cdot x^4, \quad (1)$$

где x — расстояние по длине решетки, m — порядок дифракции решетки, p_i — коэффициенты в уравнении полиноминального закона. Точность размещения штрихов имеет решающее значение для VLS-решетки, поскольку линейное изменение плотности штрихов по длине решетки определяет фокусировку, а квадратичный член обеспечивает контроль аберраций [2].

Впервые изготовление VLS-решеток, нарезанных с помощью числового программного управления линейчатым двигателем делительной машины, было осуществлено Ф.М. Герасимовым и его коллегами из Советского Союза [3] и T. Harada и его коллегами из Японии [4,5]. Нарезные VLS-решетки изготавливали для самых разных приложений: вогнутые решетки нормального падения с коррекцией аберраций для монохроматоров Seya-Namioka и оптических демультиплексоров; вогнутые решетки скользящего падения для диагностики плазмы; решетки скользящего падения с коррекцией аберраций

для космических спектрометров; фокусирующая решетка скользящего падения для монохроматоров синхротронного излучения и генераторы волнового фронта для видимой интерферометрии оптических поверхностей (особенно асферических) [6].

Voronov et al. [2] сообщили об изготовлении прототипов рентгеновских ламельных VLS-решеток с плотностью штрихов 300 и 600 mm^{-1} с использованием прямой лазерной литографии (DWL) с помощью литографов DWL66 и DWL2000 от Heidelberg™. Качество решеток оценивали по измерению волнового фронта с использованием интерферометра Физо от Zygo™. Точность решеток DWL приближается к точности голографических решеток и может удовлетворять требованиям качества для многих приложений оптической спектроскопии. В работе Voronov et al. [7] сообщили об изготовлении дифракционной ламельной VLS-решетки с плотностью штрихов 200 mm^{-1} с помощью литографа DWL66. Точность размещения канавок была подтверждена измерениями волнового фронта контрольной решетки и сравнением с теоретической вариацией плотности штрихов VLS-решетки. Эта VLS-решетка размерами 30×20 mm используется в пучке синхротрона (СИ), обеспечивая излучение для ЭУФ литографии. В еще одной работе тех же авторов сообщается о разработке процесса изготовления сверхточных дифракционных решеток для рентгеновской спектроскопии высокого разрешения [8]. Описанный в ней процесс основан на наборе нанотехнологических методов, включающих запись рисунка решетки с постоянным или переменным расстоянием между штрихами на кварцевой пластине с помощью электронно-лучевой литографии, перенос рисунка на массивную заготовку путем наноотпечатка большой площади с последующим сухим и/или влажным травлением для формирования профиля канавок. Высокая достоверность этапа переноса наноотпечатка была подтверждена дифференциальными измерениями волнового фронта. С помощью предложенного подхода была изготовлена ламельная VLS-решетка с плотностью штрихов 900 mm^{-1} для мягкого рентгеновского флуоресцентного спектрометра.

Решетки с блеском имеют как минимум вдвое большую эффективность чем ламельные решетки, а в высоких порядках дифракции им нет равных. Например, Goray et al. [9] предложили использовать наноимпринт-копию высокочастотной (5000 mm^{-1}) VLS-решетки с блеском в качестве фильтра спектральной частоты для ЭУФ литографии. Покрытая Mo реплика со средним углом блеска $\sim 13^\circ$ была изготовлена из мастера с углом блеска 7.5°, полученного жидкостным травлением Si-пластины [10]. Теоретическая эффективность решетки, работающей в конической дифракции, с учетом измеренного с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) профиля штриха и среднеквадратичного отклонения (СКО) шероховатости 0.5 nm составила в TM поляризации минус первого порядка более 80 % на длине волны 13.5 nm. Экспериментальная эффективность этой же решетки, измеренная на длине волны 2.5 nm в конической дифракции, составила $\sim 45\,\%$ [11]. Voronov et al. [12] разработали процесс изготовления VLS-решеток с блеском с высокой плотностью штрихов для рентгеновской спектроскопии высокого разрешения с использованием набора методов наноконструирования, включая электронно-лучевую литографию, наноимпринт, анизотропное жидкостное травление и плазменное травление. Авторы [12] сообщают об изготовлении для строящегося спектрометра резонансного неупругого рентгеновского рассеяния (RIXS) на рабочей станции Qerlin синхротрона Advanced Light Source двух полноразмерных высокочастотных рентгеновских VLS-решеток с углами блеска 2.55 и 2.70° с плотностью штрихов 3000 и 6000 mm^{-1}, оптимизированных для работы в 1-м и 2-м отрицательном дифракционном порядке соответственно. Точность позиционирования штрихов была подтверждена измерениями волнового фронта контрольной решетки, записанной одновременно с VLS-решеткой. Авторы [12] также обнаружили, что для этих решеток включение членов полинома 3-го и 4-го порядка (см. формулу (1)) не требуется для получения высокого качества изображения.

Для высокоразрешающих монохроматоров и спектрометров, используемых на рабочих станциях источников СИ 4-го поколения и рентгеновских лазерах на свободных электронах в мягком рентгеновском (MP) и экстремальном УФ диапазонах, а также для планируемых многочисленных космических миссий требуются высокоэффективные и стойкие к мощному излучению дифракционные решетки нового поколения. Общепризнано, что на сегодня таковыми являются решетки „с блеском“ (с несимметричным треугольным профилем штрихов), изготавливаемые на вицинальных пластинах Si с помощью анизотропного жидкостного травления [13–16].

В зависимости от используемого метода литографии (электронная, лазерная, фото- и др.) данная технология позволяет изготавливать решетки с периодами от нескольких десятков нанометров до сотни микрометров и углами блеска от 0.04 до 70°. Получаемые дифракционные Si-решетки характеризуются совершенной треугольной формой профиля штрихов и субатомным уровнем шероховатости, что позволяет широко использовать их в приборах: 1) работающих в любых, в том числе очень высоких порядках спектра (рентгеновские решетки эшелле [17]); 2) со сверхвысоким разрешением $\sim 10^{-6}$ (для RIXS) [18]; 3) с высочайшим отношением сигнал/шум $\sim 10^7 - 10^8$. В частности, для такой решетки с периодом $2\,\mu$m и Mo/Si-многослойным покрытием нами была получена рекордная абсолютная эффективность 40 % на длине волны 13.5 nm в -8 порядке неполяризованного излучения [19].

Из-за нерешенной проблемы удаления выступов на гребнях треугольного профиля штрихов у решеток с блеском исследования для обеспечения высокого разрешения в рентгеновском диапазоне спектра сосредо-

точились в последнее время в основном на разработке решеток с высокой и сверхвысокой плотностью штрихов. Мы решили проблему удаления кремниевых выступов и сосредоточились в основном на изготовлении решеток с низкой и средней плотностью штрихов. Нами было установлено [17], что достижимость высокого порядка дифракции решетки с блеском определяется плоскостностью отражающей грани, для характеризации которой предложен параметр изогнутости. В качестве изогнутости (C) отражающей грани принимается разность углов наклона верхней (α_2) и нижней (α_1) частей отражающей грани $C = \alpha_2 - \alpha_1$, измеренных с учетом 30 % точек профиля вверху грани и 30 % точек профиля внизу грани, отбрасывая 10 % точек профиля от самой нижней точки. Низкая изогнутость отражающей грани штриха решетки с блеском обеспечивается ранее разработанной нами технологией [20].

В настоящей работе сообщаются подробности изготовления и характеристики двух VLS-решеток с плотностью штрихов $\sim 500\,\mathrm{mm}^{-1}$ и двумя различными углами наклона отражающей грани (углами блеска).

1. Дизайн VLS-решетки

Разрабатываемая VLS-решетка предназначается для полихроматора, работающего в солнечно-слепой части УФ диапазона с центральной длиной волны 275 nm. Для достижения высокого разрешения необходима решетка со сверхвысокой плотностью штрихов или среднечастотная решетка, работающая в высоких порядках дифракции. Под высоким порядком дифракции для достижения высокого/сверхвысокого разрешения среднечастотной решетки понимается порядок, удовлетворяющий условию $|n| \gtrsim 10$. Достичь таких порядков дифракции решетки возможно при соблюдении некоторых условий: во-первых, полное отсутствие кремниевых выступов на гребне треугольного профиля; во-вторых, плоская (не изогнутая) отражающая грань. И то, и другое возможно достичь путем сглаживающего травления, выполняемого после анизотропного травления канавок в KOH по ранее разработанной нами технологии [20].

Согласно предварительным расчетам, с помощью программы PCGrate^{TM} [21] максимальная абсолютная спектральная эффективность среднечастотной решетки с периодом $2\,\mu$m и углом блеска 42.5° для неполяризованного излучения составляет 33.5 % в минус 10-м порядке ($n = -10$). Конструкция разрабатываемого УФ полихроматора требует VLS-решетку с плотностью штрихов $p_x = mp_0 + mp_1 \cdot x + mp_2 \cdot x^2 + mp_3 \cdot x^3 + mp_4 \cdot x^4$, где коэффициенты полинома равны: $P_0 = 466.08\,\mathrm{mm}^{-1}$; $P_1 = 3.163\,\mathrm{mm}^{-2}$; $P_2 = -0.0491\,\mathrm{mm}^{-3}$; $P_3 = -0.785 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{mm}^{-4}$; $P_4 = -1.636 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{mm}^{-5}$. Общая длина решетки 30 mm, расстояние влево-вправо от середины решетки по 15 mm, период меняется по апертуре решетки на ~ 20 %.

Для отработки процессов изготовления было решено изготовить две решетки в качестве прототипов VLS-решетки с плотностью штрихов $\sim 500\,\mathrm{mm}^{-1}$: решетка № 1 с несимметричным треугольным профилем и малым углом блеска $\sim 4°$ и решетка № 2 с почти симметричным треугольным профилем и большим углом наклона отражающей грани 50.7°. Для изготовления использовали кремниевые подложки диаметром 3″: разориентированные Si(111)4° для VLS-решетки № 1 и Si(100)4° для решетки № 2. Размер заштрихованной области решеток 30×12 mm.

2. Изготовление и характеризация VLS-решеток

2.1. Получение рисунка защитной маски

Нашей первой задачей было научиться получать рисунок маски VLS-решетки с использованием литографии прямой записи. Согласно расчету, плотность штрихов по длине VLS-решетки изменяется от 500 до $410\,\mathrm{mm}^{-1}$. С учетом малости коэффициента p_2 решено для сравнения изготовить один из прототипов VLS-решетки с линейным изменением периода.

Для решетки № 1 был записан рисунок маски только с линейным изменением плотности штрихов, а для решетки № 2 на одной Si-подложке были записаны два рисунка маски: с изменением плотности штрихов по линейному закону и с изменением плотности штрихов по полиноминальному закону, учитывая коэффициенты до p_4 включительно.

Качество маски фоторезиста (PR-маска), сформированной с использованием прямой лазерной литографии, определяет качество будущей VLS-решетки. Точность размещения канавок является ключевой характеристикой дифракционных решеток. Крайне важно соответствовать требованиям точности распределения плотности штрихов для VLS-решеток, которые обеспечивают фокусировку и коррекцию аберраций низкого порядка оптики спектрометра. Поскольку запись рисунка на установке лазерной литографии осуществляется полосами шириной $20\,\mu$m, может возникнуть проблема, связанная с возможными ошибками сшивания канавок на границах полос.

На Si-подложку был нанесен центрифугированием резист, затем ее подвергли предварительному отжигу. Рисунок решетки был записан с помощью установки лазерной литографии сфокусированным лазерным лучом ($\lambda = 405$ nm) сканированием по поверхности покрытой резистом пластины кремния. Требуемый рисунок достигается перемещением в процессе записи столика с подложкой при заданной интенсивности лазерного луча. В нескольких предварительных экспериментах для записи рисунка PR-маски была подобрана интенсивность лазерного луча, обеспечивающая нужную ширину засвеченных полос резиста, которые впоследствии при

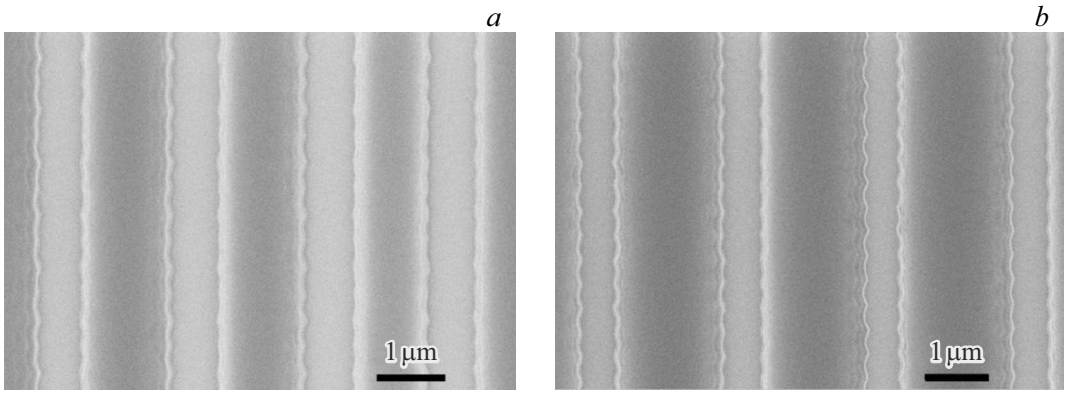

Рис. 1. РЭМ изображения при увеличении 40 K, вид сверху PR-маски VLS-решетки № 2 linear: *a* — начало апертуры; *b* — конец апертуры. Темные полоски являются полосами PR-маски, светлые полоски — просветы в PR-маске (незащищенный кремний).

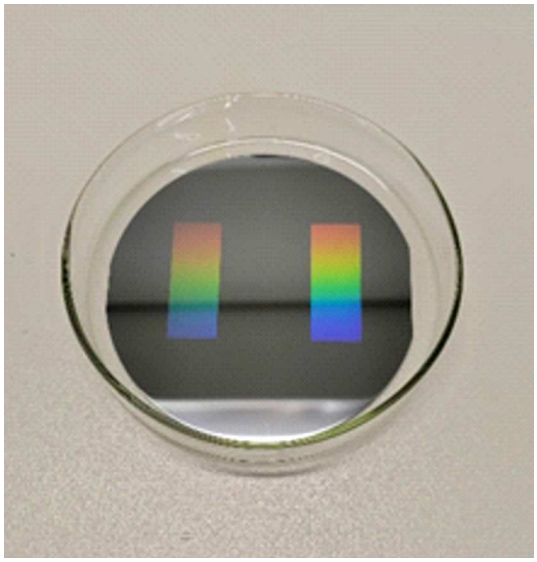

Рис. 2. Фотография Cr-маски решетки № 2: возле базового среза решетка polynomial, дальше от базового среза решетка linear.

проявлении PR-маски растворяются и обнажают поверхность кремния. На следующем этапе на пластину с изготовленной маской резиста был напылен слой хрома.

На рис. 1 показаны РЭМ изображения вида сверху PR-маски в начале (рис. 1, *a*) и в конце (рис. 1, *b*) по длине VLS-решетки № 2, записанной по линейному закону (далее — linear).

Cr-маска на поверхности Si-подложки сформирована техникой взрыва металлизации с PR-маской (lift-off): на образцы с проявленной PR-маской был нанесен термическим вакуумным напылением слой хрома 20 nm и затем взорван обработкой в диметилформамиде. Для удаления остатков резиста образцы были обработаны кислородной плазмой.

Фотография Cr-маски решетки № 2 приведена на рис. 2, ближе к базовому срезу расположена решетка № 2, записанная по полиноминальному закону (далее — polynomial), дальше от базового среза решетка, записанная по линейному закону.

Для решеток с изменяющимся по длине решетки периодом важно подобрать оптимальную ширину Cr-полосок защитной маски: слишком узкие Cr-полоски не обеспечат защиту при анизотропном травлении в растворе KOH, слишком широкие Cr-полоски увеличивают длительность травления для достижения заданного угла блеска. Расстояние между полосками Cr-маски (пространство травления) определяет глубину травления, значит для разного пространства травления глубина травления будет различной при одинаковой длительности травления.

Решетка № 1. Ширина Cr-полос маски травления варьируется от 754 nm (самая узкая) до 994 nm (самая широкая), среднее значение ширины Cr-полос по длине всей решетки составило 888 nm.

Решетка № 2. Линейный закон: ширина Cr-полос варьируется от 835 nm (самая узкая) до 1165 nm (самая широкая), среднее значение ширины Cr-полос по длине всей решетки составляет 1013 nm.

Полиноминальный закон: ширина Cr-полос варьируется от 820 nm (самая узкая) до 1121 nm (самая широкая), среднее значение ширины Cr-полос защитной маски по длине всей решетки составляет 1009 nm. На рис. 3 показаны РЭМ изображения вида сверху Cr-маски в начале (рис. 3, *a*) и в конце (рис. 3, *b*) по длине VLS-решетки № 2 при записи по линейному закону.

2.2. Травление канавок

При анизотропном травлении в растворе KOH 20 mass% необходимо подобрать такую длительность травления, чтобы достичь одинакового заданного угла блеска по всей области VLS-решетки. Поэтому фактическая длительность травления решеток превышала почти в два раза длительность, теоретически необходимую для достижения расчетной глубины травления.

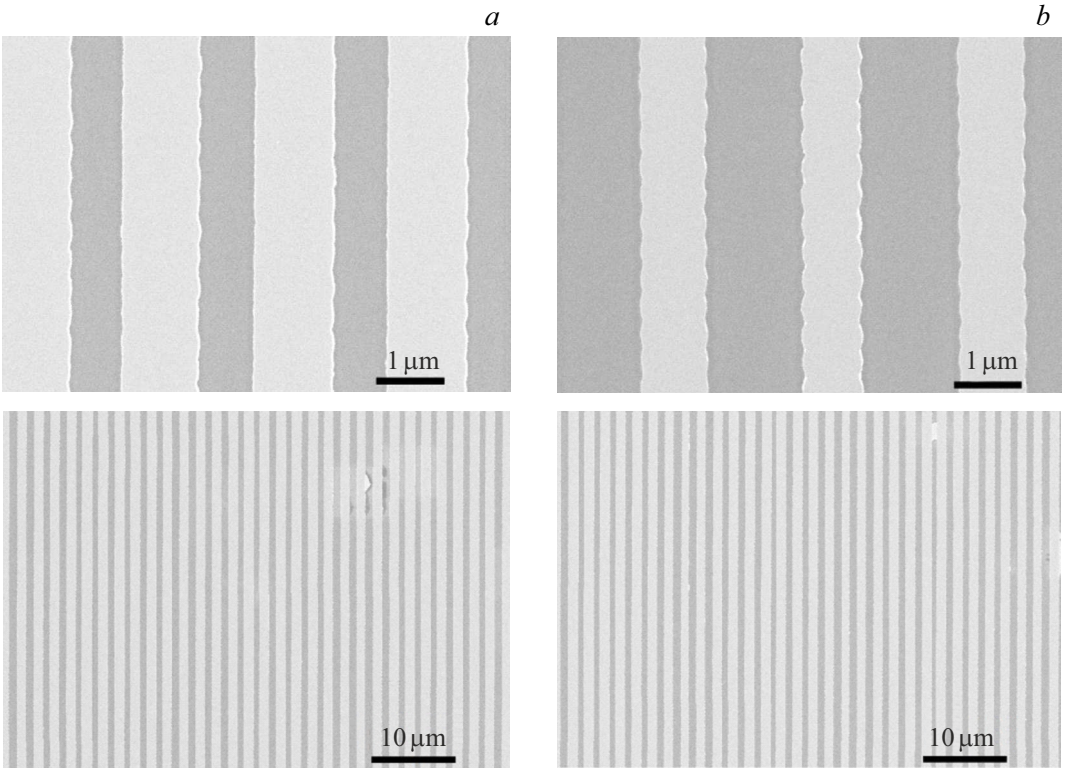

Рис. 3. РЭМ изображения при увеличении 40 к и 5 K, вид сверху Cr-маски VLS-решетки № 2 linear: *a* — начало апертуры; *b* — конец апертуры. Светлые полоски являются полосами маски хрома, темные полоски — просветы для травления (незащищенный кремний).

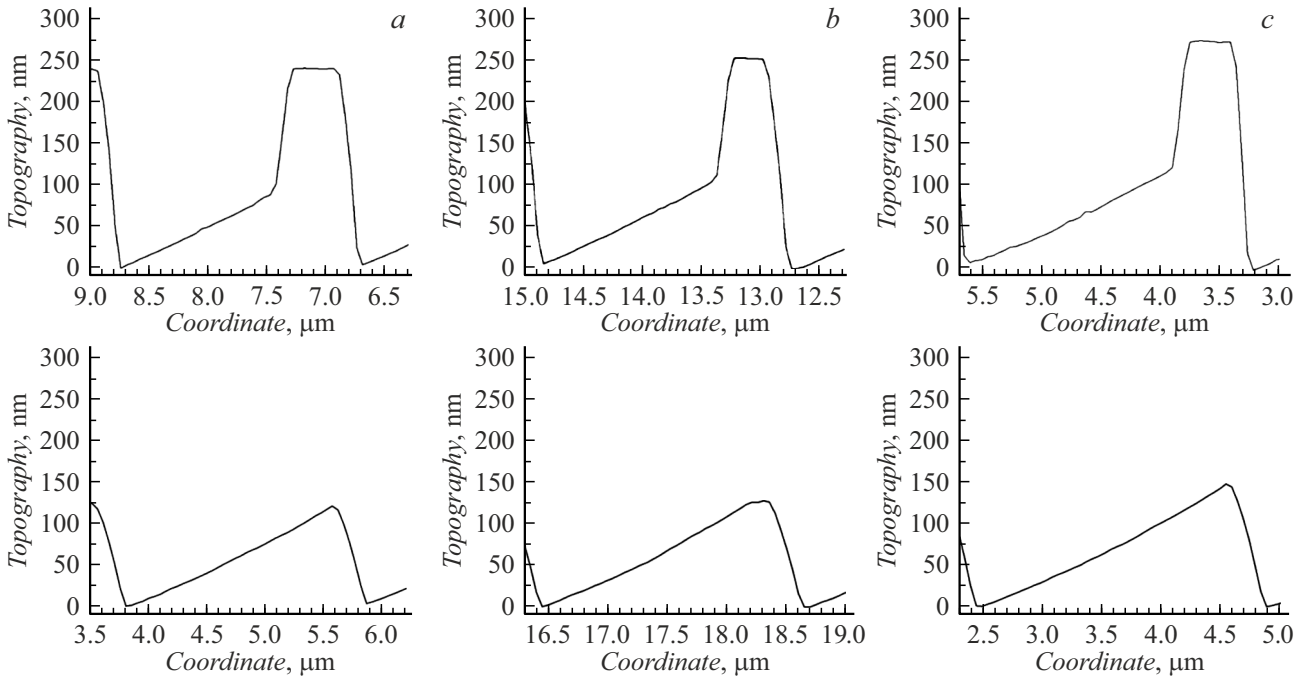

Рис. 4. АСМ профили решетки № 1 после травления в КОН (верхние профили) и после удаления выступов (нижние профили), область решетки: *a* — начало, *b* — середина, *c* — конец.

Решетка № 1. Просветы для травления варьируются от 1120 до 1559 nm (разброс 439 nm). Значение глубины травления канавки изменяется по длине решетки № 1 от 232 до 265 nm (рис. 4, верхние профили).

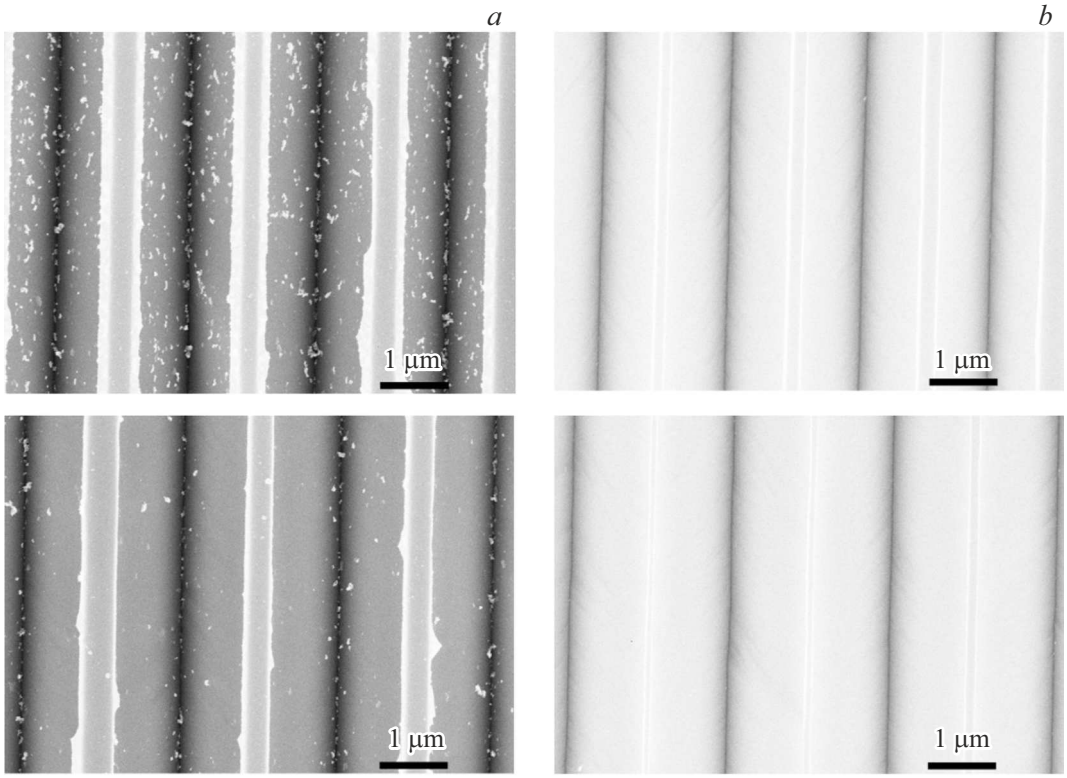

Рис. 5. РЭМ изображения вида сверху в начале апертуры (верхние изображения) и в конце апертуры (нижние изображения) VLS-решетки № 2 linear после травления в КОН с Cr-маской: *a* — при расчетной длительности; *b* — после дополнительного травления и удаления Cr-маски.

При анизотропном травлении канавок с малым углом наклона в результате бокового подтравливания кремния под защитной маской хрома на гребне треугольного профиля образуются кремниевые выступы. Ранее нами разработан и оптимизирован способ удаления Si-выступов и полирования поверхности отражающей грани решеток с блеском жидкостным травлением в сглаживающем-полирующем травителе [17]. Используя этот способ, можно изготовить решетки с блеском с плоской (не изогнутой) отражающей гранью штриха, что позволяет достичь высоких порядков дифракции, а в нашем случае требуется минус 10-й порядок.

Si-выступы высотой 150−154 nm и шириной 220−274 nm на профиле решетки № 1 были удалены травлением в сглаживающем-полирующем травителе (рис. 4, нижние профили). Контроль достаточности сглаживающего-полирующего травления выполнялся с помощью РЭМ изображений вида сверху по ширине Si-выступов. Затем решетка была очищена обработкой раствором Пираньи ($H_2SO_4 + H_2O_2$).

Решетка № 2. Просветы для травления варьируются от 987 до 1430 nm (разброс 443 nm). На РЭМ изображениях вида сверху после травления в КОН с Cr-маской в течение расчетной длительности решетки № 2, записанной по линейному закону (рис. 5, *a*), видно, что решетка не дотравлена до заданной глубины. На рис. 5, *a* на поверхности решетки видны частицы неправильной формы — это продукты травления кремния, которые в дальнейшем были удалены. Сцепление Cr-маски с кремнием на поверхности решеток оказалось хорошим: после анизотропного травления в 20 % растворе КОН в течение расчетной длительности Cr-маска не отвалилась. Пришлось еще дополнительно потравить для достижения заданной глубины травления (рис. 5, *b*). Угол блеска канавки после дополнительного травления решетки № 2 linear изменился с $\sim 42^\circ$ до $\sim 49^\circ$.

При анизотропном щелочном травлении канавок почти симметричной решетки с большим углом блеска не образуются кремниевые выступы на гребне треугольного профиля, зато остаются плоские площадки от полосок Cr-маски. Важно подобрать такую ширину полос Cr-маски, чтобы за время травления канавок кремний под Cr-маской полностью стравился до нужного угла в результате бокового подтравливания, и сверху на гребне профиля вместо плоских площадок шириной 727−750 nm (рис. 6, *a, c*) образовались узкие площадки шириной 141−187 nm и/или острые (слегка закругленные) края (рис. 6, *b, d*).

2.3. Характеристики решеток

РЭМ фотографии были получены при различных увеличениях (40 000× и 50 000×) с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss™ Supra 25,

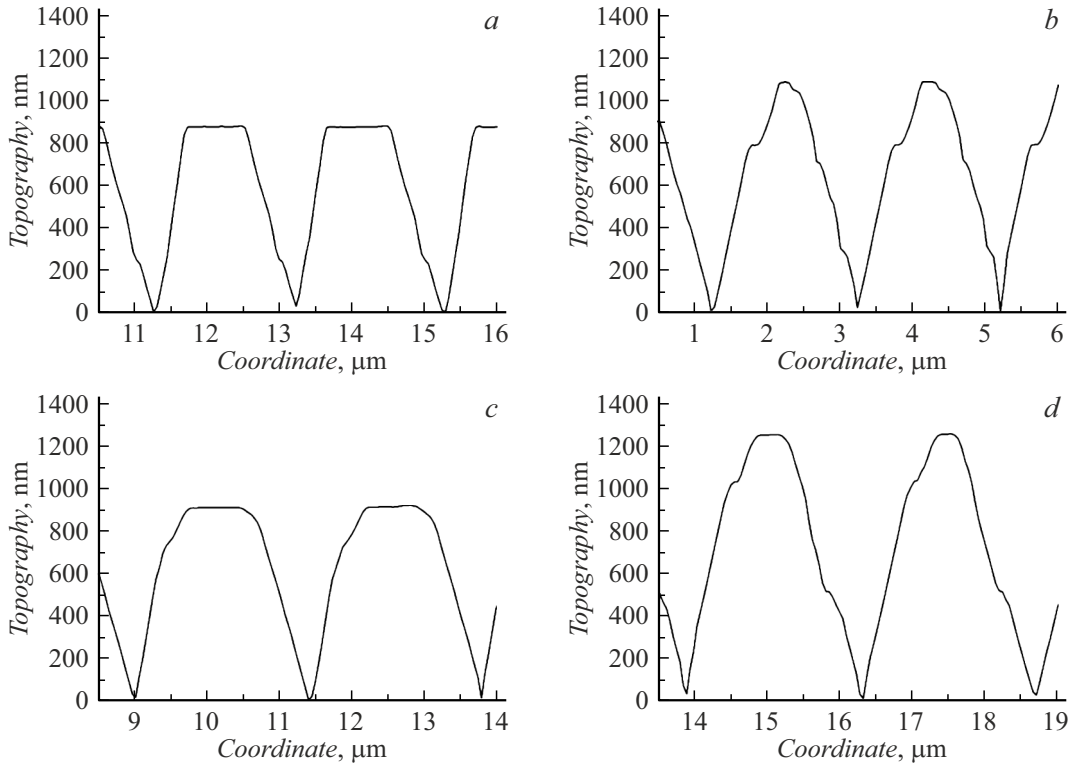

Рис. 6. АСМ профили VLS-решетки № 2 linear после травления в KOH с Cr-маской: *a* и *c* — при расчетной длительности; *b* и *d* — после дополнительного травления.

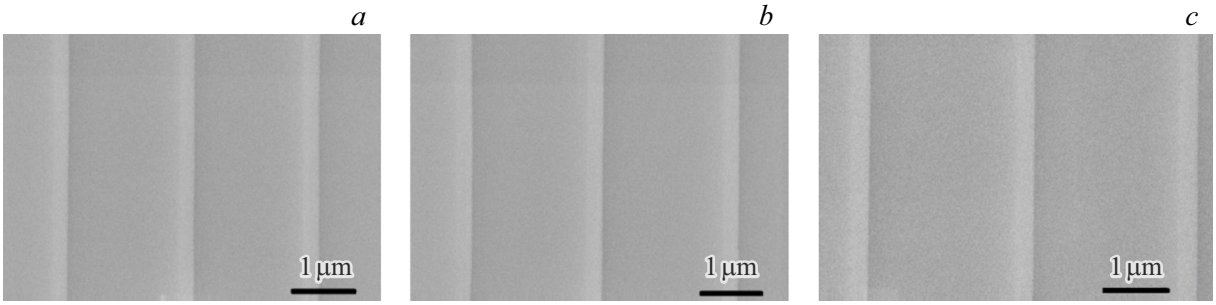

Рис. 7. РЭМ изображения при 50 K, вид сверху решетки № 1 после удаления Si-выступов: *a* — начало, *b* — середина, *c* — конец.

обзорные (панорамные) РЭМ изображения получены при увеличении 5000×. Исследования профиля решеток проводили на атомно-силовом микроскопе модели Veeco™ Dimension 3100 в полуконтактной моде (semicontact или tapping mode), во всех сканах было 512 × 512 точек. Мы использовали кремниевые зонды производства TipsNano™ с типичным радиусом закругления < 10 nm.

Решетка № 1. После удаления Si-выступов были измерены с помощью РЭМ период решетки № 1 и ширина ее антиотражающей грани (рис. 7). Ширина антиотражающей грани изменяется в интервале от 276 до 231 nm по длине решетки, что оставляет 13.9–9.6 % от периода.

В табл. 1 представлены результаты АСМ измерений параметров решетки № 1 на разных стадиях изготовления, для сравнения период решетки также измерен с помощью РЭМ.

Решетка № 2. В табл. 2 представлены результаты АСМ измерений параметров решетки № 2 с изменением плотности штрихов по линейному закону, для сравнения период решетки также измерен с помощью РЭМ.

В табл. 3 представлены результаты АСМ измерений параметров решетки № 2 с изменением плотности штрихов по полиноминальному закону, для сравнения период решетки также измерен с помощью РЭМ.

3. Результаты и обсуждение

При изменении плотности штрихов от 500 до 410 mm^{-1} по линейному закону теоретически рассчи-

Таблица 1. Результаты измерений параметров решетки № 1

Область решетки и метод измерений	Период, μm				Угол блеска, °	Изогнутость, °	Угол анти блеска, °	Глубина штриха, nm
	После травления в КОН		После удаления выступов					
	РЭМ	АСМ	РЭМ	АСМ				
Начало	1.97	2.00	1.98	2.00	3.78	0.79	26.3	119
Середина	2.11	2.15	2.07	2.14	3.86	1.09	25.9	124
Конец	2.39	2.45	2.41	2.45	3.91	0.96	27.4	144

танный период решетки должен изменяться от 1.95 до 2.39 μm, а при изменении плотности штрихов по полиноминальному закону период решетки должен изменяться от 2.04 до 2.44 μm.

Решетка № 1. Как видно из табл. 1, период решетки № 1 изменяется от 1.99 до 2.43 μm, что вполне удовлетворительно. Среднее значение угла блеска решетки № 1 составляет 3.85°. Профиль решетки № 1 треугольный несимметричный, без выступов, но не идеальный. Во-первых, на гребне профиля, как видно на рис. 4, *a, b* (нижние профили), наблюдается скругление с тенденцией к образованию плоской площадки. Во-вторых, отражающая грань не плоская, а с изогнутостью вплоть до 1.1°, хотя для данной решетки высокий порядок дифракции может быть достижим только при ее абсолютной изогнутости не более $\sim 0.4°$. В работе [14] нами было показано, что максимальная эффективность высоких дифракционных порядков ($|n| \gtrsim 10$) изготовленных решеток эшелле практически достижима только в случае, если изогнутость отражающей грани c составляет $\leq 10\,\%$ от среднего угла блеска, т. е. изогнутость $C \leq 0.1\alpha$. Неидеальность профиля штриха связана с тем, что после травления решетки в КОН параметры Si-выступов в начале и конце апертуры решетки сильно различались: разность глубины травления канавок составляла ~ 33 nm, разность ширины Si-выступов была ~ 54 nm, а высота Si-выступов составила более 50 % от общей глубины травления канавки, так как длительность травления была намного больше, чем требуется для травления канавок решетки с постоянным периодом. Поэтому длительность сглаживающего травления была выбрана достаточно большой, чтобы можно было удалить более широкие Si-выступы одновременно с узкими. Однако, поскольку ширина узких и широких Si-выступов различается на 12 %, для областей решетки с более узкими Si-выступами длительность оказалась неоптимальной, слишком большой, и в результате длина отражающей грани в этих областях решетки № 1 несколько уменьшилась. Как видно из приведенных в разд. 3 результатов, процедуру сглаживания VLS-решетки предстоит оптимизировать для достижения удовлетворительной плоскостности отражающей грани штриха.

Изготовленная решетка № 1 представляет собой очень интересный объект для дальнейших исследований ее дифракционной эффективности, поскольку угол блеска практически одинаковый по апертуре, а длина и изогнутость отражающей грани имеют разные значения по всей апертуре VLS-решетки. Было бы интересно исследовать, насколько уменьшается дифракционная эффективность в выбранном порядке в зависимости от длины отражающей грани VLS-решетки, а также определить максимально-достижимый номер порядка высокоэффективной дифракции в начале, середине и конце апертуры VLS-решетки. Для этого нужно определить дифракционную эффективность VLS-решетки моделированием с помощью программы PCGrate^{TM} на основе метода граничных интегральных уравнений и АСМ профилей штрихов, полученных в разных областях решетки (начало, середина, конец). Это будет выполнено в процессе продолжающихся исследований изготовленных нами VLS-решеток.

Решетка № 2. Как видно из табл. 2, период решетки № 2 linear изменяется от 1.95 до 2.38 μm, что хорошо совпадает с заданными значениями. Среднее значение угла блеска решетки № 2 linear составляет 48.9°, что немного меньше заданного угла блеска (на 1.8°). Профиль решетки № 2 linear почти симметричный треугольный, но не идеальный: на гребне профиля, как видно на рис. 6, *b, d*, вместо плоской площадки наблюдается небольшая скругленная площадка, ширина которой уменьшилась в пять раз.

Как видно из табл. 3, период решетки № 2 polynomial изменяется от 1.97 до 2.42 μm, при этом начальное

Таблица 2. Результаты измерений параметров решетки № 2 линейный закон

Область решетки и метод измерений	Период, μm		Угол блеска, °
	РЭМ	АСМ	
Начало	1.92	1.95	47.8
Конец	2.32	2.38	50.6

Таблица 3. Результаты измерений параметров решетки № 2 полиноминальный закон

Область решетки и метод измерений	Период, μm		Угол блеска, °
	РЭМ	АСМ	
Начало	1.97	1.97	45.5
Конец	2.39	2.42	46.5

значение несколько меньше расчетного значения. Среднее значение угла блеска решетки № 2 polynomial составляет 46.0°, что намного отличается от заданного угла блеска (на 4.7°). Профиль решетки № 2 polynomial почти симметричный треугольный, но не идеальный: на гребне профиля все еще остались плоские площадки, ширина которых уменьшилась лишь в два с половиной раза.

Как следует из приведенных в разд. 3 результатов, процесс травления VLS-решеток с большим углом блеска необходимо оптимизировать.

Заключение

Отработано изготовление дифракционных решеток для солнечно-слепой части УФ диапазона с использованием метода прямой лазерной литографии. Задача изготовления решеток с переменной плотностью штрихов по заданному закону в целом успешно решена. Было изготовлено несколько прототипов VLS-решеток размерами 30×12 mm с несимметричным треугольным профилем и малым углом блеска и с почти симметричным треугольным профилем и большим углом блеска, плотность штрихов которых изменяется как по линейному, так и по полиноминальному закону. Мы планируем выполнить интерферометрические измерения волнового фронта изготовленных прототипов дифракционных решеток, а также уточнить их дифракционную эффективность. Основываясь на результатах, представленных в работе и выполняемых в настоящее время исследованиях, оказывается возможным изготовить предназначенную для УФ полихроматора рабочую кремниевую VLS-решетку с заданным изменением плотности штрихов, высокой эффективностью и низким уровнем рассеянного света.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (FSRM-2023-0006). Работа Д.В. Мохова, Л.И. Горая и Д.А. Буравлева поддержана Российским научным фондом в плане теоретических исследований (№ 25-12-00139).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C. Palmer. *Diffraction grating handbook eighth edition* (MKS Instruments, Inc., NY., USA, 2020)
[2] D.L. Voronov, S. Diez, P. Lum, S.A. Hidalgo, T. Warwick, N. Artemiev, H.A. Padmore. Proc. SPIE, **8848**, 88480 (2013). DOI: 10.1117/12.2024489
[3] Ф.М. Герасимов, Э.А. Яковлев, И.В. Пейсахсон, Б.В. Кошелев. Опт. и спектр., **28** (4), 790 (1970).
[4] T. Harada, T. Kita. Appl. Opt., **19** (23), 3987 (1980). https://doi.org/10.1364/AO.19.003987
[5] M. Itou, T. Harada, T. Kita. Appl. Opt., **28** (1), 146 (1989). https://doi.org/10.1364/AO.28.000146
[6] M.C. Hettrick. Proc. SPIE 0560, Diffraction Phenomena in Optical Engineering Applications, (1986). https://doi.org/10.1117/12.949620
[7] D.L. Voronov, T. Warwick, E.M. Gullikson, F. Salmassi, P. Naulleau, N.A. Artemiev, P. Lum, H.A. Padmore. Proc. SPIE, **9207**, 920706 (2014). DOI: 10.1117/12.2062340
[8] D.L. Voronov, E.M. Gullikson, H.A. Padmore. Opt. Express, **25** (19), 23334 (2017). https://doi.org/10.1364/OE.25.023334
[9] L.I. Goray. Proc. SPIE, **6317**, 631700 (2006). DOI: 10.1117/12.678151
[10] J.F. Seely, L.I. Goray, B. Kjornrattanawanich, J.M. Laming, G.E. Holland, K.A. Flanagan, R.K. Heilmann, C.H. Chang, M.L. Schattenburg, A.P. Rasmussen. Appl. Opt., **45** (8), 1680 (2006). DOI: 10.1364/AO.45.001680
[11] C.-H. Chang, J.C. Montoya, M. Akilian, A. Lapsa, R.K. Heilmann, M.L. Schattenburg. J. Vac. Sci. Technol. B, **22** (6), 3260 (2004). DOI: 10.1116/1.1809614
[12] D.L. Voronov, S. Park, E.M. Gullikson, F. Salmassi, H.A. Padmore. Opt. Express, **30** (16), (2022). https://doi.org/10.1364/OE.460740
[13] R.K. Heilmann, D.P. Huenemoerder, J.A. McCoy, R.L. McEntaffer. arXiv:2409.02297v1. (2024).
[14] L. Golub, P. Cheimets, E.E. DeLuca, Chad A. Madsen, K.K. Reeves, J. Samra, S. Savage, A. Winebarger, A.R. Bruccoleri. J. Space Weather Space Clim., **10**, 37 (2020).
[15] D.L. Voronov, L.I. Goray, T. Warwick, V. Yaschuk, H.A. Padmore. Opt. Express, **23** (4), 4771 (2015).
[16] X. Haoyu, J. Yanxiu, C. Xingshuo, W. Ruipeng, Z. Jing, Chin. J. Opt., **17** (5), 1139 (2024).
[17] L.I. Goray, T.N. Berezovskaya, D.V. Mokhov, V.A. Sharov, K.Yu. Shubina, E.V. Pirogov, A.S. Dashkov. J. Surf. Inv.: X-ray, Syn. & Neut. Tech., **17** (1), S104 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070145
[18] 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**, 6320 (2011). https://doi.org/10.1364/OE.19.006320
[19] 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. Lebed. Phys. Inst., **50** (2), S250 (2023).
[20] Д.В. Мохов, Т.Н. Березовская, К.Ю. Шубина Е.В. Пирогов, А.В. Нащекин, В.А. Шаров, Л.И. Горай. ЖТФ, **92** (8), 112 (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., **68** (1), S96 (2023). DOI: 10.1134/S1063784223090116]
[21] Л.И. Горай, С.Ю. Садов. Компьютерная программа PCGrate™ [Интернет-ресурс]. URL: www.pcgrate.com (дата обращения 20.10.2024).