

05

## Поиск прочных многослойных композиций свободновисящих фильтров с высоким коэффициентом пропускания в диапазоне длин волн „водного окна“ (2.3–4.4 nm)

© М.М. Барышева, С.А. Гарахин, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, И.В. Малышев, Н.Н. Салащенко, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: tsybin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2022 г.  
В окончательной редакции 11 мая 2022 г.  
Принято к публикации 11 мая 2022 г.

Рассмотрены варианты состава многослойных абсорбционных фильтров с высоким коэффициентом пропускания в спектральной области „водного окна“ (2.3–4.4 nm). Методом создания перепада давления между сторонами свободновисящих пленок на разрыв проведено сравнение по прочности фильтров с толщинами около 100 nm на основе Ti с прослойками из Al, Be, C и на основе V с прослойками из Al. В качестве материала для прослоек рассматривались также Sc и Cr. Среди протестированных многослойных периодических структур наилучшие прочностные характеристики продемонстрировали Ti/Be (при доле Ti в периоде около 0.6) и V/Al (при доле V в периоде около 0.4) фильтры. Несмотря на то что по прочности Ti/Be- и V/Al-фильтры уступают фильтрам из однослойных пленок Ti и V, эти многослойные фильтры могут представлять интерес, так как обладают либо большим коэффициентом пропускания в „окне прозрачности воды“ (Ti/Be), либо существенно более высоким уровнем блокировки видимого излучения (V/Al).

**Ключевые слова:** многослойные свободновисящие фильтры, спектральная область „водного окна“, прочность на разрыв многослойных пленочных фильтров, коэффициент пропускания в мягком рентгеновском диапазоне, уровень блокировки видимого излучения.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52773.126-22

### Введение

Область мягкого рентгеновского (МР) диапазона (диапазон длин волн  $\sim 1-10$  nm) представляет интерес для различных приложений, таких как рентгеновская микроскопия в „окне прозрачности воды“ [1–3], рентгеновская литография на длинах волн короче 13.5 nm [3–5], рентгеновская спектроскопия [6,7].

Для проведения исследований в МР диапазоне необходимы эффективные источники излучения. Такими источниками являются синхротронные источники и рентгеновские лазеры на свободных электронах. Однако в лабораториях для оперативных измерений обычно используются более доступные и компактные плазменные источники — лазерно-плазменные или газоразрядные [6,8–10]. Поскольку плазменные источники имеют широкий спектр излучения, обычно появляется необходимость отфильтровать излучение вне рабочей полосы. Самый простой способ достичь этого в случае, когда рабочие длины волн лежат в МР и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне длин волн, — использовать работающие на просвет свободновисящие абсорбционные пленочные фильтры [10–12]. Подбирая материал и толщину пленочного фильтра, можно добиться необходимого уровня блокировки внеполосного длинновол-

нового излучения при высоком (десятки процентов) коэффициенте пропускания на рабочих длинах волн.

В зависимости от типа плазменного источника, оптической системы и детектора требования, предъявляемые к блокирующим характеристикам пленочных фильтров (диапазоны длин волн, которые требуются подавить, степень их подавления), могут заметно различаться. Так, в случае использования в оптической схеме многослойных зеркальных покрытий обычно требуется высокий уровень блокировки длинноволнового излучения, которое этими зеркалами эффективно отражается (видимый, ближний инфракрасный диапазон).

Для экспериментов в МР диапазоне необходимы пленочные фильтры с как можно более высоким коэффициентом пропускания в рабочем диапазоне, поскольку яркость большинства лабораторных плазменных источников в МР диапазоне длин волн невелика и интенсивности излучения, как правило, не хватает. Проблема осложняется отсутствием в МР диапазоне зеркал нормального падения с высоким коэффициентом отражения. Например, в спектральном диапазоне „водного окна“ (2.3–4.4 nm) достигнутый на сегодняшний момент максимальный коэффициент отражения вблизи нормали составляет величину лишь немного превышающую 20% [13,14].

Высокий коэффициент пропускания требуется и при использовании свободновисящих пленок в качестве держателей для живых биологических образцов. В этом случае влажный образец помещается между двух пленок, что снижает скорость испарения жидкости, но за счет прохода излучения через две пленки увеличиваются потери на рабочих длинах волн. Чаще всего в микроскопии в спектральном диапазоне „водного окна“ с этой целью используются  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -мембраны толщиной 100 nm и коэффициентом пропускания 50–70% за один проход [15]. Как будет показано далее, за счет выбора более прозрачного материала при той же толщине пленки можно достичь коэффициента пропускания до 85%.

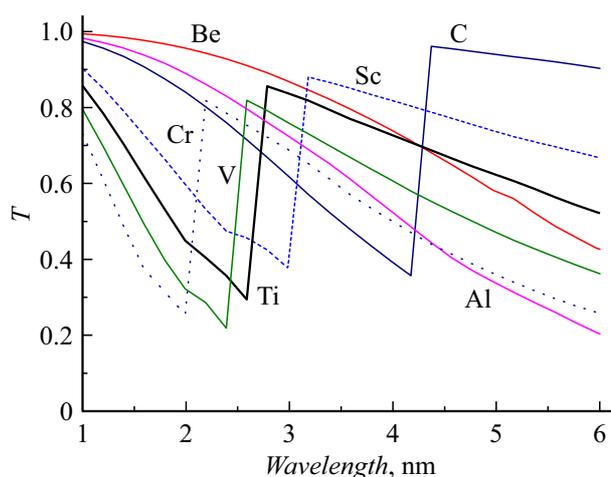
Повысить коэффициент пропускания пленочного фильтра на рабочих длинах волн можно путем уменьшения толщины пленки, однако при этом падает уровень подавления длинноволнового излучения, а также, что может быть более существенно, заметно снижается механическая прочность фильтра (при неизменной апертуре). Пленочные фильтры должны обладать достаточной прочностью, чтобы остаться неповрежденными как в процессе их изготовления, так и при последующих манипуляциях с ними (транспортировка, установка в вакуумный объем, откачка). Определенный уровень прочности требуется, когда пленки используются в качестве рентгеновских окон, разделяющих объемы с разным давлением [16,17], или когда пленки применяются в качестве держателей для биологических образцов в МР-микроскопии [18]. В последнем случае пленка должна быть достаточно прочной, чтобы остаться целой при помещении на нее исследуемого биологического объекта.

Преодолеть указанную выше дилемму в некоторых случаях удается переходом к многослойным периодическим структурам [19], когда в состав пленочного фильтра входит несколько материалов, слои которых чередуются. При той же суммарной толщине многослойная пленочная структура может оказаться прочнее однослойной. Упрочнение может быть вызвано, например, тем, что границы между слоями препятствуют развитию трещин в направлении поперек слоев при растяжении пленки.

Возможна и обратная ситуация, когда многослойные пленки оказываются менее прочными, чем однослойные. Те же межслоевые границы могут быть источниками появления микротрещин, когда упругие характеристики материалов слоев существенно отличаются.

Приведенными здесь механизмами упрочнения или разупрочнения в многослойных пленочных структурах все не исчерпывается, информация об иных возможных механизмах упрочнения приведена, например, в [20,21].

Многослойные структуры могут представлять интерес и по иным соображениям. Подбором второго материала (прослойки) можно улучшить блокирующие свойства пленочного фильтра. Так как от соотношения толщин в периоде многослойной структуры зависит величина внутренних напряжений в напыленной пленке [22], является возможность (при необходимости) подобрать



**Рис. 1.** Расчетные спектры коэффициентов пропускания фильтров толщиной 100 nm из материалов, прозрачных в диапазоне длин волн „водного окна“. Оптические константы взяты с сайта [26].

соотношение толщин так, чтобы минимизировать величину внутренних напряжений. Это важно, так как большие внутренние напряжения могут приводить к деформации и повреждению пленок (например, в процессе их отделения от подложки).

Однако так как невозможно предсказать заранее, какая будет прочность той или иной многослойной структуры, окажутся ли критичными величины внутренних напряжений в пленке, необходимы экспериментальные исследования.

В настоящей работе мы исследовали прочностные и оптические характеристики многослойных фильтров различного состава на основе прозрачных в диапазоне „водного окна“ материалов, в первую очередь, на основе титана. Как видно из расчетного спектра пропускания (рис. 1), титан является одним из прозрачайших материалов в МР диапазоне. Титановые фильтры (обычно толщиной 200 nm) применяются в качестве блокирующих длинноволновое излучение фильтров в плазменных источниках излучения МР диапазона [23,24], в спектрометрах МР диапазона [6,25].

Помимо титана, в диапазоне „водного окна“ интерес могут представлять спектральные фильтры из бериллия, скандия, ванадия, алюминия, хрома (рис. 1). Некоторые варианты многослойных пленочных структур, содержащих эти материалы, также исследованы в настоящей работе.

## 1. Методы исследования

Все пленочные образцы изготавливались на установке магнетронного напыления [3]. Распыление мишеней Ti, Be, Cr, Sc, V, Al и C, а также мишеней Mg или Y при напылении подслоя, проходило в атмосфере аргона при давлении  $7 \cdot 10^{-4}$  Торр. Давление остаточных газов

в вакуумном объеме перед напылением было лучше, чем  $10^{-6}$  Торр. Пленки наносились на кремниевые полированные пластины диаметром 100 мм, равномерность распределения толщин слоев по площади была не хуже 2%. Свободновисящие пленки изготавливались с использованием металлического подслоя (слоя Mg или Y, нанесенного на кремниевую подложку), который растворялся в процессе селективного жидкостного травления (в качестве селективного травителя использовался водный раствор уксусной, азотной или соляной кислоты). Подслой постепенно растворялся от края к центру подложки, подложка опускалась на дно, а пленка оставалась плавать на поверхности травителя. Для предотвращения осаждения паров кислот на поверхность пленки и их проникновения в подслой через поры в пленке, в процессе травления осуществлялся непрерывный обдув воздухом поверхности пленки.

Толщины слоев в многослойных пленках определялись из предварительных калибровок. Для этого проводилось последовательное напыление на кремниевую подложку двух многослойных периодических структур одного состава, но отличающихся толщиной слоев одного из материалов (исследуемого) в периоде. Изменение толщины слоя в периоде происходило за счет изменения скорости прохождения подложки над соответствующей магнетронной мишенью. Полагая, что толщина слоя зависит линейно от времени нахождения подложки над магнетронной мишенью (а значит, обратно пропорциональна скорости равномерного движения подложки), можно, определив периоды обеих многослойных структур по результатам измерений угловой зависимости коэффициента отражения при скользких углах (на дифрактометре PANalitical X'Pert PRO,  $\lambda = 0.154$  nm), вычислить коэффициент обратной пропорциональности между скоростью прохождения подложки над магнетронной мишенью и толщиной напыленного за один проход слоя исследуемого материала.

Дополнительно правильность калибровки проверялась на однородных пленках толщиной 20–30 nm путем сопоставления измеренной зависимости осцилляций коэффициента отражения на длине волны 0.154 nm от угла с расчетной кривой.

Для проведения сравнительного тестирования фильтров на прочность пленки одинакового состава вылавливались на кремниевые полированные рамки с круглым сквозным отверстием диаметром 2.5 mm в центре. Затем образцы последовательно помещались на стенд, на котором между сторонами пленки за счет постепенной откачки воздуха с одной стороны создавался перепад давления, и с помощью механического манометра ВП4-УУ2 (цена деления — 0.01 atm) измерялся предельный перепад, при котором пленочные образцы разрывались. Так как величина перепада, при котором происходит разрыв, зависит в том числе от наличия дефектов в свободновисящей пленке (проколы, складки и т.п.), проводилось несколько (6–12) испытаний, а результаты усреднялись.

Для измерения коэффициентов пропускания в видимом и МР диапазонах длин волн пленки вылавливались на кремниевые рамки с отверстием диаметром 8–10 mm. Измерение коэффициентов пропускания на длине волны 633 nm (красный свет) проводилось на стенде с использованием He–Ne-лазера (ЛГН-207А) и фотодиода ФД-24К с регулируемым усилителем сигнала. Относительная погрешность измерения коэффициента пропускания — 10%.

Спектральные измерения коэффициентов пропускания в МР диапазоне длин волн проводились на лабораторном рефлектометре [12], в состав которого входят рентгеновская трубка со сменными анодами, спектрометр-монокроматор РСМ-500 и приемник (фотокатод из CsI). В качестве анодов использовались титан и углерод с линиями излучения  $\lambda = 3.14$  и 4.47 nm соответственно.

## 2. Результаты

Для сравнительных исследований были изготовлены пленки с суммарной толщиной слоев около 100 nm. Фильтры такой толщины позволяют получить высокий, более 70%, коэффициент пропускания в спектральном диапазоне „водного окна“ при достаточно высоком уровне подавления видимого излучения (лучше, чем  $10^3$ ).

Тут следует отметить, что правильнее было бы сравнивать по прочности пленочные фильтры разного состава, имеющие близкие по величине коэффициенты пропускания в рабочем (МР) диапазоне длин волн (в этом случае их толщины могут заметно отличаться). Однако на начальном этапе, когда рассматривается множество различных вариантов структур и выявляются наиболее прочные, более простое в реализации, хоть и не совсем корректное сравнение пленочных фильтров одинаковой толщины представляется приемлемым.

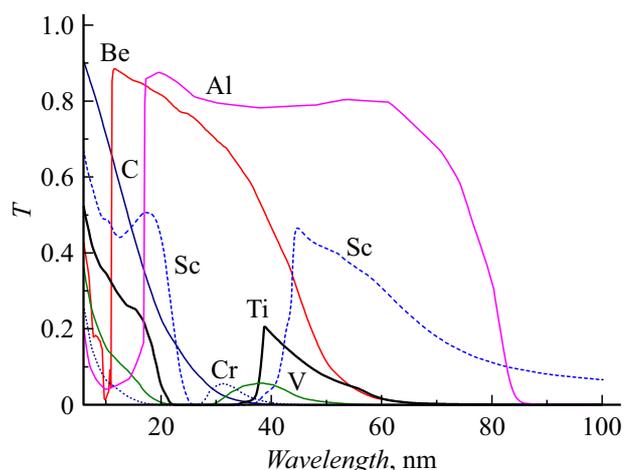
В качестве прослоек к титановым фильтрам были предложены бериллий, алюминий и углерод. Материалы прослоек были выбраны из следующих соображений. Бериллий при той же толщине более прозрачен в спектральном диапазоне „водного окна“, чем титан (рис. 1), и замещение титана бериллием увеличивает прозрачность фильтра. Введение в Ti-содержащий фильтр слоев алюминия улучшает его блокирующие свойства в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Прослойки из углерода интересны тем, что их наличие снижает прозрачность фильтра в ЭУФ диапазоне, в том числе в полосе пропускания титана в диапазоне длин волн 38–60 nm (рис. 2). Наличие этой полосы в спектре пропускания фильтра может быть нежелательным.

В табл. 1 приведены результаты тестирования Ti/Be-, Ti/Al- и Ti/C-многослойных структур с различным соотношением толщин в периоде. Помимо структуры пленок и их толщин ( $H$ ), количества протестированных пленочных образцов ( $N$ ) и среднего перепада давления на разрыв ( $\langle \Delta p \rangle$ ), в таблице приводятся также величины

**Таблица 1.** Усредненный по  $N$  попыткам предельный перепад давления ( $\langle \Delta p \rangle$ ) между сторонами пленки толщиной  $H$ , при которых пленка повреждается

Структура, nm	$H$ , nm	$N$	$\langle \Delta p \rangle$ , atm	$\sigma$ , atm	$\Delta p_{\max}$ , atm	$T$ (633 nm)
(Ti–3.1/Be–1.05)×25	103.75	9	0.08	0.02	0.11	–
(Ti–3.1/Be–2.1)×20	104.0	10	0.165	0.057	0.24	$4.1 \cdot 10^{-4}$
(Ti–2.05/Be–3.15)×20	104.0	11	0.12	0.09	0.40	$5.7 \cdot 10^{-4}$
(Ti–1.3/Be–3.9)×20	104.0	11	0.12	0.032	0.19	$8.4 \cdot 10^{-4}$
(Ti–4.1/Al–1.05)×20	103.0	9	0.08	0.042	0.18	$1.3 \cdot 10^{-4}$
(Ti–3.1/Al–2.1)×20	104.0	10	0.085	0.059	0.19	$3.8 \cdot 10^{-5}$
(Ti–2.05/Al–3.1)×20	103.0	9	0.07	0.025	0.12	$2.1 \cdot 10^{-5}$
(Ti–1.3/Al–3.85)×20	103.0	8	0.075	0.016	0.10	$5.4 \cdot 10^{-6}$
(Ti–2.05/C–3.1)×20	103.0	5	0.02	0.019	0.06	–
(Ti–3.1/C–1.95)×20	101.0	8	0.035	0.024	0.09	$4.4 \cdot 10^{-3}$
Ti–103	103.0	11	0.2	0.063	0.26	$2.5 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Диаметр отверстия в кремниевой рамке 2.5 mm,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение,  $\Delta p_{\max}$  — максимальный перепад давления среди  $N$  попыток.  $T$  (633 nm) — коэффициент пропускания фильтра, измеренный на длине волны 633 nm.

**Рис. 2.** Расчетные спектры коэффициентов пропускания фильтров толщиной 100 nm в ЭУФ диапазоне длин волн. Оптические константы взяты с сайта [26].

среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ), максимальный перепад давления на разрыв среди всех испытаний данной структуры ( $\Delta p_{\max}$ ) и измеренные коэффициенты пропускания фильтров на длине волны 633 nm.

Как уже отмечалось, на предельную величину перепада давления, при котором происходит разрыв пленки, существенное влияние оказывают микроскопические дефекты в пленках (например, проколы, появляющиеся на этапе отделения пленки от подложки или вызванные проникновением с поверхности паров кислот через поверхность пленки и высвобождением водорода в процессе их взаимодействия с подслоем). Помимо

дефектности самой пленки, на величину разброса могут оказывать влияние неоднородность распределения материала пленки по апертуре отверстия, особенности кромки отверстий и т.п. Так как нас интересует прочность пленочного фильтра, которая определяется как прочностью материала пленки, так и присутствующими в ней дефектами, в качестве критерия для сравнения мы используем усредненный по нескольким испытаниям перепад давления на разрыв. С учетом того что максимальный перепад давления выдерживают пленки с минимальным количеством дефектов, величины максимального перепада давления на разрыв ( $\Delta p_{\max}$ ) должны быть пропорциональны (приблизительно, так как количество попыток ограничено, а кроме того, для разного состава пленок величина прогиба может отличаться) напряжению на разрыв в пленках данного состава.

Из табл. 1 видно, что наименее прочными являются многослойные фильтры Ti/C. Связано это предположительно с высокой хрупкостью слоев углерода. Также на прочность, вероятно, оказывают влияние большие внутренние напряжения в этих структурах (большие внутренние напряжения могут приводить к появлению микротрещин и разрывов). По-видимому, именно вследствие больших внутренних напряжений не удалось изготовить свободновисящие (Ti–4.1 nm/C–0.95 nm)×20 многослойные пленки с толщиной углеродных слоев в период около 1 nm (пленки в процессе растворения подслоя сворачивались и рассыпались).

Ti/Al-структуры продемонстрировали несколько лучший результат по сравнению с Ti/C. Отметим, что в паре Ti/Al средний перепад давления на разрыв слабо зависит от соотношения слоев в структуре (табл. 1). Не исключено, что такое поведение может быть обусловлено суще-

**Таблица 2.** Усредненный по  $N$  попыткам предельный перепад давления ( $\langle \Delta p \rangle$ ) между сторонами пленки толщиной  $H$ , при которых пленка повреждается

Структура, nm	$H$ , nm	$N$	$\langle \Delta p \rangle$ , atm	$\sigma$ , atm	$\Delta p_{\max}$ , atm	$T$ (633 nm)
(Ti–3/Sc–2)×20, Ti–2	102.0	6	0.087	0.077	0.24	$4.2 \cdot 10^{-4}$
Ti–3, (Cr–1.95/Ti–3)×20	102.0	–	–	–	–	–
Cr–100.6	100.6	6	0.153	0.106	0.28	$9.5 \cdot 10^{-6}$
(V–1/Al–4.02)×20	100.4	9	0.10	0.036	0.16	–
(V–2/Al–3)×20	100.0	10	0.163	0.087	0.38	$1.6 \cdot 10^{-5}$
(V–3/Al–2)×20	100.0	7	0.136	0.071	0.27	$4.2 \cdot 10^{-5}$
(V–3.97/Al–1)×20	99.4	6	0.127	0.048	0.17	$2.0 \cdot 10^{-4}$
V–110	110.0	11	0.213	0.092	0.40	$2.0 \cdot 10^{-4}$
Al–150	150.0	26	0.057	0.03	0.12	–
Be–150	150.0	11	0.092	0.069	0.24	–

Примечание. Диаметр отверстия в кремниевой рамке 2.5 mm,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение,  $\Delta p_{\max}$  — максимальный перепад давления среди  $N$  попыток.  $T$  (633 nm) — коэффициент пропускания фильтра, измеренный на длине волны 633 nm.

ственным влиянием на прочность межслоевых границ. Тем не менее с ростом содержания титана прочность самих Ti/Al-пленок несколько возрастает, если судить по значениям максимальных перепадов на разрыв.

Наибольшую прочность из рассмотренных многослойных вариантов продемонстрировали фильтры Ti/Be при доле толщины Ti в периоде около 0.6. С уменьшением доли титана в периоде прочность фильтра падает, что, вероятно, объясняется увеличением объема хрупкого бериллия. Однако и с уменьшением толщины слоев бериллия прочность Ti/Be-фильтров также снижается. Причины этого остаются неясными, но не исключено, что, как и в случае с прослойками углерода, при толщинах прослойки Be, близкой к 1 nm, возрастают внутренние напряжения в пленке.

Несколько неожиданный результат показал фильтр из однородной пленки титана, снятый с Y-подслоя, который при той же толщине оказался прочнее всех протестированных вариантов многослойных Ti-содержащих фильтров.

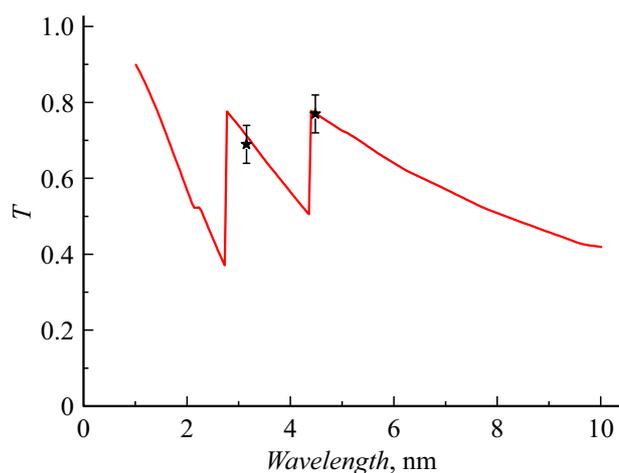
С точки зрения наименьшего коэффициента пропускания на красном свете, как и ожидалось, лучшими являются фильтры Ti/Al с большой долей содержания Al. Ti/C-фильтры наименее эффективны с точки зрения блокировки видимого излучения вследствие прозрачности слоев C. Ti- и Ti/Be-фильтры демонстрируют промежуточные результаты, обеспечивая при толщине около 100 nm снижение интенсивности прошедшего света в видимом диапазоне более чем в 1000 раз.

Помимо бериллия, другим материалом, который по расчету (рис. 1) имеет меньший коэффициент поглощения, чем титан, является скандий (на длинах волн за  $L_{2,3}$  краем поглощения ( $\lambda > 3.15$  nm)). Но у скандия имеется существенный недостаток — высокая химическая

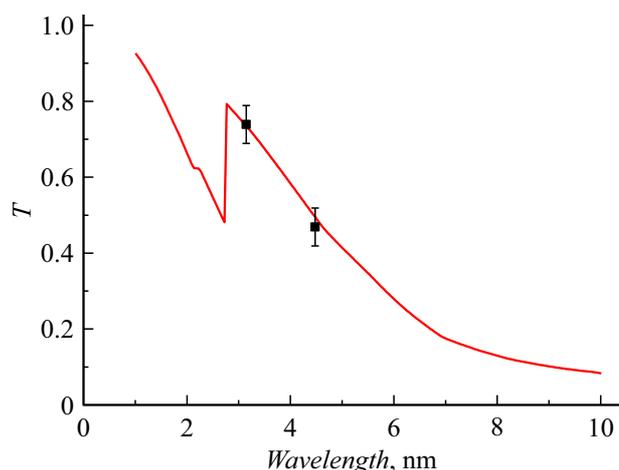
активность, что не позволяет с помощью имеющейся технологии (с использованием металлического подслоя) изготовить однородные Sc-пленки. Тем не менее если прославить Sc химически более стойким материалом, то при небольших долях содержания скандия в периоде оказывается возможным изготовить многослойную Sc-содержащую пленочную структуру. В частности, нам удалось изготовить образцы (Ti–3 nm/Sc–2 nm)×20 многослойного фильтра. Как видно из табл. 2, Ti/Sc-фильтр демонстрирует сравнительно невысокую механическую прочность. Наличие на Ti/Sc-пленках областей с проколами свидетельствует о том, что отчасти невысокая прочность может быть связана с частичным протравливанием слоев скандия в процессе растворения подслоя.

Была предпринята попытка изготовления Cr/Ti-многослойного фильтра с толщиной слоев хрома около 2 nm. Эта пленочная структура сворачивалась и разрушалась в процессе отделения пленки от подложки, что, по-видимому, вызвано большими внутренними напряжениями в Cr/Ti-пленке и хрупкостью слоев Cr. На сравнительно высокую хрупкость пленок хрома указывает и наличие трещин по краям образца, наблюдающихся при изготовлении фильтров из однородной пленки Cr толщиной около 100 nm. Несмотря на наличие трещин, удалось изготовить небольшие по апертуре тестовые образцы из Cr и провести испытания (табл. 2). Отметим, что фильтры из хрома при той же толщине лучше подавляют излучение на длине волны 633 nm, чем фильтры из титана.

Интересные результаты были получены на V-содержащих фильтрах. Как и титан, ванадий — довольно пластичный металл. Как видно из табл. 2, V/Al-многослойные фильтры показывают наибольшую проч-



**Рис. 3.** Расчетный спектр пропускания (сплошная линия) и измеренные (звездочки) на длинах волн 3.14 и 4.47 nm величины коэффициента пропускания (Ti–3.1 nm/C–1.95 nm)×20 фильтра на лабораторном рефлектометре.



**Рис. 4.** Расчетный спектр пропускания (сплошная линия) и измеренные (квадраты) на длинах волн 3.14 и 4.47 nm величины коэффициента пропускания (Ti–2.1 nm/Al–3.1 nm)×20 фильтра на лабораторном рефлектометре.

ность при доле ванадия в периоде около 0.4. По прочности на разрыв такие фильтры сравнимы с лучшими Ti/Be-фильтрами. Тем не менее более прочными (как и в случае с титаном) оказались однородные пленки ванадия сравнимой толщины, снятые с Y-подслоя.

В табл. 2 для сравнения приведены полученные ранее данные тестирования на прочность однородных фильтров Al и Be толщиной 150 nm. Как видно, даже при большей в полтора раза толщине, их прочность на разрыв в целом уступает прочности большинства рассматриваемых здесь фильтров, в том числе Ti/Be и V/Al. К недостаткам фильтров из Be и Al можно отнести и высокую прозрачность в полосе пропускания в ЭУФ диапазоне (рис. 2).

Для нескольких пленочных структур были проведены измерения коэффициентов пропускания фильтров на некоторых длинах волн в МР диапазоне. Как видно из рис. 3 и 4, измеренные в спектральном диапазоне „водного окна“ значения коэффициентов пропускания Ti/C- и Ti/Al-фильтров близки к расчетным. Этого можно было ожидать, так как обычно присутствующие в пленке примеси (кислород в виде окислов или углерод в виде углеводородных загрязнений) почти не оказывают влияния на коэффициент пропускания фильтра в этой области спектра.

## Заключение

В работе мы рассмотрели некоторые варианты состава многослойных пленочных фильтров толщиной около 100 nm с высоким коэффициентом пропускания в спектральном диапазоне „водного окна“ (2.3–4.4 nm). Основное внимание уделялось прочности фильтров на разрыв и их блокирующим свойствам в видимом диапазоне длин волн. С точки зрения механической прочности, наилучший результат среди протестированных структур показали фильтры из однородных пленок титана и ванадия. С учетом того что по расчету коэффициенты пропускания пленки ванадия толщиной 100 nm и пленки титана толщиной 160 nm близки в МР диапазоне, титановые фильтры (с точки зрения прочности и блокирующих свойств) выглядят предпочтительнее. Фильтры из ванадия могут представлять интерес в случае, если необходимо пропустить (в том числе) излучение в диапазоне длин волн между краями поглощения ванадия и титана (в диапазоне длин волн 2.5–2.75 nm).

Среди многослойных фильтров высокую прочность на разрыв продемонстрировали Ti/Be с долей титана в периоде около 0.6 и V/Al с долей ванадия в периоде около 0.4. Ti/Be-фильтры при толщине 100 nm имеют в спектральном диапазоне „водного окна“ более высокий расчетный коэффициент пропускания, чем V/Al (65–85% против 45–75%), однако уступают последним по степени блокировки света в видимом диапазоне ( $4.1 \cdot 10^{-4}$  против  $1.6 \cdot 10^{-5}$ ). Отметим, что обе структуры имеют недостаток, связанный с наличием полосы пропускания в ЭУФ диапазоне с расчетным коэффициентом пропускания, достигающим 20%.

По сравнению с фильтрами из однородных пленок Ti и V той же толщины, многослойные Ti/Be-фильтры имеют более высокий расчетный коэффициент пропускания в спектральной области „водного окна“, а многослойный V/Al-фильтр — лучшую степень подавления излучения в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн.

Из рассмотренных материалов для фильтров высокими блокирующими свойствами в оптическом диапазоне длин волн обладают алюминий и (в меньшей степени) хром. Однако однородные пленки алюминия непрочны, а хрома — довольно хрупки, поэтому эти материалы предпочтительней использовать в качестве прослоек.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института физики микроструктур РАН (№ 0030-2021-0022) с использованием оборудования центра коллективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ Института физики микроструктур РАН при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00364).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Kördel, A. Dehlinger, C. Seim, U. Vogt, E. Fogelqvist, J.A. Sellberg, H. Stiel, H.M. Hertz. *Optica*, **7** (6), 658 (2020). DOI: 10.1364/OPTICA.393014
- [2] C. Jacobsen. *Trends in Cell Biology*, **9** (2), 44 (1999). DOI: 10.1016/S0962-8924(98)01424-X
- [3] А.Д. Ахсаляян, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, М.Н. Торопов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, А.В. Щербаков. *Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед.*, **1**, 5 (2017). DOI: 10.7868/S0207352817010048 [A.D. Akhsakhalyan, E.B. Kluevnikov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo, A.V. Shcherbakov. *J. Surf. Investig. X-ray Synchrotron and Neutron Techniq.*, **11** (1), 1 (2017). DOI: 10.1134/S1027451017010049]
- [4] G. Tallents, E. Wagenaars, G. Pertv. *Nature Photon.*, **4**, 809 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2010.277
- [5] I.A. Makhotkin, E. Zoethout, R. van de Kruijs, S.N. Yakunin, E. Louis, A. Yakunin, V. Banine, S. Müllender, F. Bijkerk. *Opt. Express*, **21**, 29894 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.029894
- [6] P. Wachulak, M. Duda, A. Bartnik, Ł. Wegrzynski, T. Fok, H. Fiedorowicz. *APL Photon.*, **4**, 030807 (2019). DOI: 10.1063/1.5085810
- [7] M. Giorgetti. *ISRN Mater. Sci.*, **2013**, 1 (2013). DOI: 10.1155/2013/938625
- [8] H. Legall, G. Blobel, H. Stiel, W. Sandner, C. Seim, P. Takman, D. Esser. *Opt. Express*, **20** (16), 18362 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.018362
- [9] M. Benk, K. Bergmann, D. Schäfer, T. Wilhein. *Opt. Lett.*, **33** (20), 2359 (2008). DOI: 10.1364/OL.33.002359
- [10] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 063103 (2020). DOI: 10.1063/1.5144489
- [11] T. Harada, T. Hatano, J. *Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **144–147**, 1075 (2005). DOI: 10.1016/j.elspec.2005.01.042
- [12] Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, Н.Н. Салашченко, Н.Н. Цыбин. *Квант. электрон.*, **43** (4), 388 (2013). [E.B. Klyuenkov, A.Ya. Lopatin, V.I. Luchin, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin. *Quant. Electron.*, **43** (4), 388 (2013). DOI: 10.1070/QE2013v043n04ABEH015130]
- [13] C. Burcklen, S. de Rossi, E. Meltchakov, D. Dennetière, B. Capitanio, F. Polack, F. Delmotte. *Opt. Lett.*, **42** (10), 1927 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.001927
- [14] В.Н. Полковников, С.А. Гарахин, Д.С. Квашенников, И.В. Малышев, Н.Н. Салашченко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **90** (11), 1893 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49980.143-20 [V.N. Polkovnikov, S.A. Garakhin, D.S. Kvashennikov, I.V. Malyshev, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, R.M. Smerdin, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **65**, 1809 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110225]
- [15] K.-W. Kim, K.-Y. Nam, Y.-M. Kwon, S.-T. Shim, K.-G. Kim, K.-H. Yoon. *J. Opt. Soc. Korea*, **7**, 230 (2003). DOI: 10.3807/JOSK.2003.7.4.230
- [16] S. Huebner, N. Miyakawa, S. Kapsner, A. Pahlke, F. Kreupl. *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, **62** (2), 588 (2015). DOI: 10.1109/TNS.2015.2396116
- [17] R.T. Perkins, D.D. Allred, L.V. Knight, J.M. Thorne. *Proc. SPIE*, **1160**, 56 (1989). DOI: 10.1117/12.962627
- [18] S. Schreck, G. Gavrila, C. Weniger, P. Wernet. *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 103101 (2011). DOI: 10.1063/1.3644192
- [19] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, E.B. Kluevnikov, A.Y. Lopatin, V.I. Luchin, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, L.A. Shmaenok, N.N. Tsybin, S.Y. Zuev. *Proc. SPIE*, **7025**, 702502 (2008). DOI: 10.1117/12.802347
- [20] K. Gao, X. Zhang, B. Liu, J. He, J. Feng, P. Ji, W. Fang, F. Yin. *Metal Composites: A Rev. Metals*, **10** (1), 4 (2019). DOI: 10.3390/met10010004
- [21] M. Huang, C. Xu, G. Fan, E. Maawad, W. Gan, L. Geng, F. Lin, G. Tang, H. Wu, Y. Du, D. Li, K. Miao, T. Zhang, X. Yang, Y. Xia, G. Cao, H. Kang, T. Wang, T. Xiao, H. Xie. *Acta Mater.*, **153**, 235 (2018). DOI: 10.1016/j.actamat.2018.05.005
- [22] E. Zoethout, G. Sipos, R.W.E. van de Kruijs, A.E. Yakshin, E. Louis, S. Müllender, F. Bijkerk. *Proc. SPIE*, **5037**, 872 (2003). DOI: 10.1117/12.490138
- [23] K.W. Kim, Y. Kwon, K.Y. Nam, J.H. Lim, K.G. Kim, K.S. Chon, B.H. Kim, D.E. Kim, J. Kim, B.N. Ahn, H.J. Shin, S. Rah, K.-H. Kim, J.S. Chae, D.G. Gweon, D.W. Kang, S.H. Kang, J.Y. Min, K.-S. Choi, S.E. Yoon, E.-A Kim, Y. Namba, K.-H. Yoon. *Phys. Med. Biol.*, **51** (6), N99 (2006). DOI: 10.1088/0031-9155/51/6/N01
- [24] M.G. Ayele, P.W. Wachulak, J. Czwartos, D. Adjei, A. Bartnik, Ł. Wegrzynski, M. Szczurek, L. Pina, H. Fiedorowicz. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **411**, 35 (2017). DOI: 10.1016/j.nimb.2017.03.082
- [25] L. Didkovsky, D. Judge, S. Wieman, T. Woods, A. Jones. *Sol. Phys.*, **275**, 179 (2012). DOI: 10.1007/s11207-009-9485-8
- [26] [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://henke.lbl.gov/optical\\_constants/filter2.html](https://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html)