

УДК 535-34

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ C/Si И В<sub>4</sub>C/Si

© 2023 г. Р. М. Смертин<sup>а, \*</sup>, М. М. Барышева<sup>а</sup>, С. А. Гарахин<sup>а</sup>, М. В. Зорина<sup>а</sup>, С. Ю. Зуев<sup>а</sup>, В. Н. Полковников<sup>а</sup>, Н. И. Чхало<sup>а</sup>, Д. Б. Радищев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 607680 Россия

<sup>б</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: smertin\_ruslan@ipmras.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 10.02.2023 г.

Принята к публикации 10.02.2023 г.

Синтезированы и изучены рентгенооптические и механические свойства диэлектрических многослойных зеркал на основе пар материалов C/Si и В<sub>4</sub>C/Si. Зеркала были оптимизированы на длину волны 13.5 нм. Найдены параметры технологического процесса напыления, обеспечивающие одновременно выполнение трех условий: относительно высокие коэффициенты отражения на рабочей длине волны, близкие к нулю механические напряжения в пленке и отсутствие электропроводности. При нулевых внутренних напряжениях коэффициент отражения многослойных зеркал C/Si, нанесенных на суперполированные кремниевые подложки, на рабочей длине волны 13.5 нм составляет  $R = 11\%$ , спектральная полоса пропускания  $\Delta\lambda = 0.33$  нм. Зеркало В<sub>4</sub>C/Si обеспечило следующие характеристики:  $R = 8.2\%$ , спектральная полоса пропускания  $\Delta\lambda = 0.3$  нм. Однако в многослойных зеркалах В<sub>4</sub>C/Si был обнаружен блистеринг – появление пузырей на пленке из-за скопившегося внутри водорода, что исключило их применение для нанесения на коммерчески доступные микроэлектромеханические системы микрзеркал. Нанесение покрытия C/Si позволило впервые получить работоспособную микроэлектромеханическую систему, отражающую рентгеновское излучение на рабочей длине волны 13.5 нм. Коэффициент отражения составил  $R \sim 3\%$ . Низкое значение коэффициента отражения обусловлено высокой, около 2 нм, микрошероховатостью поверхности микрзеркал микроэлектромеханической системы. Проведенное исследование указывает на принципиальную возможность создания матричного рентгенооптического элемента для модуляции пространственно-временных характеристик рентгеновских пучков.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, многослойные зеркала, внутренние напряжения, ЭУФ-литография, безмасочная литография, микроэлектромеханическая система.

**DOI:** 10.31857/S1028096023120233, **EDN:** BIIQNG

### ВВЕДЕНИЕ

Литография является ключевой технологией производства элементов микро- и нанoeлектроники, определяющей топологические нормы и степень интеграции сверхбольших интегральных схем. В настоящее время при производстве слоев чипов с минимальными топологическими размерами используют проекционную литографию в области экстремального ультрафиолета (ЭУФ-литографию) на рабочей длине волны 13.5 нм. Основной проблемой традиционной литографии, основанной на проекции изображения маски на пластину с резистом, является сильная зависимость стоимости литографического процесса от объемов производства. Это обусловлено большим числом и дороговизной масок. Технология становится конкурентоспособной только при массовом производстве – от миллиона чипов в

год [1]. Поэтому поиск альтернативных методов литографии, которые обеспечат нанометровую топологию литографического процесса и слабую зависимость стоимости процесса литографии от масштабов производства, является крайне актуальной задачей.

Решение этой проблемы – развитие безмасочных методов литографии. Одним из перспективных кандидатов является безмасочная рентгеновская литография, предложенная в [2]. Пространственное разрешение определяется короткой длиной волны (13.5 нм и менее), а функцию маски выполняет микроэлектромеханическая система (МЭМС) микрзеркал, управляемых электрическими сигналами. В [3–5] показано, что, во-первых, на экспериментальную МЭМС удалось нанести отражающее покрытие Mo/Si с коэффициентом отражения 40% на длине волны 13.5 нм. Во-вторых,

производительность таких литографов при реальных параметрах оптики и лабораторных источниках рентгеновского излучения может достигать единиц пластин (диаметр 300 мм) в час, что представляет интерес не только для мелкосерийного, но даже для массового производства.

Ключевой проблемой, препятствующей развитию этой прорывной технологии, является отсутствие работоспособных МЭМС, отражающих рентгеновское излучение. В упомянутой выше работе после нанесения токопроводящих отражающих покрытий Mo/Si МЭМС потеряла работоспособность. Еще одной проблемой нанесения отражающих покрытий на МЭМС являются механические напряжения в пленках [6–8], приводящие к катастрофическому искажению формы поверхности микрзеркал в силу малой, на уровне долей микрометров, толщине микрзеркала. В этой связи поиск новых композиций многослойных зеркал, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения при отсутствии электропроводности и внутренних механических напряжений, является крайне актуальной задачей для развития безмасочной рентгеновской литографии.

В качестве отражающих покрытий изучали многослойные зеркала C/Si и V<sub>4</sub>C/Si. Выбор таких материалов обусловлен высоким уровнем их электросопротивления. В качестве экспериментальных образцов МЭМС использовали коммерчески доступные матрицы микрзеркал марки DLP6500 0.65 1080pMVSPS600 DMD фирмы Texas Instruments [9]. Впервые удалось получить работоспособную МЭМС, отражающую рентгеновское излучение на рабочей длине волны 13.5 нм.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Многослойные зеркала C/Si и V<sub>4</sub>C/Si изготавливали методом магнетронного распыления при постоянном токе:  $I_C = 0.8$  А,  $I_{Si} = 0.6$  А и  $I_{V_4C} = 0.9$  А. Период зеркал оптимизирован для работы на длине волны 13.5 нм при нормальном падении и составляет  $d \sim 7$  нм. В качестве рабочей среды использован высокочистый (99.998%) газ аргон, а также смесь из двух газов Ag и H<sub>2</sub>. Рабочее давление газа при технологическом процессе в разных экспериментах менялось от  $\sim 1 \times 10^{-3}$  до  $\sim 1.2 \times 10^{-2}$  Торр. В среде рабочего газа Ar + H<sub>2</sub> парциальное давление аргона оставалась неизменным  $\sim 1 \times 10^{-3}$  Торр, а общее давление увеличивалось за счет добавления водорода.

Первоначально зеркала осаждали на гладкие (величина среднеквадратичной шероховатости  $\sim 0.2$  нм) кремниевые пластины для микроэлектроники. Подробнее об условиях напыления и лабораторных методах метрологии написано в [10]. Структурные параметры отражающих покрытий – средние толщины пленок и дисперсия толщин,

уровень шероховатостей и профиль границ разделов – определяли при совместной обработке кри-вых отражения в области 13.5 нм и на длине волны 0.154 нм с использованием программного пакета Multifitting [11].

Спектральные и угловые зависимости коэффициентов отражения в окрестности длины волны 13.5 нм измерены на стенде спектральных измерений на основе лазерно-плазменного источника в диапазоне длин волн 5–50 нм – стенд рефлектометра на базе монохроматора Черни–Тернера и лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения [12, 13].

Внутренние напряжения, которые приводят к деформации подложки, определяли по формуле Стоуни [14–16]:

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

где,  $\sigma$  – напряжения,  $E$  – модуль Юнга материала пластины,  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала пластины,  $d_{\text{полл}}$  – толщина пластины,  $d_{\text{пл}}$  – толщина пленки,  $R_1$  – исходный радиус кривизны пластины,  $R_2$  – радиус кривизны пластины после осаждения пленки.

В качестве исходной пластины использовали подложки из монокристаллического кремния с ориентацией (100), толщиной 300 мкм. Для такой пластины коэффициент:

$$\frac{E}{6(1-\nu)} = 30 \text{ ГПа}. \quad (2)$$

Радиус кривизны определяли по изменению расстояния между отраженными от искривленной подложки исходно параллельными лазерными лучами. При толщине подложки 300 мкм и толщине отражающего покрытия 350 нм погрешность определения напряжения составляла  $\Delta\sigma = \pm 22$  МПа. Как показал эксперимент, этой чувствительности было недостаточно для надежного получения пленок с близким к нулю внутренним напряжением. Поэтому после минимизации напряжения до предельных величин технологический процесс оптимизировали уже на основе анализа изгиба микрзеркал МЭМС. Для исследования формы поверхности микрзеркал использовали интерферометр белого света ZYGO NewView 7300 [17].

Шероховатость поверхности контролировали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTEGRA Prima (NT-MDT) [18]. При измерении в АСМ для восстановления профиля поверхности из экспериментальных данных вычитают поверхность первого порядка (наклон образца), отклонения от плоскостности высоких порядков (второго, третьего) не вычитают и считают реальной формой поверхности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Как отмечено ранее, одним из ключевых требований к отражающему покрытию является отсутствие электропроводности. Для исследования отбирали материалы, которые уже активно используются при создании рентгенооптических элементов для этой спектральной области: Mo, Nb, Y, Si, C и  $V_4C$ . В случае металлов для подавления электропроводности использовали реактивное распыление, когда в рабочую смесь к Ag добавляли химически активные газы, такие как кислород и азот. Как показали эксперименты, все нитриды этих металлов оказались электропроводящими, и на последующих этапах исследования их не применяли.

С окислением ситуация была более удачной. Удалось получить диэлектрические зеркала на основе структуры  $MoO_x/SiO_y$  с коэффициентом отражения  $R = 20\%$  на длине волны 13.5 нм, что связано с большим поглощением оксидов. Содержание кислорода в слоях Mo увеличивалось до тех пор, пока не пропадала электропроводность. Однако проблемой стали сильные, на уровне нескольких сотен МПа, внутренние напряжения.

В этой связи основные усилия были направлены на изучение многослойных зеркал C/Si и  $V_4C/Si$ , которые уже изначально демонстрируют диэлектрические свойства. Согласно теоретическим расчетам, идеальные рентгеновские зеркала  $V_4C/Si$  и C/Si обладают высокими коэффициентами отражения – 58 и 55% соответственно. Поэтому основной задачей было обеспечить близкие к нулю внутренние напряжения при максимально возможном сохранении высокого коэффициента отражения.

Один из традиционных методов понижения уровня внутренних напряжений – повышение рабочего давления в камере напылительной установки, которое за счет большого числа столкновений летящих атомов от мишени к подложке приводит к снижению энергии поступающих на подложку атомов. Для исследования были изготовлены многослойные системы Si/C и Si/ $V_4C$  с разным соотношением толщин слоев при “стандартном” давлении рабочего газа  $\sim 10^{-3}$  Торр.

В табл. 1 представлены коэффициенты отражения и механические напряжения в многослойной системе  $V_4C/Si$  в зависимости от доли слоев  $V_4C$  в периоде. По ним были определены оптимальные параметры многослойной системы. Многослойное зеркало  $V_4C/Si$  имеет максимальный коэффициент отражения  $\sim 41\%$  и напряжения  $\sim -1500$  МПа при соотношении толщин слоев 0.5. Для дальнейших работ по уменьшению внутренних напряжений было выбрано именно это соотношение толщин слоев.

**Таблица 1.** Зависимость коэффициента отражения и напряжения в многослойных зеркалах  $V_4C/Si$  от толщины слоя  $V_4C$  в периоде структуры

$t(V_4C)/d$	$R, \%$	$E, \text{МПа}$
0.69	32	–1900
0.56	33	–1600
0.5	41	–1500
0.4	38.3	–1320

**Таблица 2.** Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения в многослойных зеркалах  $V_4C/Si$

Давление аргона, $10^{-3}$ Торр	$R, \%$	$E, \text{МПа}$
1	38.3	–1320
3	34	–1150
5	13.11	–470
10	<3	–60
12	$\sim 0$	–50

В табл. 2 приведена зависимость коэффициента отражения и внутренних напряжений от давления рабочего газа, выраженного через “стандартное” давление  $\sim 10^{-3}$  Торр, принятого за единицу. Как и ожидалось, повышение рабочего давления Ag приводит к уменьшению внутренних напряжений в структуре. Однако при этом сильно уменьшается отражательная способность. Такое уменьшение коэффициента отражения происходит за счет сильного увеличения шероховатости межслоевых границ вследствие понижения плотности пленок и увеличения уровня дефектов. Важным является тот факт, что данная система не обладает нулевыми внутренними напряжениями даже при двенадцатикратном увеличении давления рабочего газа.

Аналогичные исследования были проведены и для системы C/Si. В табл. 3 представлены коэффициенты отражения многослойной системы C/Si в зависимости от доли C в периоде. Для этой структуры максимум коэффициента отражения  $\sim 35\%$  достигают при доле углерода в периоде около 0.4. Внутренние напряжения также достигают высоких, на уровне  $-900$  МПа, значений. Для дальнейших работ по уменьшению внутренних напряжений было выбрано именно это соотношение толщин слоев.

В табл. 4 приведена зависимость коэффициента отражения и внутренних напряжений от давления рабочего газа, выраженного через “стандартное” давление  $\sim 10^{-3}$  Торр, принятого за единицу. Как видно из таблицы, повышение рабочего давления, как и в системе  $V_4C/Si$ , приводит к уменьшению внутренних напряжений в структуре. Силь-

**Таблица 3.** Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения в зеркалах Si/C от толщины слоя C в периоде структуры

$t(C)/d$	$R, \%$
0.29	23
0.36	29
0.4	35
0.44	21.5

**Таблица 4.** Зависимость коэффициента отражения и механического напряжения в зеркалах C/Si

Давление аргона, $10^{-3}$ Торр	$R, \%$	$E, \text{МПа}$
1	35	-900
5	10	-230
10	3	-170

**Таблица 5.** Зависимость коэффициента отражения и напряжений в многослойных зеркалах  $V_4C/Si$  от парциального давления  $H_2$

$\% H_2$	$R, \%$	$E, \text{МПа}$
0	41	-1500
75	8.1	-240
100	8.2	-60

**Таблица 6.** Зависимость коэффициента отражения и механических напряжений в многослойных зеркалах C/Si от парциального давления  $H_2$  и толщины слоя C в периоде

$\% H_2$	$t(C)/d$	$R, \%$	$E, \text{МПа}$
0	0.4	32.5	-900
75	0.5	13	-60
75	0.57	12.5	-35
75	0.64	11	-7
87	0.64	10	-4
100	0.64	11.6	+10
120	0.64	10	+7
150	0.64	6.47	+20

но уменьшается отражательная способность. Важным является тот факт, что данная система также не обладает нулевыми внутренними напряжениями даже при десятикратном увеличении давления рабочего газа. А такое сильное увеличение давления рабочего газа снижает уровень отражательной способности до значений, близких к нулю.

Еще один способ минимизации внутренних напряжений — использование водорода в каче-

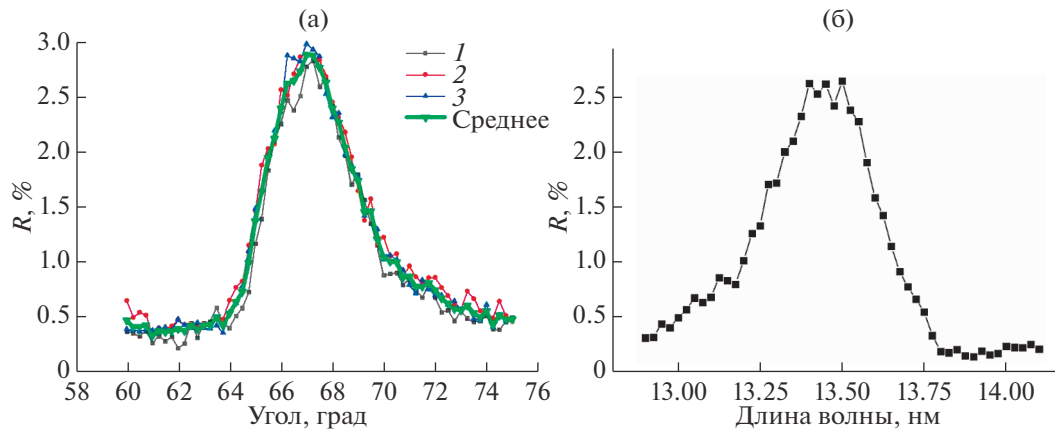
стве химически активного компонента в смеси с аргоном [19]. Водород соединяет оборванные связи на поверхности пленки, что может привести к компенсации дефектов в структуре пленки и, соответственно, к уменьшению внутренних напряжений.

Предварительные исследования механических напряжений и плотности отдельных пленок Si, C и  $V_4C$  показали, что наибольший положительный эффект на внутренние напряжения водорода оказывает на  $V_4C$ . Поэтому вначале была изучена система  $V_4C/Si$ . Так как заметного влияния на внутренние напряжения и плотность пленок тока разряда не было обнаружено, токи на магнетронах в эксперименте не менялись и составляли для Si 600, для C 800 и для  $V_4C$  900 мА. Содержание  $H_2$  в смеси рабочего газа изменялось до 100% по отношению к давлению Ar. Соотношение толщин слоев материалов в периоде составляло 1 : 1, так как такое соотношение в структуре обеспечивает максимальную отражательную способность этой системы (табл. 1). В табл. 5 приведены коэффициенты отражения и напряжения в системе  $V_4C/Si$  в зависимости от содержания водорода в среде рабочего газа. Процентное содержание водорода указано относительно давления аргона в смеси рабочего газа.

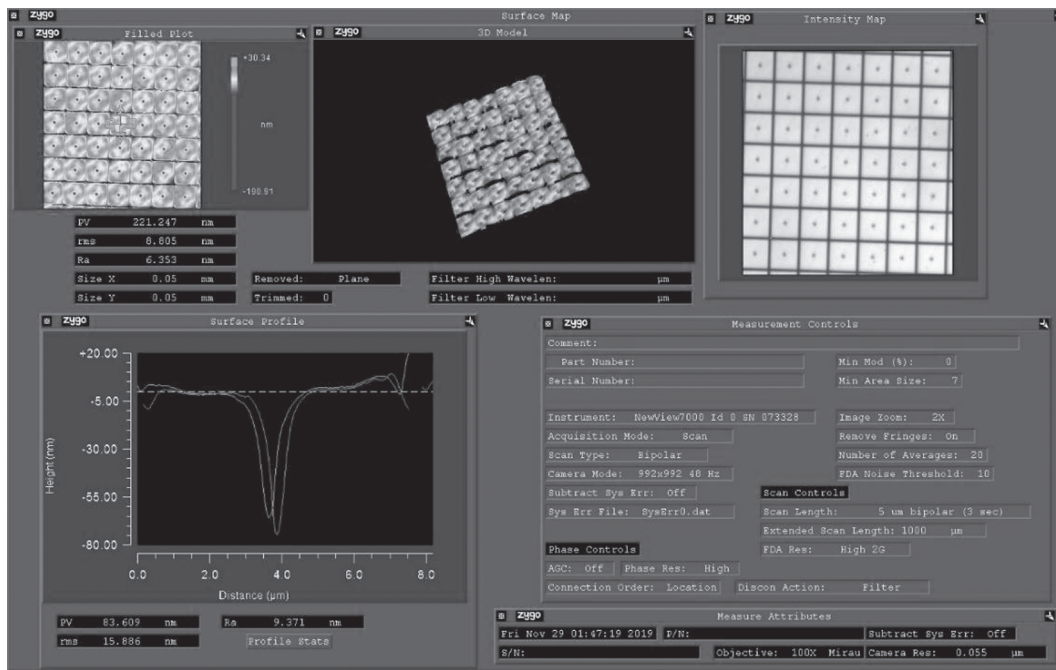
Добавление водорода привело к значительному уменьшению уровня внутренних напряжений. Коэффициент отражения составил ~8%. Можно было ожидать дальнейшего понижения внутренних напряжений с увеличением содержания  $H_2$ , однако эксперимент прекратился, так как на поверхности структуры были обнаружены микрократеры с вырванным веществом — так называемый эффект блистеринга [20]. И чем больше содержание водорода в смеси рабочего газа, тем больше размер микрократеров.

В табл. 6 приведены коэффициенты отражения и внутренние напряжения в системе C/Si в зависимости от содержания водорода в среде рабочего газа и соотношения толщин слоев в периоде. Во второй, третьей и четвертой строках таблицы показано, что при одном и том же содержании  $H_2$  внутренние напряжения заметно, в разы, падают с увеличением доли C в периоде. Максимальная доля C в периоде была ограничена значением 0.64, что связано с заметными потерями коэффициента отражения из-за увеличения доли углерода в периоде. Поэтому дальнейшие эксперименты были проведены с этим содержанием C в периоде многослойных зеркал.

Из таблицы видно, что при давлении водорода в диапазоне 80–100% происходит смена знака механических напряжений. Иными словами, существует состояние с нулевым значением внутренних напряжений в многослойных зеркалах C/Si. Коэффициент отражения находится на уровне



**Рис. 1.** Угловая (а) (три последовательных измерения коэффициента отражения (1–3) и среднее по трем измерениям) и спектральная (б) зависимости коэффициента отражения на длине волны 13.5 нм от МЭМС с отражающим покрытием C/Si.



**Рис. 2.** Данные измерений матрицы микрозеркал на интерференционном микроскопе Zygo, объектив  $\times 100$ , x- и y-срезы.

$R \sim 11\%$ . Также в этой системе отсутствует блистеринг, характерный для системы  $V_4C/Si$ . Таким образом, система C/Si, осажденная в смеси аргон + водород при содержании водорода в среде рабочего газа между 80 и 100% от давления аргона, соответствует всем требованиям: имеет высокое электросопротивление, нулевые внутренние напряжения и приемлемый для безмасочной литографии коэффициент отражения  $R \sim 11\%$  на рабочей длине волны 13.5 нм.

Эта структура была нанесена на поверхность МЭМС микрозеркал. На рис. 1 приведены спек-

тральная и угловая зависимости коэффициента отражения в окрестности длины волны 13.5 нм от МЭМС DLP6500 0.65 1080pMVSPS600 DMD фирмы Texas Instruments. Коэффициент отражения составил  $R = 2.8\%$ .

После осаждения отражающего покрытия МЭМС сохраняла свою работоспособность как на воздухе, так и в вакууме. Низкий коэффициент отражения по сравнению со свидетелем, нанесенным на кремниевую суперполированную пластину, объясняется достаточно большой шероховатостью поверхности микрозеркал, которая со-

ставила по кадру АСМ  $3 \times 3$  мкм  $\sigma_{3 \times 3} = 2.4$  нм и по кадру  $1 \times 1$  мкм  $\sigma_{1 \times 1} = 1.9$  нм. Также вклад в падение коэффициента отражения может внести неплоскостность микрозеркал. На рис. 2 приведена измеренная на интерферометре белого света форма поверхности микрозеркал – их  $x$ - и  $y$ -срезы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены физические и рентгенооптические характеристики многослойных систем С/Si и В<sub>4</sub>С/Si. Установлено, что повышение рабочего давления приводит к уменьшению внутренних напряжений и уменьшению коэффициента отражения на рабочей длине волны 13.5 нм. Уменьшение коэффициентов отражения происходит из-за увеличения количества дефектов и уменьшения плотности материалов слоев.

Установлено, что добавление водорода в среду рабочего газа при изготовлении многослойных систем приводит к уменьшению внутренних напряжений и уменьшению коэффициента отражения. В системе В<sub>4</sub>С/Si на поверхности обнаружены кратеры с вырванным веществом – так называемый блистеринг. Данный факт не позволяет использовать эту систему в качестве отражающих покрытий для рентгенооптических приложений.

В системе С/Si получено состояние с нулевыми внутренними напряжениями при соотношении парциального давления водород : аргон  $\approx 0.87 : 1$ . При нулевых внутренних напряжениях коэффициент отражения этой системы, осажденной на гладкие кремниевые подложки,  $R = 11\%$ . При осаждении на поверхность матрицы микрозеркал  $R = 2.8\%$ . Отражательная способность понижается за счет большой шероховатости поверхности микрозеркал на уровне  $\sigma \sim 2$  нм. После осаждения отражающего покрытия С/Si на поверхность матрицы микрозеркал матрица сохраняет работоспособность.

Работа доказала принципиальную возможность создания рентгенооптического элемента для модуляции пространственно-временных характеристик рентгеновских пучков, однако практическое применение требует улучшения качества поверхности микрозеркал.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-72-30029) с использованием оборудования ЦКП “Физика и технология микро- и наноструктур” ИФМ РАН.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://elcombase.ru/news/38/>.
2. *Choksi N., Pickard D.S., McCord M., Pease R.F.W.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 1999. V. 17. P. 3047. <https://doi.org/10.1116/1.590952>
3. *Chkhalo N., Polkovnikov V., Salashchenko N., Toropov M.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2017. V. 35. P. 062002. <https://doi.org/10.1116/1.4995369>
4. *Chkhalo N.I., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Toropov M.N.* // Proc. SPIE. 2016. V. 10224. P. 102241O. <https://doi.org/10.1117/12.2267125>
5. *Chen Y., Shroff Y.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6151. P. 1512D. <https://doi.org/10.1117/12.655113>
6. *Nix W.D.* // Metall. Trans. A. 1989. V. 20. № 11. P. 2217. <https://doi.org/10.1007/BF02666659>
7. *Гофман Р.У.* Физика тонких пленок. Т. 3. М.: Мир, 1968.
8. *Андреев С.С., Клюенков Е.Б., Мизинов А.Л., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Суслов Л.А., Чернов В.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2005. № 2. С. 45.
9. <https://static.chipdip.ru/lib/051/DOC013051769.pdf>.
10. *Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Svechnikov M.V., Chkhalo N.I.* // Physics-Uspekhi. 2020. V. 63. Iss. 1. P. 83. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.05.038623>
11. *Svechnikov M.* // J. Appl. Crystallogr. 2020. V. 53. Iss. 1. P. 244. <https://doi.org/10.1107/S160057671901584X>
12. *Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю., Каськов И.А., Лопатин А.Я., Нечай А.Н., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И.* // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 4. С. 385.
13. *Garakhin S.A., Chkhalo N.I., Kas'kov I.A., Lopatin A.Ya., Malyshev I.V., Nechay A.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Svechnikov M.V., Tsybin N.N., Zabrodin I.G., Zuev S.Yu.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. Iss. 6. P. 063103. <https://doi.org/10.1063/1.5144489>
14. *Stoney G.G.* // Proc. R. Soc. Lond. A. 1909. V. 82. P. 172. <https://doi.org/10.1098/rspa.1909.0021>
15. *Brenner A., Senderoff S.* // J. Res. Nat'l. Bur. Stand. 1949. V. 42. P. 105.
16. *Добрынин А.В.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 32.
17. <http://www.lao.cz/data/ke-stazeni/datasheet-newview-7300-d838.pdf>
18. *Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. Iss. 1. P. 016102. <https://doi.org/10.1063/1.4905336>
19. *Takahashi H., Nishiguchi A., Nagata H., Kataoka H., Fujishima M.* // Thin Solid Films. 1996. V. 281. P. 348. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(96\)08631-2](https://doi.org/10.1016/0040-6090(96)08631-2)
20. *Condon J.B., Schober T.* // J. Nucl. Mater. 1993. V. 207. P. 1. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(93\)90244-S](https://doi.org/10.1016/0022-3115(93)90244-S)

## Study of the X-Ray Optical and Mechanical Characteristics of C/Si and B<sub>4</sub>C/Si Multilayer Mirrors

R. M. Smertin<sup>1, \*</sup>, M. M. Barysheva<sup>1</sup>, S. A. Garakhin<sup>1</sup>, M. V. Zorina<sup>1</sup>, S. Yu. Zuev<sup>1</sup>, V. N. Polkovnikov<sup>1</sup>, N. I. Chkhalo<sup>1</sup>, D. B. Radishchev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, 607680 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*\*e-mail: smertin\_ruslan@ipmras.ru*

The X-ray optical and mechanical properties of dielectric multilayer mirrors based on pairs of C/Si and B<sub>4</sub>C/Si materials are synthesized and studied. The mirrors are optimized for a wavelength of 13.5 nm. The parameters of the deposition process are found that simultaneously ensure the fulfillment of three conditions: relatively high reflection coefficients at the operating wavelength, near-zero mechanical stresses in the film, and the absence of electrical conductivity. At zero internal stresses, the reflection coefficient of C/Si multilayer mirrors deposited on superpolished silicon substrates at an operating wavelength of 13.5 nm is  $R = 11\%$ , the spectral bandwidth is  $\Delta\lambda = 0.33$  nm. The B<sub>4</sub>C/Si mirror provides the following characteristics:  $R = 8.2\%$ , spectral bandwidth  $\Delta\lambda = 0.3$  nm. However, blistering has been found in B<sub>4</sub>C/Si multilayer mirrors, i.e., the appearance of bubbles on the film due to the accumulation of hydrogen inside, which excludes their use for deposition on commercially available microelectromechanical system micromirrors. The deposition of a C/Si coating made it possible for the first time to obtain a workable system that reflects X-rays at an operating wavelength of 13.5 nm. The reflection coefficient is about  $R \sim 3\%$ . The low value of the reflection coefficient is due to the high, about 1.5 nm, microroughness of the surface of the microelectromechanical system micromirrors. The study performed indicates the fundamental possibility of creating a matrix X-ray optical element for modulating the spatiotemporal characteristics of X-ray beams.

**Keywords:** X-ray radiation, multilayer mirrors, internal stresses, EUV lithography, maskless lithography, microelectromechanical system.