

# Многослойные зеркала нормального падения на основе Sb/B<sub>4</sub>C для диапазона $80 \text{ \AA} < \lambda < 120 \text{ \AA}$

Е.А.Вишняков, Д.Л.Воронов, Э.М.Гулликсон, В.В.Кондратенко, И.А.Копылец, М.С.Лугинин, А.С.Пирожков, Е.Н.Рагозин, А.Н.Шатохин

*Рассчитаны теоретически и затем впервые синтезированы периодические и аperiodические многослойные структуры на основе пары Sb/B<sub>4</sub>C для оптики мягкого рентгеновского диапазона  $80 \text{ \AA} < \lambda < 120 \text{ \AA}$ . Спектры отражения периодических многослойных зеркал измерены с использованием синхротронного излучения и излучения, продуцируемого лазерной плазмой. Экспериментальные спектры проинтерпретированы с теоретической точки зрения, проведён учёт переходных слоёв и шероховатостей подложек. Предположительно плотность слоёв сурьмы  $\rho_{Sb} = 6.0 \text{ г/см}^3$ , а толщины переходных слоёв в многослойных структурах Sb/B<sub>4</sub>C не превышают  $10 \text{ \AA}$ . Экспериментально достигнуто коэффициент отражения 19% на длине волны  $\lambda = 85 \text{ \AA}$ . Аperiodическое зеркало, оптимизированное на максимальное равномерное отражение в области  $100\text{--}120 \text{ \AA}$ , испытано с использованием лазерно-плазменного источника излучения.*

**Ключевые слова:** мягкий рентгеновский диапазон, многослойные зеркала, сурьма, аperiodические структуры, нормальное падение излучения.

## 1. Введение

В настоящее время многослойная отражающая рентгеновская оптика нормального падения является важным инструментом физических исследований в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах спектра ( $\lambda = 30\text{--}600 \text{ \AA}$ ). Наиболее технологичными оказались периодические многослойные зеркала (МЗ), имеющие высокоселективный коэффициент отражения по спектру, вследствие чего их обычно используют для выделения определённых линий или их групп в линейчатых спектрах. МЗ на основе периодических многослойных структур нашли широкое применение в спектроскопии лабораторной плазмы, в рентгеновской астрономии, аналитическом приборостроении, в микро- и нанотехнологиях (для рентгеновской литографии), а также в оптике лабораторных источников ВУФ и рентгеновского излучения (в том числе синхротронов и лазеров на свободных электронах).

Периодические рентгеновские МЗ принято характеризовать коэффициентом отражения в максимуме (т. е. на

длине волны  $\lambda_0 = 2d\langle n \rangle \cos\theta$ , где  $d$  – период многослойной структуры,  $\langle n \rangle$  – средний по периоду показатель преломления и  $\theta$  – угол падения), а также формой и шириной резонансного пика отражения. Эти оптические характеристики МЗ зависят от внутреннего строения зеркал – от наличия переходных слоёв в структуре, их толщины, плотности и состава, от плотности основных слоёв МЗ (которая, вообще говоря, может отличаться от плотности материалов в массивном состоянии и величина которой влияет на оптические константы материалов), а также от межслойных шероховатостей и шероховатостей подложки. Наибольший интерес к этим параметрам возникает на этапе создания новых типов многослойных покрытий для рентгеновской оптики.

При проведении экспериментов в лабораторных условиях существует также потребность в дифракционных спектрометрах МР диапазона, обладающих одновременно стигматизмом, относительно большим приёмным углом ( $\sim 5 \cdot 10^{-2} \times 5 \cdot 10^{-2}$  рад) и сравнительно широким рабочим спектральным диапазоном (порядка октавы и более) при разрешающей способности  $\lambda/\delta\lambda \sim 300$  и выше. Такой стигматический (изображающий) спектральный прибор был нами реализован при использовании аperiodического многослойного зеркала (АМЗ) нормального падения на основе структуры Mo/Si [1] в сочетании с пропускающей дифракционной решёткой.

Широкополосные АМЗ [2] могут применяться для исследований элементарных процессов с участием многозарядных ионов, проводимых с использованием стигматических (изображающих) спектрографов [3–8], для диагностики плазмы, в том числе лазерной микроплазмы [9–11], для регистрации спектров высоких гармоник лазерного излучения и импульсов МР излучения, генерируемых лазерами на свободных электронах [12] или другими источниками, для отражения аттосекундных импульсов МР излучения и преобразования их длительности [13, 14] и др. Задача обеспечения максимального интегрального коэффициента пропускания при нескольких по-

**Е.А.Вишняков, Е.Н.Рагозин, А.Н.Шатохин.** Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: juk301@mail.ru, enrigozin@gmail.com

**D.L.Voronov, E.M.Gullikson.** Center for X-ray Optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

**В.В.Кондратенко, И.А.Копылец.** Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, 61002 Харьков, ул. Фрунзе, 21

**М.С.Лугинин.** Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

**A.S.Pirozhkov.** Advanced Beam Technology Division, JAEA, 8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0215, Japan

Поступила в редакцию 17 января 2013 г., после доработки – 26 апреля 2013 г.

следовательных отражениях в системе МЗ с учетом пропуска фильтров возникает, в частности, в рентгеновской литографии. Недавно МЗ на основе пары Mo/Si, оптимизированное на максимальное равномерное отражение в диапазоне 125–250 Å при нормальном падении излучения, было использовано в экспериментах по конверсии излучения Ti:сапфирового лазера (λ ~ 0.8 мкм) в излучение МР диапазона. Повышение частоты возникало при отражении импульсов излучения от релятивистской плазменной волны, возбуждаемой мультитераваттным лазерным излучением в импульсной струе He (релятивистское «летающее зеркало»), а обсуждаемое АМЗ было основным элементом анализирующего МР спектрографа нормального падения [15–17]. Оптические схемы, включающие МЗ только нормального падения, представляют особую ценность по сравнению со схемами скользящего падения, поскольку они обладают малыми абберациями и пригодны для построения оптических изображений.

Одной из наиболее технологичных пар для создания МЗ в МР диапазоне остаётся Mo/Si. Но рабочий диапазон длин волн молибден-кремниевых зеркал ограничен снизу L-краем поглощения кремния (λ = 125 Å). Достижение достаточно высокого отражения при нормальном падении в широкой области длин волн короче 125 Å требует применения других пар материалов. В работе [18] были проанализированы оптические свойства более 1300 неорганических соединений и элементов и выбраны пары материалов, которые можно использовать в качестве компонентов периодических МЗ для длин волн 30–300 Å. Результат представлен в виде таблиц, содержащих информацию о составах многослойных структур, достижимых коэффициентах отражения периодических зеркал и т. д. Требования к оптическим константам элементов, составляющих аперiodическую структуру, зависят от применяемого критерия оптимизации и, вообще говоря, отличаются от таковых для случая периодических зеркал. Тем не менее пары материалов, дающие наилучшие результаты в случае периодических МЗ, как правило, будут эффективны и в аперiodических структурах.

В настоящее время в спектральном диапазоне, ограниченном сверху L-краем поглощения кремния (λ = 125 Å), а снизу K-краем поглощения бора (λ = 65.9 Å), наиболее перспективными показали себя МЗ на основе Mo/Be, Mo/Y и La/V<sub>4</sub>C. В частности в работе [19] были синтезированы периодические МЗ на основе Mo/Be и Nb/Be, которые показали на длине волны λ = 113 Å пиковый коэффициент отражения 69% и 58% соответственно. Это хорошее продвижение в коротковолновую область, однако МЗ на основе бериллия будут неэффективны на длинах волн короче длины волны K-края поглощения Be (λ = 111 Å). В более коротковолновом диапазоне был достигнут коэффициент отражения 34% на длинах волн 93.4 и 95.0 Å для периодических зеркал на основе структур Ru/Y [20] и Mo/Y [21] соответственно. На длинах волн, близких к λ ≈ 67 Å, для МЗ на основе La/V<sub>4</sub>C в ряде работ удалось получить коэффи-

циент отражения выше 40% [22–26]. Лучшие достижения в этой области – 46.3% на λ = 66.9 Å [25] и 48.9% на λ = 66.8 Å [26]. В последнее время группе Н.Н.Салашенко удалось, вводя барьерный слой углерода толщиной 3 Å, синтезировать МЗ на основе La/V<sub>4</sub>C/C с коэффициентом отражения 58.6% на λ = 66.6 Å при угле падения 20° от нормали [27]. В работе [28] в области λ < 125 Å сравниваются различные пары материалов (в основном содержащие иттрий) с точки зрения создания периодических МЗ с максимумом на λ = 90 Å и широкополосных аперiodических МЗ для областей от 80, 85 или 90 Å до 130 Å.

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследуются МЗ на основе структуры Sb/V<sub>4</sub>C, внимание на которую впервые было обращено в работе [29]. Относительно низкий коэффициент поглощения сурьмы в области λ < 100 Å и достаточно сильное отличие действительной части показателя преломления от единицы в области λ > 80 Å позволяют создать на основе структуры Sb/V<sub>4</sub>C многослойные зеркала для области 80 Å < λ < 120 Å с коэффициентами отражения порядка 30%–40%. Все исследуемые МЗ были синтезированы в НТУ «Харьковский политехнический институт», а затем испытаны с использованием лазерно-плазменного либо синхротронного источника МР излучения. Экспериментально полученные спектры анализируются и сравниваются с теоретическими.

## 2. Экспериментальная установка

Экспериментально исследовались четыре периодических МЗ на основе структуры Sb/V<sub>4</sub>C и одно аперiodическое МЗ, оптимизированное на максимальное равномерное отражение в диапазоне длин волн 100–120 Å (табл.1). Два периодических МЗ (МЗ-1 и МЗ-4) были отправлены в Центр рентгеновской оптики (Center for X-ray Optics, LBNL, Беркли, США) для измерений на синхротроне ALS (Beam line 6.3.2), а спектры отражения остальных МЗ были измерены в ФИАНе при помощи лазерно-плазменного источника излучения. В ФИАНе эксперименты проводились в вакуумной камере «Икар» (Ø0.9×3.8 м), оснащенной системой безмасляной откачки. Остаточное давление газа в камере составляет менее 10<sup>-4</sup> Тор.

У торца вакуумной камеры находился импульсно-периодический лазер на кристалле ортоалюмината иттрия, легированного неодимом (Nd:YAlO<sub>3</sub>, 0.5 Дж, 6 нс, 1.08 мкм). Лазерная плазма возникала при фокусировке наносекундных лазерных импульсов на вольфрамовую мишень при помощи линзы из тяжёлого флинта с фокусным расстоянием f = 75 мм. Лазерный пучок фокусировался на мишени в пятно с эффективной площадью S<sub>eff</sub> ~ 10<sup>-5</sup> см<sup>2</sup>, максимальная интенсивность лазерного излучения в центре фокального пятна при этом достигала ~10<sup>13</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Лазерная плазма служила источником МР излучения, а основным экспериментальным прибором был изображающий (стигматический) дифракционный МР спектрограф, роль фокусирующего элемента в кото-

Табл.1. Параметры исследуемых многослойных зеркал на основе Sb/V<sub>4</sub>C.

Название	Число слоёв	Период (Å)	Доля V <sub>4</sub> C в периоде	Радиус кривизны (мм)	Апертура (мм)
МЗ-1	300	43.5	0.53	плоское	25×30
МЗ-2, МЗ-3	300	43.0	0.53	467	Ø50.8
МЗ-4	600	42.9	0.53	плоское	25×30
АМЗ 100–120	300	–	0.59 (среднее)	1000	Ø40.0

ром играли исследуемые зеркала (рис.1). Спектрограф [30, 31] был собран на оптическом столе  $0.6 \times 3.6$  м в вакуумной камере «Икар» и включал в себя входную щель, исследуемое МЗ, широкоапертурную свободновисящую пропускающую дифракционную решетку и установленную на расчётном расстоянии от неё кассету радиусом 167 мм с рентгеновской фотоплёнкой УФ-4.

Как известно [32, 33], из-за высокого атомного номера вольфрама излучение получаемой плазмы представляет собой квазинепрерывный спектр с плавно изменяющейся в диапазоне  $20\text{--}250$  Å интенсивностью. Это позволяет использовать такое излучение для исследований в достаточно широком спектральном диапазоне. В итоге интенсивность каждого из спектров, зарегистрированных в данной работе, равна произведению интенсивности медленно меняющегося спектра излучения источника, отражательной способности исследуемого МЗ и спектральной чувствительности плёнки УФ-4.

Входная щель спектрографа и кассета с плёнкой УФ-4 располагались практически на круге Роуленда исследуемого МЗ симметрично относительно нормали к поверхности зеркала, проведённой через точку падения центрального луча. При измерении спектров короткофокусных МЗ расстояние между входной щелью и местом изображения нулевого порядка дифракции на плёнке составляло 89 мм, при измерении спектра длиннофокусного МЗ – 150 мм. Таким образом, отражение излучения от МЗ происходило при углах падения менее  $0.1$  рад. Как следствие, aberrации схемы были малы, и спектральные изображения входной щели, создаваемые многослойными зеркалами на фотоэмульсии плёнки, обладали высокой стигматичностью.

Свободновисящая дифракционная решётка, работающая на пропускание, находилась в пучке, отражённом от исследуемого МЗ. При измерении спектров отражения короткофокусных МЗ использовалась золотая решётка 5000 линий/мм (площадью  $0.5$  см<sup>2</sup>), а при измерении спектра длиннофокусного МЗ – решётка 1000 линий/мм ( $5$  см<sup>2</sup>).

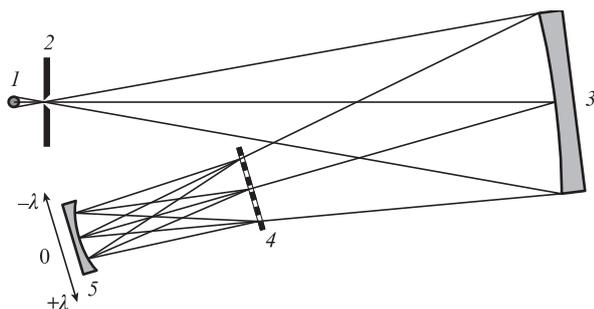


Рис.1. Схема изображающего (стигматического) дифракционного МР спектрографа:

1 – лазерная плазма; 2 – входная щель; 3 – исследуемое МЗ; 4 – дифракционная решётка на пропускание; 5 – кассета с фотоплёнкой УФ-4.

Линейная дисперсия во всех экспериментах составляла  $20$  Å/мм. При измерении спектров периодических МЗ спектральная ширина щели составляла  $0.6$  Å, при измерении спектра АМЗ –  $1.2$  Å.

Расстояние между входной щелью спектрографа и лазерной плазмой было равно  $30$  мм в случае короткофокусных МЗ и  $110$  мм в случае длиннофокусного. Из-за малых размеров лазерно-плазменного источника ( $\sim 0.05$  мм) МР излучение, исходящее из каждой точки входной щели, освещало сравнительно небольшой ( $1\text{--}3$  мм по вертикали) участок апертуры МЗ. Это позволяло судить об однородности многослойного покрытия по апертуре МЗ исходя из формы зарегистрированных спектров [31].

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Периодические МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C

Исследуемые МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C были вначале рассчитаны теоретически, а затем синтезированы без введения каких-либо дополнительных барьерных слоёв. Оптические константы материалов, использованные для всех теоретических расчётов, взяты нами из [34]. Все МЗ были синтезированы методом магнетронного распыления и последующего послойного осаждения на полированные кварцевые и стеклянные подложки (шероховатость на уровне  $3.5\text{--}4.0$  Å) с заданным радиусом кривизны. Все испытуемые МЗ содержат по  $300$  одиночных слоёв ( $150$  периодов) многослойной структуры, кроме МЗ-4 ( $600$  слоёв). Геометрические и структурные данные по испытуемым МЗ собраны в табл.1, измеренные оптико-спектральные характеристики – в табл.2.

Спектр отражения МЗ-1, содержащего  $300$  слоёв, приведён на рис.2. Максимум его отражательной способности приходится на  $\lambda = 85.6$  Å при угле падения  $2^\circ$  от нормали к поверхности МЗ, проведённой через центр его апертуры. Измеренный коэффициент отражения  $R$  в максимуме составил  $18.0\%$ , спектральная ширина главного максимума отражения  $\Delta\lambda_{FWHM} = 0.90$  Å.

Периодические зеркала МЗ-2 и МЗ-3 были практически идентичными, поскольку напылялись в одном и том же эксперименте на разных концах «карусели» с подложками, и различались только первым слоем на кварцевой подложке: в МЗ-2 первым слоем был Sb, а в МЗ-3 – B<sub>4</sub>C. Спектры отражения обоих зеркал были идентичными, однако через два-три месяца после синтеза зеркало МЗ-2 отслоилось от подложки практически по всей апертуре (рис.3) вследствие худшей адгезии сурьмы к кварцевой подложке, чем у B<sub>4</sub>C. В результате был сделан важный технологический вывод о том, что для обеспечения стабильности зеркал в МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C первым слоем на кварцевой подложке должен быть B<sub>4</sub>C. Стабильность

Табл.2. Измеренные оптические и спектральные характеристики многослойных зеркал на основе Sb/B<sub>4</sub>C.

Название	Длина волны в максимуме (Å)	Угол падения (°)	Коэффициент отражения (%)	Число слоёв	Ширина линии FWHM (Å)	
					эксперимент	теория
МЗ-1	85.6	2	18.0	300	0.90	0.75
МЗ-2, МЗ-3	84.4	5	18.0	300	0.8	0.75
МЗ-4	84.4	2	19.6	600	0.70	0.66
АМЗ 100–120	100 – 120	4	2.5	300	20	20

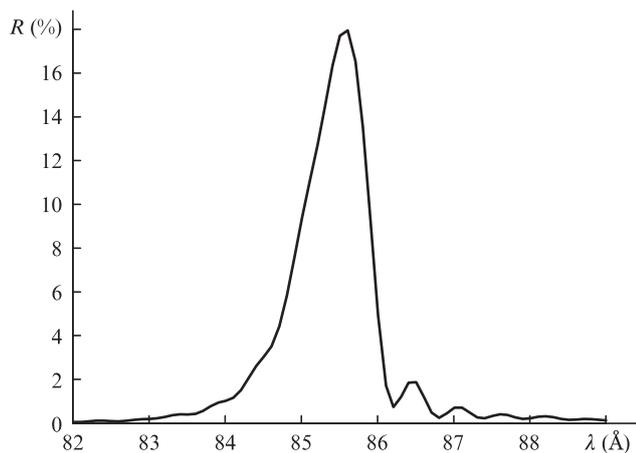


Рис.2. Спектр отражения МЗ-1, измеренный с использованием синхротронного источника МР излучения.

зеркала МЗ-3 была повторно измерена через год после изготовления, и изменений в спектре отражения зарегистрировано не было.

Максимумы отражательной способности МЗ-2 и МЗ-3 приходятся на λ = 84.4 Å при угле падения 5° от нормали к поверхности МЗ, проведённой через центр его апертуры. Это соответствует λ<sub>0</sub> = 84.7 Å при нормальном падении излучения. Интересно отметить, что ширина зарегистрированных спектров Δλ<sub>FWHM</sub> = 0.8 Å ± 0.1 Å (рис.4) при теоретической ширине Δλ<sub>FWHM</sub> = 0.75 Å для N = 300. Такая малая спектральная ширина экспериментальных кривых отражения свидетельствует о высокой однородности многослойного покрытия как по апертуре МЗ, так и по глубине слоёв. Это позволяет говорить о высоком качестве новых зеркал на основе Sb/B<sub>4</sub>C, сопоставимом с качеством МЗ на основе Mo/B<sub>4</sub>C, воспроизводимость толщин слоёв которых от периода к периоду не выходит за пределы 0.1% [35].

Стоит также отметить, что участки непрерывного спектра, занимающие на спектре, приведенном на рис.4,а, область 20–70 Å, не имеют никакого отношения к спектрам изучаемых МЗ. Этот «артефакт», присутствующий на всех спектрах, снятых с золотой дифракционной решёткой 5000 линий/мм, наблюдался нами и ранее. По-видимому, это результат дифракции ИК волн (λ = 1.5–5.0 мкм) на поддерживающей структуре (период 150 мкм) дифракционной решётки. Несмотря на малый рабочий период решётки, электро-



Рис.3. Отслоение многослойной структуры в МЗ (первый слой на кварцевой подложке – сурьма).

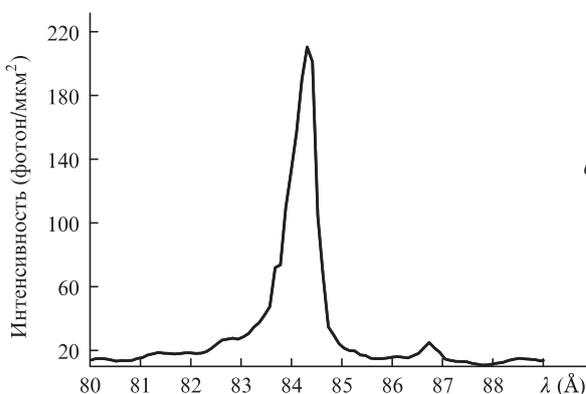
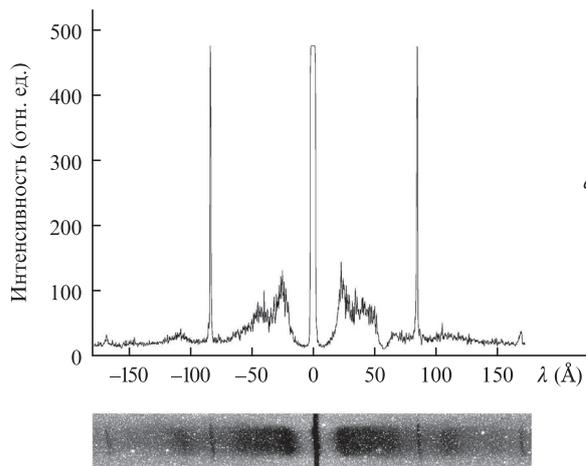


Рис.4. Обзорный спектр отражения периодических МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C, зарегистрированный при помощи лазерно-плазменного источника МР излучения (а), и отдельно взятый спектр в первом порядке дифракции (б).

магнитные волны горизонтальной поляризации могут частично проходить сквозь её штрихи и попадать на детектор.

### 3.2. Факторы, ответственные за снижение коэффициентов отражения МЗ

Расчётное значение коэффициента отражения в максимуме для МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C с λ<sub>0</sub> ≈ 85 Å даёт R<sub>0</sub> = 37.8% для 300 слоёв. Но здесь не учтены возможность формирования переходных слоёв на границах раздела Sb и B<sub>4</sub>C, а также шероховатости подложки, наличие которых будет снижать реальный коэффициент отражения. Ещё одной степенью свободы может быть отличие плотности сурьмы от табличной (в кристаллическом состоянии ρ<sub>Sb</sub> = 6.7 г/см<sup>3</sup>). Известно, что все аллотропные модификации аморфной сурьмы имеют более низкую плотность, чем кристаллическая сурьма [36]. При изготовлении МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C, как показывает рентгеновский фазовый анализ, слоёв сурьмы являются аморфными. Поэтому с большой вероятностью можно считать, что в нашем случае их плотность ниже, чем в кристаллическом состоянии. Для описания экспериментальных результатов мы исходили из предположения, что плотность слоёв сурьмы в изготовленных МЗ составляет примерно 6.0 г/см<sup>3</sup>.

Гипотеза о пониженной плотности аморфной сурьмы косвенно подтверждается следующими данными. На рис.5,а приведены спектры отражения МЗ-1 и МЗ-4, изме-

ренные при помощи синхротронного источника МР излучения. Пиковый коэффициент отражения МЗ-4, содержащего 600 слоёв, оказался равным 19.6%, т.е. повысился в  $k = 1.09$  раз относительно МЗ с 300 слоями. Если взять за единицу в расчётах коэффициент отражения МЗ с 300 слоями, то можно увидеть, что в структурах с расчётной плотностью сурьмы  $6.0 \text{ г/см}^3$  насыщение по числу слоёв  $N$  происходит медленнее, чем в структурах с  $\rho_{\text{Sb}} = 6.7 \text{ г/см}^3$  (рис.5,б). В первом случае при увеличении  $N$  до 600 получим  $k = 1.12$ , а во втором – всего лишь  $k = 1.06$ . То есть расчёт с использованием табличной плотности сурьмы не может объяснить повышения коэффициента отражения с 18.0% до 19.6% при увеличении  $N$  от 300 до 600. Это указывает на то, что при магнетронном распылении плотность сурьмы в МЗ на основе  $\text{Sb/B}_4\text{C}$ , вероятно, снизилась до  $6.0 \text{ г/см}^3$ . В свою очередь, повышение коэффициента отражения МЗ-4 всего в 1.09 раз, а не в 1.12 раза, можно объяснить развитием межслойных шероховатостей в структуре  $\text{Sb/B}_4\text{C}$  при увеличении числа слоёв.

Расчётный коэффициент отражения  $R_0$  в максимуме без учёта шероховатостей подложки и переходных слоёв в МЗ на основе  $\text{Sb/B}_4\text{C}$  с  $\rho_{\text{Sb}} = 6.0 \text{ г/см}^3$  составляет 29.7% для  $N = 300$ . Если теперь шероховатость  $\sigma = 4.0 \text{ \AA}$  учесть в форме фактора Дебая–Уоллера, то получим  $R = R_0 \exp(-4\pi\sigma/\lambda)^2 = 21.0\%$ . При таком учёте шероховатости предполагается, что форма поверхности подложки воспроизводится без из-

менений на всех границах раздела слоёв. Если в МЗ среднеквадратичная шероховатость изменяется от слоя к слою, то учтённый в факторе Дебая–Уоллера параметр  $\sigma$  имеет смысл средней межслойной шероховатости. Значение  $\sigma = 4.0 \text{ \AA}$  получено из моделирования спектров малоуглового рассеяния данной многослойной структуры на длине волны  $\text{CuK}\alpha$ , равной  $1.54 \text{ \AA}$ . Значение  $R = 21.0\%$  уже близко к экспериментально измеренному, и это позволяет предполагать, что основной вклад в снижение коэффициента отражения МЗ вносят снижение плотности сурьмы до  $6.0 \text{ г/см}^3$  и межслойные шероховатости. Дальнейшее понижение коэффициента отражения до 18%, как мы полагаем, можно связать с неучтёнными собственными межслойными шероховатостями и с возможным образованием переходных слоёв в многослойных структурах  $\text{Sb/B}_4\text{C}$ .

Так как пока в литературе нет данных о переходных слоях в структурах  $\text{Sb/B}_4\text{C}$ , то мы моделировали изменение комплексной диэлектрической проницаемости в переходном слое линейным образом, изменяя при этом его толщину [28,29]. Модельное увеличение толщины переходных слоёв в расчётах привело к логичным результатам: коэффициент отражения в максимуме падает тем сильнее, чем толще переходные слои, причём зависимость нелинейная (рис.6). На рис.6,б приведены зависимости коэффициента отражения в максимуме от ширины переходных слоёв в МЗ с  $\rho_{\text{Sb}} = 6.0 \text{ г/см}^3$  в двух случаях: без учёта средней шероховатости и с учётом шероховатости  $\sigma = 4.0 \text{ \AA}$  в форме фактора Дебая–Уоллера.

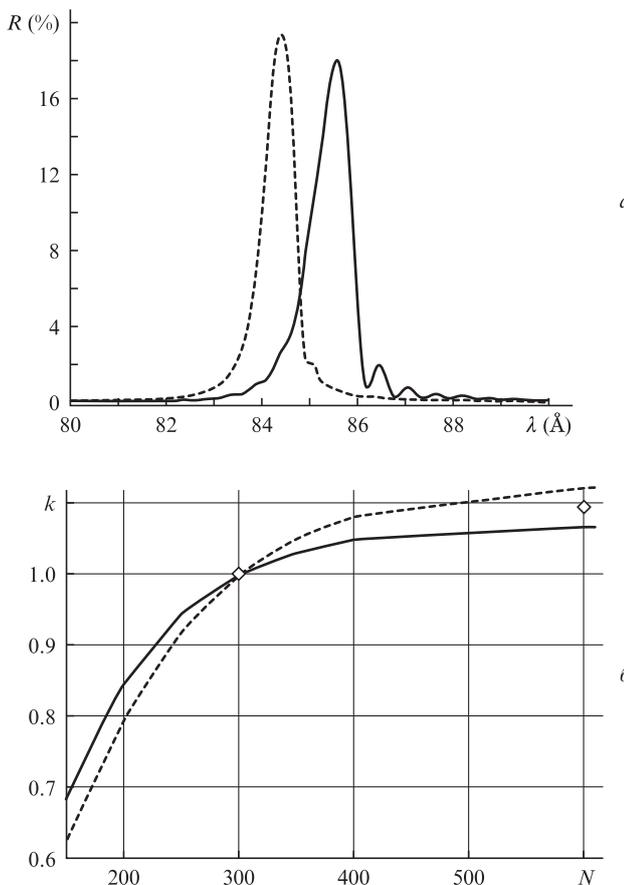


Рис.5. Спектры отражения МЗ-1 (300 слоёв, сплошная кривая) и МЗ-4 (600 слоёв, штриховая кривая) (а) и зависимость нормированного коэффициента отражения периодических МЗ на основе  $\text{Sb/B}_4\text{C}$  от числа слоёв для  $\rho_{\text{Sb}} = 6.7 \text{ г/см}^3$  (сплошная кривая) и  $6.0 \text{ г/см}^3$  (штриховая кривая), ромбы – экспериментальные данные, коэффициент  $R$  нормирован на единицу при  $N = 300$  (б).

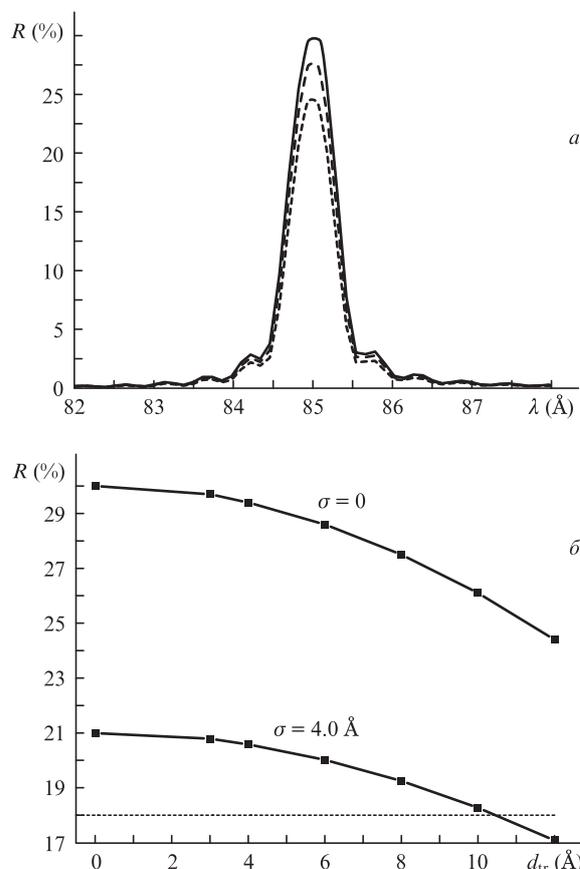


Рис.6. Расчётный спектр отражения периодического МЗ на основе  $\text{Sb/B}_4\text{C}$  при толщине переходных слоёв  $d_{\text{tr}} = 0, 8$  и  $12 \text{ \AA}$  (расчётная плотность сурьмы  $\rho_{\text{Sb}} = 6.0 \text{ г/см}^3$ ,  $N = 300$ , шероховатость  $\sigma = 0$ ) (а) и зависимость расчётного коэффициента отражения МЗ от толщины переходных слоёв без учёта шероховатостей и при  $\sigma = 4.0 \text{ \AA}$ ; пунктир – уровень отражения, измеренный экспериментально (б).

Все расчёты, приведённые на рис.6, для простоты сравнения теории с экспериментом были выполнены для N = 300. Измеренный коэффициент отражения периодических МЗ показан на рис.6,б пунктиром. Видно, что после учёта пониженной плотности слоёв сурьмы и средней шероховатости наличие переходных слоёв снижает коэффициент отражения уже не сильно, а их толщина (если они образуются) не превышает 10 Å.

Итак, в сравнении с идеальным теоретическим расчётом (при ρ<sub>Sb</sub> = 6.7 г/см<sup>3</sup> и отсутствии шероховатостей и переходных слоёв) при учёте пониженной плотности Sb коэффициент отражения МЗ уменьшается приблизительно на четверть, а при учёте средней межслойной шероховатости в виде фактора Дебая–Уоллера – ещё почти на треть от оставшегося. Итого, реально достигаемый коэффициент отражения составляет около половины от теоретического максимума. В остальном же МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C продемонстрировали высокую стабильность при условии, что первым слоем на подложке был В<sub>4</sub>С.

### 3.3. Влияние толщины переходных слоёв на ширины спектральных контуров отражения

Кроме снижения R, из расчётов следует, что при увеличении толщин переходных слоёв ширина спектральной кривой отражения МЗ уменьшается. Это тоже имеет простое объяснение: исчезновение резких границ раздела слоёв Sb и В<sub>4</sub>С приводит к уменьшению амплитуд волн, отражённых от каждой границы раздела. С другой стороны, это приводит к меньшему ослаблению падающей волны и к более глубокому её проникновению в глубь структуры. Соответственно «работает» большее число слоёв МЗ и большее эффективное количество интерферирующих отражённых лучей формирует более узкий спектральный контур отражения.

Стоит также отметить, что без учёта переходных слоёв теоретическая ширина спектрального контура отражения МЗ Δλ<sub>FWHM</sub> = 0.75 Å для 300 слоёв при ρ<sub>Sb</sub> = 6.7 г/см<sup>3</sup> и 0.68 Å при ρ<sub>Sb</sub> = 6.0 г/см<sup>3</sup>. Учёт переходных слоёв ведёт к дальнейшему сужению спектрального пика отражения МЗ. Расчётные ширины спектральных максимумов отражения периодических МЗ приведены в табл.3 в зависимости от толщины переходных слоёв.

### 3.4. Аперiodические широкополосные МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C

В настоящей работе было рассчитано три аперiodических МЗ на основе пары Sb/B<sub>4</sub>C для диапазона 90–120 Å. Все АМЗ были оптимизированы на максимальное равномерное отражение в заданных интервалах длин волн путём минимизации функционала S<sub>1</sub> = ∫[R(λ) – R<sub>0</sub>]<sup>2</sup> dλ (здесь R<sub>0</sub> – параметр оптимизации). Такие зеркала, как правило, обладают существенно более высоким интегральным коэффициентом отражения по сравнению с любым периодическим зеркалом, главный максимум отра-

жения которого находится в том же интервале длин волн. Число параметров оптимизации при такой постановке задачи равно числу слоёв в аперiodической структуре. Начальными структурами при решении оптимизационной задачи служили периодические МЗ. При этом оказалось, что различные начальные структуры могут приводить к практически равноценным с точки зрения критерия оптимизации решениям, несмотря на то что отвечающие им оптимизированные АМЗ могут существенно различаться. Структуры для синтеза выбирались из соображений устойчивости спектров отражения к небольшим изменениям толщин отдельных слоёв.

Расчётные спектры для теоретически рассчитанных АМЗ приведены на рис.7. Области их оптимизации были выбраны интервалы 100–120 Å, 90–100 Å и 95–105 Å. Средний теоретический коэффициент отражения R в области оптимизации для них составил 5.0%, 6.0% и 7.5% соответственно. Интегральный коэффициент отражения в области оптимизации S<sub>2</sub> = ∫R(λ)dλ для всех АМЗ был ~1 Å. (Для сравнения, расчётный интегральный коэффициент отражения периодических МЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C с λ<sub>0</sub> ≈ 85 Å не превышает 0.3 Å.) Расчёты проводились при ρ<sub>Sb</sub> = 6.7 г/см<sup>3</sup>, без учёта шероховатостей и образования переходных слоёв. При оптимизации было программно заложено ограничение на минимальную толщину слоя в 15 Å – для удобства синтеза и повышения устойчивости спектров отражения АМЗ к погрешностям толщин основных слоёв структуры и образованию переходных слоёв.

Все три АМЗ в настоящее время уже синтезированы, однако исследовано только АМЗ с областью оптимизации 100–120 Å. Оно было испытано с использованием лазерно-плазменного источника МР излучения, результат измерений приведён на рис.8. Можно отметить превосходное соответствие спектральной области полученного «плато» области теоретической оптимизации МЗ, а также хорошую однородность многослойного покрытия по апертуре данного МЗ (различие границ области опти-

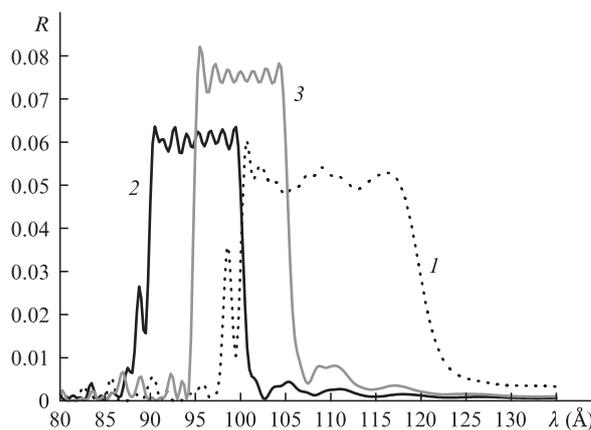


Рис.7. Расчёты АМЗ на основе Sb/B<sub>4</sub>C с областями оптимизации 100–120 Å (1), 90–100 Å (2) и 95–105 Å (3) (ρ<sub>Sb</sub> = 6.7 г/см<sup>3</sup>).

Табл.3. Ширины спектральных максимумов отражения (Δλ<sub>FWHM</sub> (Å)) периодических МЗ в зависимости от толщин переходных слоёв d<sub>тр</sub>:

Расчётная плотность сурьмы (г/см <sup>3</sup> )	Толщины переходных слоёв (Å)				
	N = 300				N = 600
	0	6	8	12	0
6.7	0.75 Å	0.74 Å	0.73 Å	0.70 Å	0.66 Å
6.0	0.68 Å	0.67 Å	0.66 Å	0.64 Å	0.55 Å

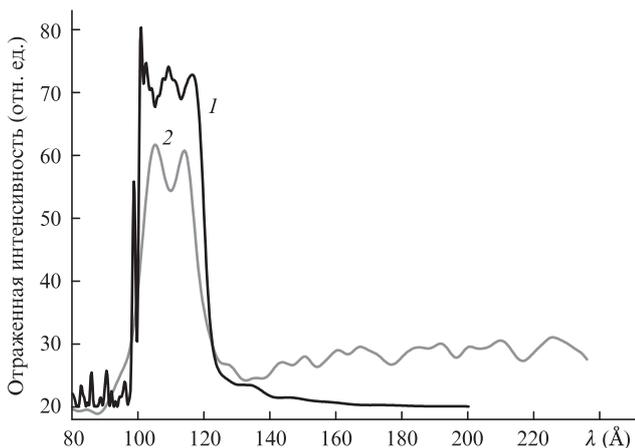


Рис.8. Теоретический (1) и экспериментальный (2) спектры отражения АМЗ-1 (область оптимизации 100–120 Å).

мизации на противоположных концах зеркала не превышает 1 Å). Более высокое длинноволновое «крыло» в экспериментальном спектре, чем в теоретическом, можно объяснить большей светимостью вольфрамовой плазмы в области  $\lambda > 120$  Å, чем в диапазоне  $50 \text{ Å} < \lambda < 120 \text{ Å}$  [37]. Это связано с тем, что экспериментальный спектр является произведением трёх функций: спектра излучения плазмы, отражательной способности МЗ и спектральной чувствительности плёнки.

Факторы, ответственные за снижение коэффициентов отражения периодических МЗ на основе  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  (пониженная плотность сурьмы, средняя межслойная шероховатость  $\sigma = 4.0$  Å и возможное наличие переходных слоёв), в той же мере проявляют себя и в случае АМЗ. Поэтому следует ожидать, что средний коэффициент отражения на «плато» синтезированного АМЗ-1 равен  $\sim 2.5\%$ , т.е. он вдвое ниже предельного теоретического значения (рассчитанного с использованием табличной плотности сурьмы  $\rho_{\text{Sb}} = 6.7 \text{ г/см}^3$ ).

#### 4. Заключение

В настоящей работе несколько изображающих многослойных зеркал нормального падения на основе структуры  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  рассчитано теоретически, а затем синтезировано и испытано с использованием синхротронного и лазерно-плазменного источников МР излучения. Продемонстрирована высокая эффективность использования дифракционного спектрографа с широкополосным лазерно-плазменным источником МР излучения для характеристики вогнутых МЗ нормального падения в области  $80 \text{ Å} < \lambda < 120 \text{ Å}$ . Измерения показали высокую однородность многослойного покрытия по апертуре зеркал и по глубине слоев от периода к периоду.

Периодические МЗ с первым слоем Sb на кварцевой подложке оказались нестабильными и через несколько месяцев после изготовления отслоились на большей части апертуры. Так был получен важный технологический результат: при напылении МЗ  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  первым слоем на подложке должен быть слой  $\text{V}_4\text{C}$ .

Сравнение спектров отражения периодических МЗ с  $\lambda_0 \approx 85$  Å и идеального теоретического расчёта даёт реальный коэффициент отражения  $R = 18.0\%$  против  $R_{\text{theor}} = 37.8\%$  для  $N = 300$ . Снижение реального коэффициента отражения в максимуме относительно теоретического в

два раза можно для всех исследованных МЗ на основе  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  объяснить совокупностью трёх факторов:

1. Снижением плотности сурьмы до  $6.0 \text{ г/см}^3$  в слоях МЗ при магнетронном распылении ( $R$  уменьшается почти на 1/4).

2. Наличием межслойных шероховатостей на уровне  $4.0$  Å ( $R$  уменьшается ещё на 1/4).

3. Возможным образованием переходных слоёв на границах раздела Sb и  $\text{V}_4\text{C}$ .

Сопоставление теоретических расчётов, учитывающих все вышеперечисленные факторы, с экспериментальными результатами приводит к предполагаемому физическому ограничению на максимальную толщину переходных слоёв: если они образуются в структурах  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$ , то их толщина не превышает 10 Å.

Теоретически исследованы зависимости коэффициента отражения в максимуме и спектральной ширины контура отражения периодических МЗ от толщины переходного слоя. При увеличении толщины переходного слоя коэффициент отражения в максимуме нелинейно уменьшается, а спектральный контур отражения МЗ немного сужается.

Показано, что в диапазоне  $80 \text{ Å} < \lambda < 120 \text{ Å}$  возможно создание аperiodических МЗ на основе  $\text{Sb}/\text{V}_4\text{C}$  с интегральным коэффициентом отражения  $\sim 1$  Å. Одно из трёх синтезированных АМЗ испытано с использованием лазерно-плазменного источника МР излучения. Отмечается хорошее соответствие между экспериментальными результатами и теоретическим расчётом.

Авторы признательны Н.Н.Салашенко и П.В.Сасорову за плодотворные обсуждения. Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН «Фундаментальная оптическая спектроскопия и её приложения» и Учебно-научного комплекса ФИАН.

1. Кондратенко В.В., Левашов В.Е., Першин Ю.П., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, №7, 32 (2001).
2. Колачевский Н.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **30** (5), 428 (2000).
3. Ragozin E.N., Kondratenko V.V., Levashov V.E., Pershin Yu.P., Pirozhkov A.S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4782**, 176 (2002).
4. Болдарев А.С., Гасилов В.А., Левашов В.Е., Медников К.Н., Пирожков А.С., Пирожкова М.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **34** (7), 679 (2004).
5. Бейгман И.Л., Левашов В.Е., Медников К.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н., Толстихина И.Ю. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1060 (2007).
6. Ragozin E.N., Mednikov K.N., Pertsov A.A., Pirozhkov A.S., Reva A.A., Shestov S.V., Ul'yanov A.S., Vishnyakov E.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7360**, 73600N (2009).
7. Бейгман И.Л., Вишняков Е.А., Лугинин М.С., Рагозин Е.Н., Толстихина И.Ю. *Квантовая электроника*, **40** (6), 545 (2010).
8. Бейгман И.Л., Вишняков Е.А., Лугинин М.С., Рагозин Е.Н., Толстихина И.Ю. *Uzhhorod Univ. Sci. Herald. Ser. Phys.*, **30**, 203 (2011).
9. Капралов В.Г., Корде Р., Левашов В.Е., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **32** (2), 149 (2002).
10. Levashov V.E., Mednikov K.N., Pirozhkov A.S., Ragozin E.N. *Radiat. Phys. Chem.*, **75** (11), 1819 (2006).
11. Левашов В.Е., Медников К.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **36** (6), 549 (2006).
12. Louis E., Khorsand A.R., Sobierajski R., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7361**, 73610I (2009).
13. Бейгман И.Л., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **74** (3), 167 (2001).
14. Beigman I.L., Pirozhkov A.S., Ragozin E.N. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **4**, 433 (2002).
15. Kando M., Pirozhkov A.S., Kawase K., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (23), 235003 (2009).

16. Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Zh., et al. *AIP Conf. Proc.*, **1153**, 274 (2009).
17. Pirozhkov A.S., Kando M., Esirkepov T.Zh., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8140**, 81400A (2011).
18. Артюков И.А., Зеленцов В.В., Крымский К.М. *Препринт ФИАН № 14* (М., 2000).
19. Skulina K.M., Alford C.S., Bionta R.M., Makowiecki D.M., Gullikson E.M., Soufli R., Kortright J.B., Underwood J.H. *Appl. Opt.*, **34** (19), 3727 (1995).
20. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салашенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. *УФН*, **182** (7), 727 (2012).
21. Windt D.L., Donguy S., Seely J., Kjornrattanawanich B., Gullikson E.M., Walton C.C., Golub L., DeLuca E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5168**, 1 (2004).
22. Platonov Yu., Gomez L., Broadway D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4782**, 152 (2002).
23. Andreev S.S., Barysheva M.M., Chkhalo N.I., et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **603**, 80 (2009).
24. Андреев С.С., Барышева М.М., Чхало Н.И. и др. *ЖТФ*, **80** (8), 93 (2010).
25. Вайнер Ю.А., Клюенков Е.Б., Полковников В.Н., Салашенко Н.Н., Стариков С.Д. В сб. докл. конф. «Рентгеновская оптика – 2012» (Черноголовка, 2012, с.92).
26. Platonov Yu., Rodriguez J., Kriese M., Gullikson E., Harada T., Watanabe T., Kinoshita H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8076**, 80760N (2011).
27. Chkhalo N.I., Küstner S., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Schäfers F., Starikov S.D. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 011602 (2013).
28. Вишняков Е.А., Каменец Ф.Ф., Кондратенко В.В., Лугинин М.С., Панченко А.В., Першин Ю.П., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **42** (2), 143 (2012).
29. Вишняков Е.А., Лугинин М.С., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н., Старцев С.А. *Квантовая электроника*, **41** (1), 75 (2011).
30. Житник И.А., Кузин С.В., Митропольский М.М., Рагозин Е.Н., Слемзин В.А., Сухановский В.А. *Квантовая электроника*, **20** (1), 89 (1993).
31. Вишняков Е.А., Медников К.Н., Перцов А.А., Рагозин Е.Н., Рева А.А., Ульянов А.С., Шестов С.В. *Квантовая электроника*, **39** (5), 474 (2009).
32. Gullikson E.M., Underwood J.H., Batson P.C. *J. X-Ray Sci. Technol.*, **3**, 283 (1992).
33. Колачевский Н.Н., Пирожков А.С., Рагозин Е.Н. *Квантовая электроника*, **25** (9), 843 (1998).
34. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *Atom. Data Nucl. Data Tables*, **54** (2), 181 (1993); Soufli R., Gullikson E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3113**, 222 (1997); файлы с уточненными атомными факторами рассеяния доступны на сайте по адресу <[http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)>.
35. Kopylets I.A., Baturin A.A., Mikhailov I.F. *Functional Mater.*, **14** (3), 392 (2007).
36. Considine G.D. *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia* (New York: Wiley, 2008).
37. Ragozin E.N., Kolachevsky N.N., Mitropolsky M.M., Pokrovsky Yu.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3113**, 230 (1997).