

07

Разработка свободных оптических фильтров на область спектра 12–15 нм для источника излучения нанолитографа

© В.П. Белик, Ю.М. Задиранов, Н.Д. Ильинская, А.В. Корляков,
В.В. Лучинин, М.А. Маркосов, Р.П. Сейсян, Э.М. Шер

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: aisor@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 декабря 2006 г.

Получены образцы оптических фильтров в виде свободных многослойных пленок на область спектра 12–15 нм для источника излучения нанолитографа. Разработана методика создания таких фильтров.

PACS: 42.79.Ci, 78.20.-e, 81.15.-z

Создание оптических фильтров излучения на область спектра (13.5 ± 0.2) нм является одной из обязательных составляющих современных проектов нанолитографии СБИС [1]. Оптическая схема нанолитографа базируется на многослойных Mo–Si зеркалах, которые, формируя пучок излучения, одновременно являются диспергирующим элементом, выделяющим из широкодиапазонного спектра источника (обычно это лазерная плазма) длину волны 13.5 нм со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda = (25-20)$. Однако в длинноволновой области спектра такие зеркала отражают неселективно [2], как обычные зеркальные поверхности (см. рис. 1), и вот это паразитное для нанолитографии излучение ($\lambda \gg 13.5$ нм) требуется подавлять оптическим фильтром. При этом фильтр должен иметь эффективное окно пропускания в области $\lambda = 13.5$ нм.

Получение фильтра на указанную область спектра связано со значительными трудностями. Имеется лишь крайне ограниченное число химических элементов и их соединений, это три металла — Zr, Nb, Mo. К ним можно добавить Si, Si₃N₄, SiC. Однако материалы на основе кремния прозрачны в видимой области спектра и могут быть использованы в качестве требуемых фильтров только в комбинации

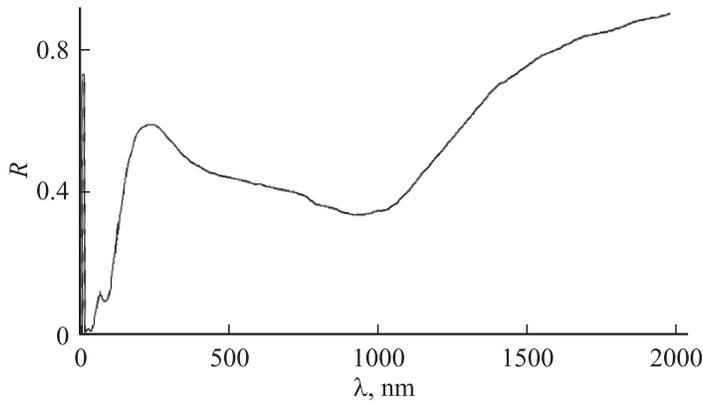


Рис. 1. График коэффициента отражения многослойного Mo/Si рентгеновского зеркала (40 слоев) [2].

с приведенными выше тремя металлами (рис. 2). Толщина фильтров должна быть в пределах 80–200 nm, чтобы получить коэффициент пропускания фильтра $\approx (70-30)\%$ на длине волны 13.5 nm. Получить свободные пленки такой толщины требуемой площади (от нескольких mm^2 до 1–2 cm^2) и достаточной механической прочности — непростая физико-техническая задача.

В рамках проводимой в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН работы по созданию экспериментального нанолитографа авторами разработана методика получения фильтров на область спектра 12–15 nm и измерены их коэффициенты пропускания.

Наши первые попытки получить свободные пленки из Zr, Nb, Mo методом магнетронного и лазерного испарения на органическую или солевую (водорастворимую) подложку с последующим снятием пленки в растворителе и осаждением ее на поддерживающую сетку не привели к положительным результатам. При напылении в пленке образовывались внутренние напряжения, и после осаждения на сетку малейшие механические воздействия приводили к трещинам и последующему разрушению фильтра. В процессе дальнейших поисков подходящей методики мы остановились на двух вариантах получения свободных пленок-фильтров.

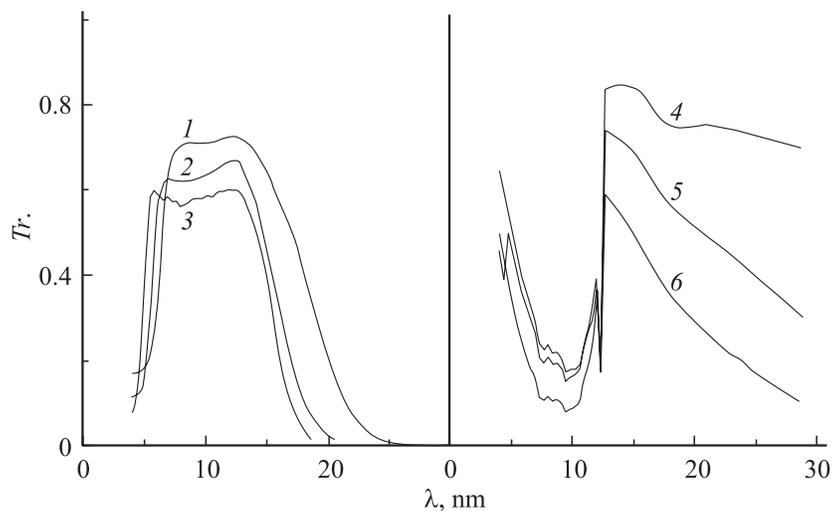


Рис. 2. Теоретические значения пропускания пленок толщиной 100 nm: 1 — Zr, 2 — Nb, 3 — Mo, 4 — Si, 5 — SiC, 6 — Si₃N₄ [3].

В одном варианте внимание было обращено на пленки из соединений кремния. Было отмечено, что очень хорошей механической прочностью обладают тонкие мембраны из нитрида кремния Si₃N₄ и карбида кремния SiC [4]. Техника получения таких мембран хорошо освоена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ), где и была заказана партия пленок из нитрида кремния. Такая пленка получалась на кремниевой пластине толщиной 0.3 mm, поверхность которой предварительно окислялась. Пленка Si₃N₄ формировалась на поверхности кремниевой подложки из газовой фазы в результате химической реакции силена (SiH₄) с аммиаком (NH₃). Далее, методом фотолитографии слой кремния требуемой площади вытравлялся. В результате получалась свободная пленка нитрида кремния на рамке из кремниевой пластины. Площадь свободной пленки составляла (для изготовленной партии) 3 × 3 mm², а общий размер фильтра — 5 × 5 mm. Толщина пленки составляла 110–130 nm, более точно толщина определялась, как будет сказано ниже, по измерению коэффициента пропускания пленки. Пленка показала хорошую устой-

чивость к механическим воздействиям (при разумных манипуляциях с ней в процессе исследований, включая перепады давления при вакуумной откачке измерительного стенда), неизменность оптических и физических характеристик при длительном (более года) хранении в атмосферных условиях. Поскольку пленка из нитрида кремния прозрачна для видимого спектрального диапазона, следующим шагом было нанесение на нее слоя циркония толщиной примерно 100 nm.

Для этого использовалась установка магнетронного распыления Microvac 450 СВ, изготовленная в Англии фирмой Ion Tech Ltd по выбранной в ФТИ РАН технологической схеме. Установка содержит 3 магнетрона, имеющих минимальный диаметр (2 см) из всех известных магнетронов, их питание производится высокочастотным или постоянным током. Рабочая камера откачивалась крионасосом. Температура криопанели снижалась до ~ 14 К сжатым гелием, поступающим от встроенной в установку He-станции. Таким образом в рабочей камере обеспечивался вакуум 10^{-6} – 10^{-7} mbar. Затем камера заполнялась аргоном до давления 10^{-3} – $5 \cdot 10^{-2}$ mbar. Парциальное давление аргона и скорость его потока сквозь камеру устанавливались и стабилизировались электронным блоком газового питания и регулируемой заслонкой сопротивления газовому потоку.

Существенные особенности использованной технологической схемы, в частности, состоят в том, что установка:

1. Обеспечивает очистку поверхности пленки нитрида кремния Si_3N_4 непосредственно перед напылением на нее пленки циркония. Для этого в установке имеются два источника быстрых нейтральных (атомарных) частиц, выполняющих также модификацию структуры растущей пленки.

2. Имеет специальное устройство, которое осуществляет возвратно-поступательное перемещение (сканирование) прикрепленного к нему напыляемого образца (пленки нитрида кремния). Это перемещение ведется в направлении, перпендикулярном направлению потока распыляемого материала циркониевой мишени, совершая за время нанесения пленки несколько тысяч проходов. Благодаря этому обеспечивалась существенная однородность Zr пленки по толщине и поверхности.

Другой вариант получения оптического фильтра на требуемую область спектра основан на создании многослойной структуры из кремния и одного из металлов (Zr, Nb) с целью повышения прочности получаемой структуры, уменьшения внутренних напряжений. Основным требованием, с точки зрения оптики, для такой многослойной структу-

ры должно быть условие, чтобы период структуры d (сумма толщин слоя Nb (или Zr) и слоя Si) существенно отличался от его значения при условии брэгговского отражения:

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

где n — порядок спектра (в нашем случае $n = 1$), $\lambda = 13.5$ nm, θ — угол между направлением падения излучения и поверхностью фильтра (в нашем случае нормального падения излучения на фильтр $\theta = 90^\circ$). Исходя из этого, период структуры многослойного фильтра излучения должен значительно отличаться от величины $\lambda/2$, т. е. от ~ 6.7 nm.

Для напыления многослойной Nb/Si структуры фильтра использовалась установка магнетронного распыления BAS 450, включающая в себя два ДС-магнетрона и два RF-магнетрона с размерами мишени 250×125 mm. Распыление мишени из ниобия производилось на ДС-магнетроне при подаваемой мощности 0.5 kW, а кремниевой мишени на RF-магнетроне при подаваемой мощности 1.5 kW. Распыление происходило в среде аргона при давлении в камере $(2 - 4) \cdot 10^{-3}$ mbar. Толщина слоев многослойной структуры и ее общая толщина определялись временем прохождения подложки мимо мишени и количеством таких проходов. Такая технология получения многослойных структур достаточно изучена при создании зеркал в рентгеновской оптике. Они представляют собой чередующиеся слои аморфного кремния и поликристаллического ниобия, внутренние напряжения в которых зависят как от толщины отдельных слоев, так и от соотношения толщины ниобия и периода структуры. При выборе толщин слоев мы исходили из необходимости минимизировать внутренние напряжения для получения прочной пленки. Обычно такие пленки приклеивают к поддерживающей сетке после отделения от подложки. Мы использовали другую технологию получения свободных пленок. На подложке GaAs с нанесенной многослойной структурой методом фотолитографии формировался рисунок шестигранной сетки, обрамленной широкой шестигранной рамкой. Далее напылялось золото с адгезионным подслоем хрома. Далее методом гальванического осаждения проводилось усиление сетки до толщины $3 \mu\text{m}$ и толщины рамки до $30 \mu\text{m}$. Затем структура приклеивалась к предметному стеклу воском и методом химического травления в аммиачном травителе удалялась подложка GaAs. Отделение готового фильтра от стекла производилось растворением воска CCL4. Были получены образцы фильтров площадью от 9 mm^2 до $\sim 1 \text{ cm}^2$.

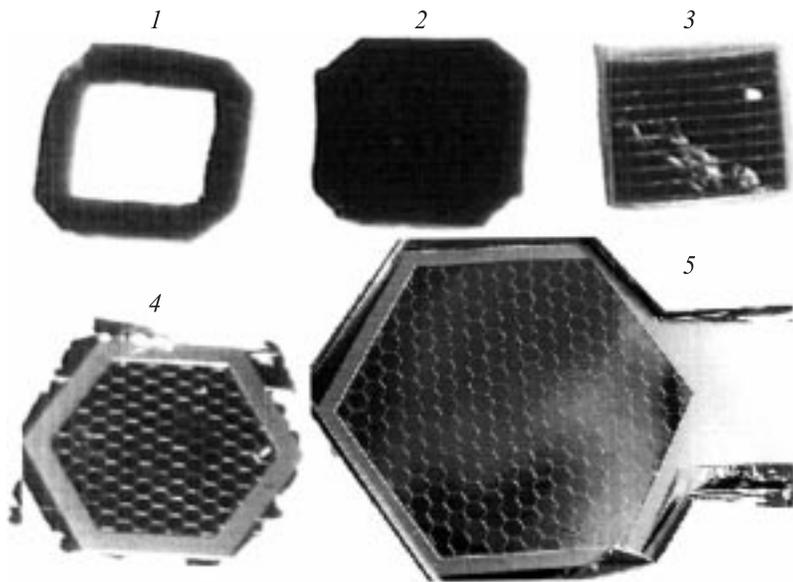


Рис. 3. Фотографии фильтров: 1 — фильтр Si_3N_4 толщиной 110 nm на рамке из кремния толщиной 0; 3 mm; 2 — этот же фильтр (Si_3N_4) с нанесенным слоем Zr толщиной 100 nm; 3, 4, 5 — образцы многослойных Nb(Zr)–Si фильтров с рамкой и укрепляющей сеткой из золота.

Общая толщина фильтров варьировалась от 120 до 240 nm, число слоев — от 15 до 30. Механическая прочность фильтров оказалась значительно лучше, чем для монослойных фильтров, они выдерживали все манипуляции при их исследовании и при использовании их в измерениях на экспериментальном нанолитографе. На рис. 3 приведена фотография образцов фильтров, полученных и исследованных авторами.

Спектральная зависимость коэффициента пропускания фильтров исследовалась на рентгеновском спектрометре-монокроматоре РСМ-500 с рабочей областью спектра 1–55 nm. Измерения проводились с использованием тормозного спектра вольфрамового анода со спектральным разрешением 0.1 nm. При обработке результатов измерений учитывался вклад высших порядков дифракции (второго и третьего). Соотношение распределения интенсивности излучения в разные порядки дифракции

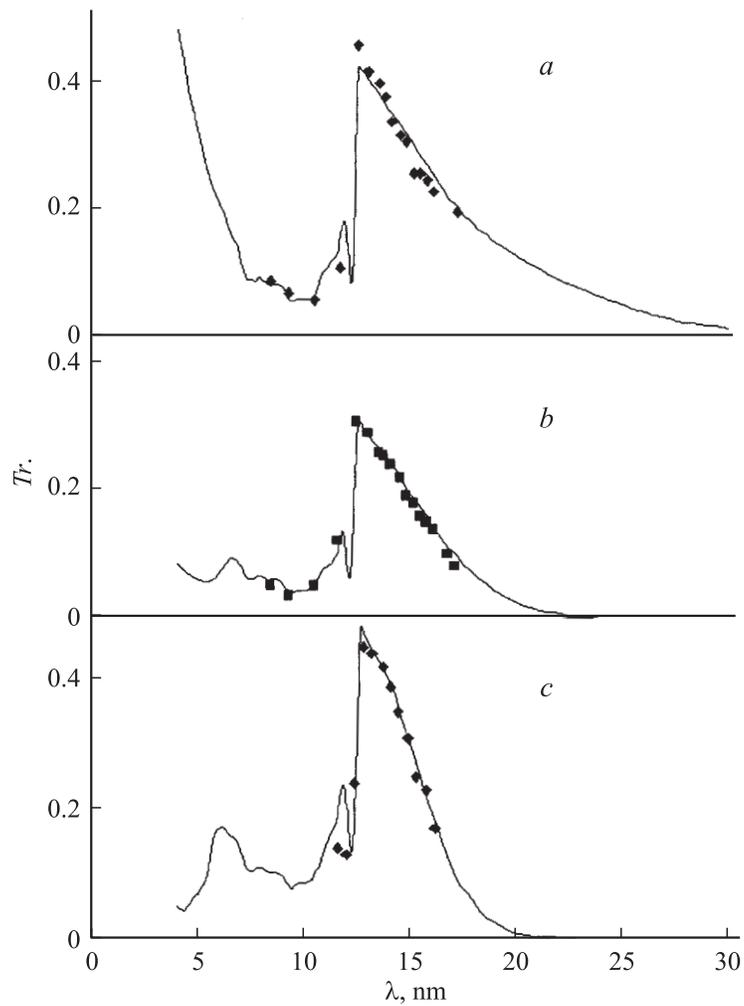


Рис. 4. Экспериментальные значения пропускания пленок: *a* — Si_3N_4 (толщина пленки, оцененная из данных измерений, составила 110 nm), *b* — Si_3N_4 толщиной 110 nm с нанесенным слоем Zr толщиной — 100 nm, *c* — многослойной (20 пар) Si–Nb с толщиной одного слоя каждого элемента ~ 6 nm. Сплошные кривые — расчетное значение пропускания пленок указанных толщин [3].

определялось по излучению K_{α} линии углерода — $\lambda = 4.48 \text{ nm}$ на выходе монохроматора в 1, 2 и 3 порядках дифракции (на углеродном аноде). Регистрация излучения осуществлялась открытым электронным умножителем (каналтроном) ВЭУ-6 в счетном режиме. Статистика отсчетов позволяла проводить измерения с относительной погрешностью $\sim 5\%$ в максимуме окна пропускания фильтров и с точностью $\sim 15\%$ на краях окна пропускания. Для более точного измерения пропускания фильтров на длине волны 13.5 nm использовалось излучение $L_{2,3}$ линии Si — 13.55 nm (на аноде из кремния), интенсивность которой в 5–8 раз превышала интенсивность излучения от W анода. Это позволило уменьшить погрешность измерений в этой точке спектра до $\sim 1\%$.

На рис. 4 в качестве примера приведены графики спектральной зависимости коэффициента пропускания для фильтров из Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Zr}$ и многослойного Si + Nb.

Проведенные исследования дали обнадеживающие результаты по получению качественных свободных оптических пленок-фильтров на область спектра 12–15 nm с требуемыми оптическими характеристиками. Работа в этом направлении продолжается как в плане получения совершенных образцов самих фильтров, так и с точки зрения изучения их оптических характеристик в широком спектральном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 06-08-01230-а.

Список литературы

- [1] *Seisyan R.P.* // Technical Physics. 2005. V. 50. N 5. P. 535–545.
- [2] *Gontin R.* // SEMATEX International EUV Source Workshop. March 03.2002. Santa Clara, CA, USA.
- [3] *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. V. 54. N 2. P. 181–343.
- [4] Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. М.: Физматлит, 2006. 552 с.