

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-70-75

УДК 535.015; 535.323

Металлодиэлектрические полосовые интерференционные фильтры

Евгений Николаевич Котликов✉*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия**ekotlikov45@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1799-944X>*

Аннотация

Предмет следования. Металлодиэлектрические полосовые интерференционные фильтры на основе пленок Al_2O_3 , SiO_2 , Ge , Ni . **Цель работы.** Разработка металлодиэлектрических интерференционных фильтров для средней инфракрасной области спектра на основе прозрачных диэлектрических пленок и поглощающих пленок никеля, в которых блокировано длинноволновое излучение спектра. **Метод.** Для реализации поставленной цели используется численно-аналитический метод. Проводится расчет спектра пропускания исходного фильтра из диэлектрических пленок. Используется зеркальное покрытие из четвертьволновых пленок Al_2O_3 , SiO_2 , Ge , Ni , имеющее пропускание в диапазоне длин волн 2,2–6,0 мкм. Проводится расчет спектра поглощения покрытия при введении пленок никеля в пленки Al_2O_3 , SiO_2 , Ge . Находится зависимость спектра поглощения при введении пленок никеля последовательно во все точки отдельной пленки и определяются точки, в которых поглощение минимально. Минимальное поглощение получается при введении поглощающей пленки никеля в середину пленки Ge . Полученная структура оптимизируется по всем толщинам пленок SiO_2 , Ge , Ni . Для оптимизации использовалась программа FilmManager, в которой для минимизации функции качества используются два алгоритма поиска минимума функции качества — методы случайного перебора и квадратичной аппроксимации Пауэлла. Получены спектры пропускания всей структуры. **Основные результаты.** Предложена методика синтеза металлодиэлектрического полосового фильтра. Синтезированы полосовые фильтры. Фильтр 1, имеющий максимум пропускания в диапазоне длин волн 2,2–4,6 мкм, среднее пропускание в диапазоне 6–15 мкм менее 0,6%. Фильтр 2 имеет максимум пропускания в диапазоне длин волн 2,9–5,9 мкм, среднее пропускание в диапазоне длин волн 6–15 мкм менее 0,2%. **Практическая значимость.** Предложенный в работе полосовой интерференционный фильтр может быть реализован на подложке из кремния, имеющего хорошее пропускание в диапазоне 1–20 мкм без использования дополнительных блокирующих абсорбционных или интерференционных фильтров в дальней области инфракрасного спектра. Тем самым снижается стоимость такого фильтра, что повышает его конкурентоспособность.

Ключевые слова: полосовые интерференционные фильтры, спектры, диэлектрические и металлические пленки, поглощение, пропускание, инфракрасный диапазон спектра

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке по гранту МНВО РФ № FSFR-2020-0004.

Ссылка для цитирования: Котликов Е.Н. Металлодиэлектрические полосовые интерференционные фильтры // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 70–75. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-11-70-75

Коды OCIS: 250.0230, 310.1620

ВВЕДЕНИЕ

Полосовые интерференционные фильтры [1] для средней инфракрасной (ИК) области спек-

тра широко применяются в различных приборах оптического приборостроения: тепловизорах, пирометрах, недисперсионных ИК

датчиках и др. [2–7]. Они позволяют выделять требуемый диапазон спектра вблизи центральной длины волны. Синтез полосовых и узкополосных интерференционных фильтров на основе прозрачных диэлектрических пленок детально описан в работах [8, 9]. Такие фильтры также могут быть реализованы на основе обычных абсорбционных фильтров [1], однако они имеют нечеткие границы и редко применяются на практике. В ИК области спектра широко применяются подложки из кремния, прозрачного в диапазоне длин волн 1–300 мкм [10]. В этом случае требуется блокировать коротковолновое и длинноволновое излучения вне области пропускания фильтра.

Подавление коротковолнового излучения может быть реализовано за счет использования зеркального покрытия или пленок, имеющих высокое поглощение на длинах волн короче 2–3 мкм (например пленок из PbTe или Ge [11]).

Подавление длинноволнового излучения возможно с использованием набора зеркал или абсорбционных фильтров. Изготовление зеркал, пропускающих в требуемом диапазоне спектра и отсекающих длинноволновое излучение, представляет технически сложную задачу. Для такого покрытия требуются толстые пленки, реализация которых затруднительна.

Другой метод подавления длинноволнового излучения заключается в использовании дополнительного абсорбционного фильтра. Описанные методы приводят к увеличению стоимости фильтра и его размеров. Тем самым снижается конкурентоспособность конечных фильтров.

В работе [12] описан метод синтеза полосового фильтра с блокированием длинноволнового излучения на основе пленок Nb_2O_5 , SiO_2 и Ag. Пленки серебра работают в качестве отражающих. При синтезе использовалось программное обеспечение OptiLayer [13], основой которого является метод игольчатых вариаций, предложенный А.В. Тихонравовым [14]. Метод не использует априорные модели и заключается в последовательном переборе вставляемых пленок. Синтезированы полосовые и отсекающие фильтры в видимой и ближней ИК областях спектра.

В работе [15] описан синтез узкополосного интерференционного фильтра на длину волны

500 нм по схеме интерферометра Фабри–Перо, построенного на основе полупрозрачных пленок серебра оптической толщиной 305 нм и центральной полуволновой диэлектрической пленки. Фильтр блокирует все длинноволновое излучение спектра.

Применение описанных в публикациях [12, 15] подходов с использованием пленок серебра для среднего ИК диапазона спектра невозможен, так как пленки серебра не могут быть изготовлены нужной толщины с сохранением однородной структуры.

Целью настоящей работы является разработка и применение метода синтеза полосовых интерференционных фильтров для средней ИК области спектра на основе диэлектрических и металлических пленок, в которых блокируется длинноволновое излучение.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В настоящей работе описан синтез полосовых фильтров для средней ИК области спектра на основе прозрачных диэлектрических и поглощающих металлических пленок: Ge, SiO_2 , Al_2O_3 и Ni, в которых блокировано длинноволновое излучение. Метод базируется на анализе поглощения при внесении тонких металлических пленок внутрь диэлектрических пленок.

Синтез покрытия базируется на работе [16]. В этой работе описан метод синтеза узкополосного металлодиэлектрического интерференционного фильтра на длину волны 4,25 мкм с использованием поглощающих пленок никеля. При синтезе проводился анализ напряженности электромагнитного поля. Минимумы напряженности приходились на границу полуволнового центрального слоя, задающего длину волны максимума пропускания фильтра на основе интерферометра Фабри–Перо. В спектре фильтра блокировано длинноволновое излучение выше 5 мкм. Предлагаемая методика применена к интерференционным фильтрам в видимом и ИК диапазонах спектра.

Одним из вариантов реализации полосовых фильтров является использование обычных зеркальных покрытий на основе чередующихся слоев пленок с высоким и низким показателями преломления [8, 9]. Ниже приводятся результаты расчета спектров описываемых покрытий, выполненного с использованием

программы FilmManager [17] для анализа и синтеза интерференционных покрытий. При анализе и синтезе покрытий использовался матричный метод [9].

Синтез покрытий ведется на основе решения системы нелинейных уравнений для энергетических коэффициентов отражения и пропускания системы пленка–подложка на длине волны λ путем минимизации функции качества F вида

$$F = \sum_{i=1}^N [L_{\text{predet}}(d, n_i, k_i, \lambda_i) - L_{\text{exp}}]^2, \quad (1)$$

где $L_{\text{predet}}(d, n_i, \lambda_i, k_i)$ и L_{exp} — расчетное, или заданное (эталонное), и полученное экспериментально значения спектров пропускания T или отражения R на текущем значении длины волны λ_i . k_i — коэффициент экстинкции пленки [9], описывающий поглощение, d — толщина пленки, $W(\lambda_i)$ — статистический вес на заданной λ_i .

В программе используются два алгоритма поиска минимума функции качества — методы случайного перебора и квадратичной аппроксимации Пауэлла [18]. Также в программе предусмотрена возможность введения и учета дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции пленок и материалов подложки. Толщина пленок могла задаваться от 1 нм и более. Оптические константы пленок брались из работ [11, 19].

Исходная структура полосового фильтра представляла собой зеркало на основе чередующихся слоев пленок германия (Ge), монооксида кремния (SiO) или лейкосапфира (Al₂O₃) на подложке из кремния. Она имеет вид

$$\text{П В, Н, В, Н, В, Н, В, Н, В, 0,5Н}, \quad (2)$$

где П — подложка из кремния, В — пленка с высоким показателем преломления (Ge), Н — пленка с низким показателем преломления (SiO или Al₂O₃). Обратная сторона подложки просветлена и не участвует в формировании спектра в области 2–7 мкм. Оптические толщины пленок задавались в долях $\lambda_0/4$, где λ_0 — реперная длина волны.

Проводился синтез двух структур. В структуре 1 использовались пленки Ge, Al₂O₃ и Ni с оптической толщиной $\lambda_0/4$, где $\lambda_0 = 6$ мкм.

В структуре 2 использовались пленки Ge, SiO и Ni с оптической толщиной $\lambda_0/4$, где $\lambda_0 = 8$ мкм.

На рис. 1 представлены спектры структур 1 и 2, рассчитанные с использованием программы FilmManager. Спектр зеркального покрытия имеет минимумы на длинах волн λ_0 , $\lambda_0/3$, $\lambda_0/5$. Максимумы пропускания приходятся на длины волн $\lambda_0/2$, $\lambda_0/4$. Это связано с тем, что на этих длинах волн имеется четное число четвертьволновых пленок на длину волны $\lambda_0/2$, и при отсутствии поглощения в них пропускание в средней части области на длине волны $\lambda_0/2$ максимально, а поглощение минимально.

На первом этапе в исходной структуре определялись точки, поглощение в которых минимально. На рис. 2 приведены спектры поглощения структуры 1 при внесении в центральные пленки Ge и Al₂O₃ поглощающих пленок Ni оптической толщиной 0,05 мкм

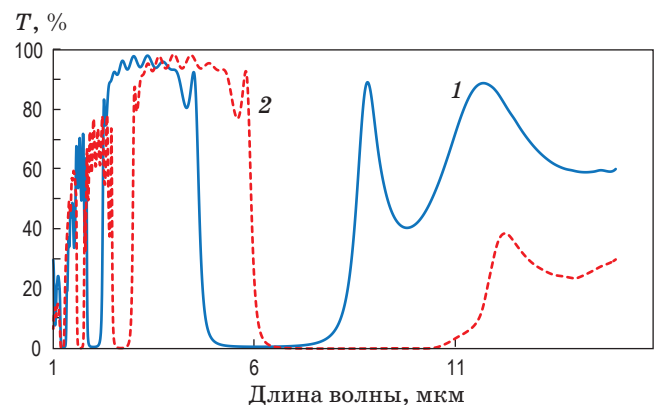


Рис. 1. Спектры пропускания структур 1 (1) и 2 (2)

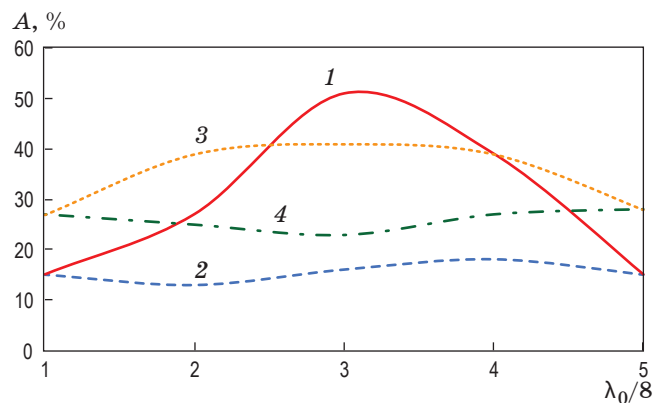


Рис. 2. Поглощение в покрытиях в зависимости от положения вставленной пленки никеля в структуре 1 (в пленке Al₂O₃ — 1, в пленке Ge — 2) и в структуре 2 (в пленке SiO — 3, в пленке Ge — 4)

и структуры 2 при внесении в центральные пленки Ge и SiO поглощающих пленок Ni оптической толщиной 0,05 мкм.

Спектры поглощения при их анализе были качественно одинаковыми во всех пленках. Видно, что внедрение поглощающей пленки в низко преломляющую пленку в обеих структурах дает большее поглощение, чем в пленку Ge. Форма спектров не зависит от положения пленки в структуре. Поэтому на первом этапе синтеза фильтра поглощающие пленки никеля вставлялись в пленку германия.

Описание методики внедрения металлической пленки внутрь диэлектрической в литературе не обсуждалось. Далее численными методами искали структуры полосовых фильтров, оптимизированных по толщинам всех пленок.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Синтез покрытия проводился в следующем порядке. На первом этапе анализировалось поглощение в низко преломляющих и высоко преломляющих пленках обеих структур (см. рис. 2). Далее в пленки германия вводились пленки Ni толщиной 0,05 мкм.

Полученные структуры использовались для оптимизации покрытия численными методами с использованием программы FilmManager. В качестве эталонных использовались структуры, спектры пропускания которых пред-

ставлены на рис. 3 (кривая 1 для структуры 1 и кривая 3 для структуры 2). Оптимизация проводилась по всем пленкам: диэлектрическим и металлическим.

Окончательно оптимизированная структура 1 имела вид

$$\begin{aligned} & \Pi, 0,908В, 0,043М, 0,648В, 1,881Н, 0,909В, \\ & 0,047М, 0,922В, 2,119Н, 0,902В, 0,054М, \\ & 0,938В, 2,113Н, 2,010В, 2,054Н, 0,910В, \\ & 0,034М, 1,029В, 1,077Н. \end{aligned} \quad (3)$$

Оптические толщины пленок выражены в $\lambda_0/4 = 3$ мкм. Геометрические толщины пленок Ni меняются в диапазоне от 5 до 11 нм. Диэлектрические пленки имеют толщины, обычные для интерференционных покрытий ИК диапазона спектра. Получение таких толщин металлических и диэлектрических пленок не представляет трудности. Оптические константы подложки и пленок взяты из работ [1, 10, 11].

Спектр пропускания оптимизированной структуры 1 приведен на рис. 3, кривая 2. Из рисунка видно, что спектр имеет форму, близкую к прямоугольной, с максимумом пропускания около 50% в диапазоне длин волн 2,2–4,8 мкм. Среднее пропускание в области 6–15 мкм менее 0,6%. Контрастность фильтра 90.

Структура 2 оптимизировалась по описанному выше методу. После оптимизации она имела вид

$$\begin{aligned} & \Pi, 8,122В, 0,047573М, 0,692В, 2,754В, \\ & 2,754Н, 1,268В, 0,054М, 1,097В, 2,682Н, \\ & 1,251В, 0,042М, 1,273В, 2,571Н, 2,623В, 2,678. \\ & 2,670Н, 1,311В, 0,034М, 0,733В, 0,739Н, \end{aligned} \quad (4)$$

где оптические толщины выражены в долях $\lambda_0/4$, $\lambda_0 = 3$ мкм.

Спектр пропускания структуры 2 приведен на рис. 3, кривая 4. Из рисунка видно, что спектр имеет форму, близкую к прямоугольной, с максимумом пропускания около 50% в диапазоне длин волн 2,85–5,80 мкм. Среднее пропускание в области 6–15 мкм менее 0,3%. Контрастность фильтра 200. Большая контрастность по сравнению с оптимизированной структурой 1 связана с тем, что пленки SiO имеют полосу поглощения в диапазоне 8–10 мкм.

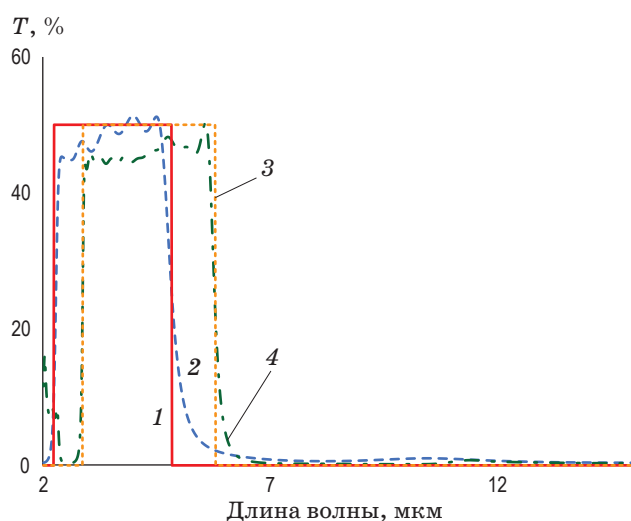


Рис. 3. Эталонные спектры пропускания структур 1 и 2 (1, 3) и оптимизированные спектры структур 1 и 2 (соответственно 2, 4)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен синтез полосовых интерференционных фильтров в средней ИК области спектра, в которых блокируется длинноволновое излучение. Найдены структуры фильтров, на основе прозрачных диэлектрических и поглощающих металлических пленок из Al_2O_3 , SiO_2 , Ge , Ni . Методика синтеза базируется на оригинальном анализе поглощения при внесении тонких металлических пленок внутрь диэлектрических пленок структуры. Найдены точки внедрения поглощающих пленок. Оптимизация структуры ведется с использованием программы FilmManager методом минимизации функции качества. Синтезированы полосовые интерференционные фильтры, имеющие следующие параметры.

Пропускание первого фильтра постоянно в области 2,25–4,75 мкм. В области спектра выше 6 мкм среднее пропускание менее 0,6%.

Пропускание второго фильтра постоянно в области 2,85–5,80 мкм. В области спектра выше 6 мкм среднее пропускание менее 0,3%.

Синтезированные фильтры могут быть применены в датчиках ИК излучения, описанных в работах [2–7]. Практическая значимость предложенных структур заключается в том, что для них не требуются дополнительные фильтры, поглощающие в дальней ИК области спектра, поэтому можно использовать в качестве материала подложек тонкие пластины Si . Такой подход снижает стоимость конечного изделия и делает его более конкурентоспособным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник технолога-оптика / под общ. ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
2. Vollmer M., Möllmann K.P. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. 2nd ed. / First published: 17 November 2017. DOI: 10.1002/9783527693306
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-техн. вест. информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 1–12.
4. Sklorz A., Janssen S., Lang W. Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches // Sensor Actuat B-Chem. 2012. V. 175. P. 246–254. <https://doi:10.1016/j.snb.2012.09.085>
5. Варфоломеев С.П., Горбунов Н.И., Дийков Л.К., Медведев Ф.К. Датчики для систем обеспечения пожаро- и взрывобезопасности // Датчики и системы. 2004. № 6. С. 5–7.
6. Афанасьев Д.С., Бардакова Е.А., Быстряков Д.С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. С. 1–12.
7. Macleod H.A. Thin film optical filters. 4th ed. Tucson, Arizona, USA: CRC Press, 2010. 791 p.
8. Исмаил Н., Kores C.C., Гескус Д., Полльнау М. Резонатор Фабри-Перо: формы спектральных линий, общие и связанные с ними распределения Эри, ширина линий, толщина и характеристики при низкой или частотно-зависимой отражательной способности. М.: Оптика Экспресс, 2016. Р. 16366–16389. DOI: 10.1364/OE.24.016366
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. под ред. Мотулевич Г.П. М.: Наука, 1970. 856 с.
10. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. Оптические константы кремния в диапазоне 30–10000 cm^{-1} // Опт. и спектр. 2016. Т. 120. № 5. С. 165–168. DOI: 10.1134/S0030400X16050167
Kotlikov E.N., Novikova J.A. Optical constants of silicon in the range of 30–10000 cm^{-1} // Optics and Spectroscopy. 2016. V. 120. № 5. P. 815–817.
11. Тропин А.Н. Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) // УПФ. 2016. Т. 4. № 2. С. 206–211. DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-01-56-61
12. Ma P., Lin F., Dobrowolski J.A. Design and manufacture of metal/dielectric long-wavelength cutoff filters // Appl. Opt. 2011. V. 50. № 9. P. C201–C209. DOI: 10.1364/AO.50.00C201
13. Электронный ресурс. // <http://optilayer.com/>
14. Тихонравов А.В. Метод игольчатых вариаций — универсальный метод проектирования оптических покрытий // Междунар. оптический конгр. «Оптика-XXI век». СПб., 2000. С. 16–20.
15. До Тан Дой, Губанова Л.А. Интерференционные металлодиэлектрические светофильтры // Научно-техн. вест. СПб. государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2001. № 5. С. 19–22.

16. Котликов Е.Н. Узкополосные интерференционные фильтры с поглощающими плёнками // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 6. С. 45–47. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-06-45-47
Kotlikov E.N. Narrow band interference filters with absorbing films // JOT. 2021. V. 88. № 6. P. 321–322.
17. Котликов Е.Н., Коваленко И.И., Новикова Ю.А. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3(76). С. 51–59. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2015.3.51
18. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
19. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнов Е.В. Оптические постоянные природных и технических средств. Справочник Л.: Химия. 1984. 366 с.

АВТОР

Евгений Николаевич Котликов — доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-1799-944X>; ekotlikov45@mail.ru

AUTHORS

Evgenii N. Kotlikov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace, St. Petersburg, 190000, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1799-944X>; ekotlikov45@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2022, одобрена после рецензирования 11.08.2022, принята к печати 26.09.2022