

УДК 535.345.673

Синтез узкополосных интерференционных фильтров с поглощающими металлическими пленками

© 2021 г. Е. Н. Котликов*, доктор физ.-мат. наук; А. Н. Тропин**, канд. физ.-мат. наук

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург

**Научно-исследовательский институт «Гириконд», Санкт-Петербург

E-mail: 216@giricond.ru

Поступила в редакцию 08.07.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-09-85-92

Предложены конструкции узкополосных инфракрасных металлоизолированных интерференционных фильтров. Особенностью разработанных фильтров является то, что металлические пленки помещены внутри структуры интерференционного покрытия с целью подавления нежелательного пропускания излучения в длинноволновой области спектра с длинами волн более 3,5 мкм. На примере узкополосного фильтра с максимальным пропусканием на длине волны 3,43 мкм, применяемого в абсорбционных газовых недисперсионных инфракрасных сенсорах, приведены особенности проектирования и спектральные характеристики таких фильтров.

Ключевые слова: интерференционные фильтры, тонкие пленки, инфракрасная область спектра, поглощение, пропускание, недисперсионный инфракрасный сенсор.

Коды OCIS: 350.2460, 310.1620

ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные многослойные оптические покрытия, способные нужным образом преобразовывать спектральный состав падающего (отраженного) излучения, относятся к фильтрующим покрытиям. Фильтрующее покрытие, нанесенное на подложку, образует светофильтр. В различных современных приложениях широкое применение имеют полосовые и узкополосные светофильтры, выделяющие требуемый спектральный диапазон. Обычно такие светофильтры называют интерференционными фильтрами (ИФ).

Интерференционные фильтры получили широкое распространение в средней инфракрасной (ИК) области спектра благодаря использованию в таких приборах, как, например, термографы (тепловизоры), оптические

термометры (пиromетры), недисперсионные инфракрасные сенсоры — сенсоры в ИК абсорбционных газоаналитических системах, оптические датчики для систем обеспечения пожарной безопасности и в других оптико-электронных приборах для современных приложений [1–5].

Материалом, пригодным для изготовления подложек для ИК ИФ, наряду с германием и селенидом цинка является кремний. Широко используемые в микроэлектронной промышленности подложки толщиной 0,35–0,5 мм из кремния с электронной проводимостью марки КЭФ прозрачны в диапазоне длин волн от 1,1 мкм до 25 мкм и более [6]. При использовании кремния в качестве материала подложки для изготовления ИК ИФ недостатком является необходимость блокировать побочные

максимумы пропускания ИФ в длинноволновой области ИК спектра с длинами волн $\lambda > 3,5$ мкм, где используемые приемники оптического излучения, зачастую тепловые и неселективные, обладают чувствительностью [7]. На практике для блокирования длинноволновой области ИК спектра в этом случае применяют дополнительные светофильтры, в том числе и поглощающие. Например, для подавления излучения с длинами волн более 6 мкм в ИФ, используемых в приборах пожарной автоматики — пожарных извещателях пламени, могут быть использованы дополнительные окна из лейкосапфира небольшой толщины. Однако это обстоятельство усложняет конструкцию и увеличивает стоимость прибора в целом, а поэтому снижает его коммерческую привлекательность на рынке при серийном производстве.

В настоящей работе рассматривается возможность использования тонких металлических пленок при конструировании узкополосных ИФ [7], в которых блокировано излучение в дальней области ИК спектра. При этом тонкие металлические пленки предполагается использовать не в качестве полупрозрачных зеркал, как в традиционных металло-диэлектрических фильтрах, построенных по принципу интерферометра Фабри–Перо [7–9], а как дополнительные поглощающие функциональные слои. Структуры с такими слоями блокируют нежелательное пропускание в длинноволновой области спектра без существенного снижения максимального пропускания ИФ. Качественно решение этой задачи описано в работе [10].

Ни коим образом не снижая общности предлагаемого подхода, в работе представлены особенности конструирования таких металло-диэлектрических ИФ на примере узкополосного фильтра с максимумом пропускания на длине волны поглощения пропана 3,43 мкм, применяемого в ИК абсорбционных газоаналитических сенсорах горючих углеводородов [5].

РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Узкополосные ИФ, как правило, построены по схеме интерферометра Фабри–Перо и образованы двумя зеркалами, расположенными параллельно друг другу на некотором расстоя-

нии [8, 9, 11]. В качестве зеркал используют либо металлические пленки, обычно серебра, либо многослойные диэлектрические зеркала, состоящие из чередующихся четвертьволновых пленок материалов с различающимися показателями преломления. Пленки серебра в качестве полупрозрачных зеркал широко используются для изготовления ИФ для видимой и ближней ИК областей спектра [8]. Построенные по такому принципу ИФ блокируют пропускание в относительно нешироких диапазонах спектра, расположенных справа и слева по оси длин волн от максимума пропускания ИФ. За пределами спектральной области блокирования излучения ИФ обычно имеют существенное пропускание. Вакуумные технологии изготовления таких фильтров позволяют получать долговечные и сравнительно недорогие ИФ. В средней и дальней ИК областях спектра пленки серебра не используются, так как из-за сильного в них поглощения становится недостаточным пропускание в максимуме ИФ. Этого недостатки лишены ИФ, состоящие только из диэлектрических слоев.

Рассмотрим структуру ИФ, состоящую из четвертьволновых диэлектрических зеркал и одного полуволнового разделительного (резонансного) слоя. Разделительный слой с оптической толщиной, равной или кратной $\lambda_{\max}/2$, определяет λ_{\max} — длину волны максимума пропускания ИФ. В соответствии с принятой терминологией такой тип ИФ характеризуется следующими основными параметрами: коэффициент пропускания в максимуме τ_{\max} , спектральная ширина рабочей полосы пропускания на уровне $\tau = 0,5\tau_{\max} - \Delta\lambda_{0,5}$ (полуширина рабочей полосы пропускания) и спектральная ширина рабочей полосы пропускания на уровне $\tau = 0,1\tau_{\max} - \Delta\lambda_{0,1}$.

От количества слоев в диэлектрических зеркалах, образующих ИФ, зависит полуширина рабочей полосы ИФ. Чем больше слоев, тем больше отражение зеркал и тем меньше полуширина ИФ. По такому принципу проектируют и изготавливают узкополосные ИФ с полушириной $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_{\max}$ примерно от 0,005 до 0,01. Форма линии спектрального пропускания такого ИФ близка к лоренцеву контуру и характеризуется нерезкими фронтами при переходе от зоны пропускания к зоне заграждения.

С целью повышения помехозащищенности, избирательности, а также для получения наилучшего соотношения сигнал/шум в оптико-электронных приборах, имеющих в своей конструкции ИФ, такие фильтры должны иметь спектр пропускания по форме и полуширине, близкий к анализируемым характеристическим спектрам (поглощения, испускания и проч.). Добиться улучшения контраста ИФ и варьировать полуширину ИФ можно путем конструирования составных фильтров, состоящих из нескольких узкополосных ИФ с несколькими разделительными слоями, диэлектрические зеркала которых разделены согласующими слоями [11].

Рассмотрим две модельные конструкции таких составных ИФ. В первом случае в качестве полуволновых разделительных слоев используются пленки с низким показателем преломления. Структура покрытия № 1 — $\Pi|(BH)^2B(2H)(BH)^3B(2H)B|Воздух$, где Π — подложка, B — четвертьволновый слой с высоким показателем преломления, H — четвертьволновый слой с низким показателем преломления. Топология — зависимость показателя преломления от геометрической толщины, многослойной структуры № 1 приведена на рис. 1а. Во втором случае в качестве центральных полуволновых слоев используются пленки с высоким показателем преломления — $\Pi|(BH)^2(2B)(HB)^2H(2B)HB\Pi|Воздух$. Топология многослойной структуры № 2 приведена на рис. 1б. Спектры таких покрытий приведены на рис. 2а (кривая 1) и рис. 2б (кривая 1) соответственно. В исходных структурах помимо зеркал и разделительного слоя на границе с воздухом имеются некоторые дополнительные слои, необходимость которых обусловлена достижением требуемой полуширины узкополосных фильтров.

В работе при моделировании показатель преломления низкопреломляющих слоев принимался равным 1,81 ($\lambda = 3,5$ мкм), что соответствует пленкам монооксида кремния (SiO_2). Показатель преломления пленок с высоким показателем преломления принимался равным 4,03 ($\lambda = 3,5$ мкм), что соответствует пленкам германия (Ge). Показатель преломления подложки из кремния равен 3,43 ($\lambda = 3,5$ мкм).

Расчет и проектирование покрытий выполнялись с использованием программы Film

Manager [12]. В программе предусмотрен расчет спектров заданных структур, а также синтез (оптимизация) покрытий с характеристиками, максимально приближенными к требуемому спектру.

Синтез покрытий проводился путем минимизации функции качества вида

$$F = \sum_{i=1}^N |T_{\text{calc}}(\lambda_i) - T_{\text{et}}(\lambda_i)|^2 W(\lambda_i), \quad (1)$$

где $T_{\text{calc}}(\lambda_i)$ и $T_{\text{et}}(\lambda_i)$ — расчетное и эталонное (требуемое) значения коэффициента про-

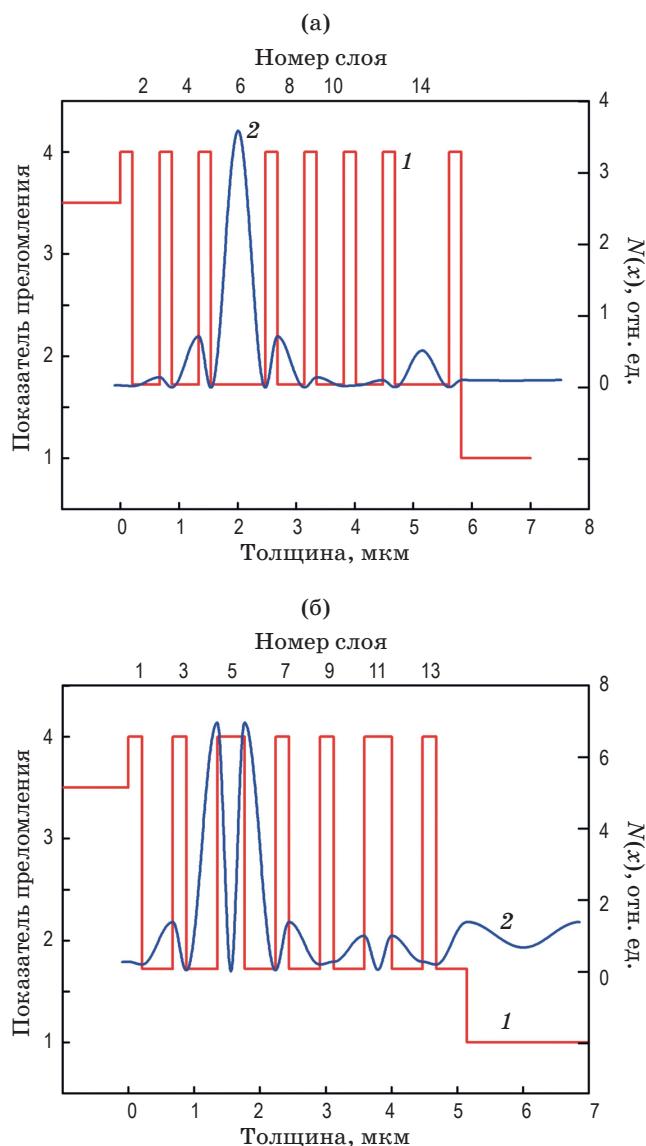


Рис. 1. Топологии ИФ (1) и распределения электрического поля (2) в структуре с полуволновыми слоями с низким показателем преломления (а) и с высоким показателем преломления (б).

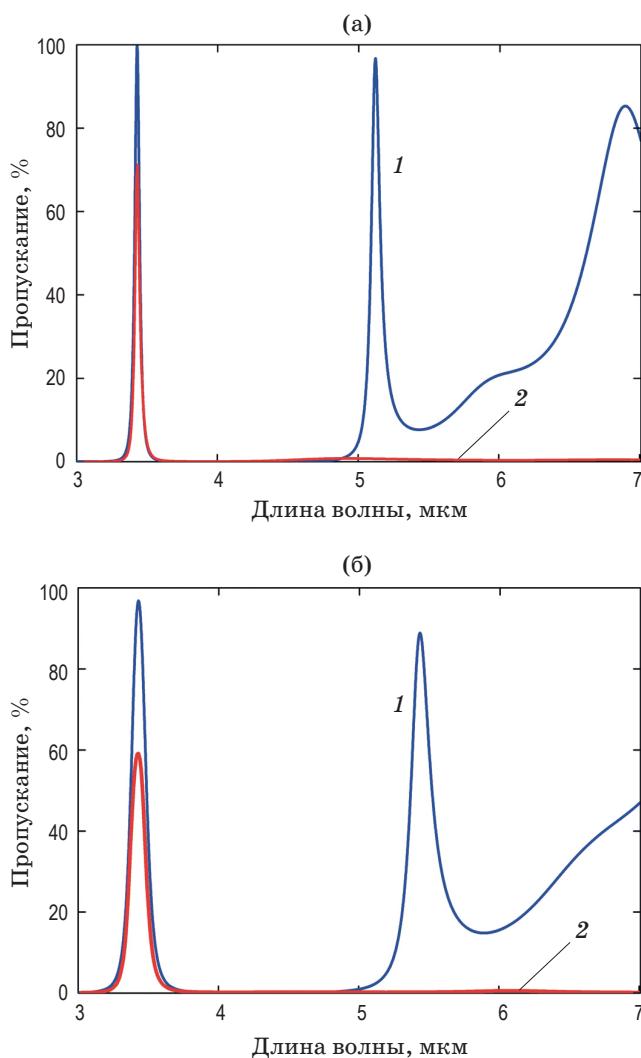


Рис. 2. Спектры пропускания ИФ с полуволновыми слоями с низким показателем преломления (а) и с высоким показателем преломления (б). 1 — исходная структура, 2 — структура с металлическими слоями.

пускания на длинах волн $\lambda_i = \lambda_{\min} + (i - 1)\Delta\lambda$ соответственно, λ_{\min} — коротковолновая граница спектрального интервала, $\Delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/N$ — размер шага сетки длин волн, N — число точек, в которых вычисляется спектр, и $W(\lambda_i)$ — весовой множитель в точке i , задаваемый пользователем.

В программе используются два алгоритма поиска минимума функции качества (1), это методы случайного перебора и квадратичной аппроксимации Пауэлла [13]. Также в программе предусмотрена возможность введения и учета дисперсии показателя преломления и коэффициента экстинкции пленок и матери-

алов подложек. Толщина пленок могла задаваться от 1 нм и более.

В качестве эталонного использовались следующие спектры: в диапазоне 3,1–3,7 мкм — спектры исходных структур (см. рис. 2а кривая 1 и рис. 2б кривая 1), вне указанного диапазона спектра пропускание эталонных структур было равно нулю. В программу вводились данные оптических констант используемых материалов, т.е. при расчетах спектральных характеристик и при анализе распределения электрического поля в работе учитывались дисперсионные зависимости как показателей преломления, так и поглощения используемых пленок и материала подложки [6, 14].

АНАЛИЗ АМПЛИТУДЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СТРУКТУРЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ФИЛЬТРА

Опыт применения широко используемого в настоящее время «игольчатого» метода синтеза оптических покрытий [15] для проектирования структур с металлическими поглощающими слоями при синтезе узкополосных металлодиэлектрических ИФ не дает удовлетворительных результатов. Поэтому возникает необходимость в применении дополнительных методов анализа тонкопленочных структур, состоящих из диэлектрических и металлических слоев. Одним из таких методов является исследование распределения напряженности электрического поля волны, распространяющейся через многослойную систему.

Расчет напряженности электрического поля внутри интерференционных структур проводился с использованием матричных методов [16, 17].

Наравне с построением распределения фактической амплитуды электрического поля зачастую анализируют квадрат амплитуды электрического поля в точке с координатой x , нормированный на квадрат амплитуды поля падающей волны [17],

$$N(x) = \frac{|E(x)|^2}{|E_0^+|^2}, \quad (2)$$

где $E(x)$ — амплитуда электрического поля в точке с текущей координатой x , E_0^+ — амплитуда поля волны, падающей из внеш-

ней среды (воздуха) на оптическое покрытие. В работе расчет распределения поля, описываемого выражением (2), проводился матричным методом, приведенным в публикации [17].

На рис. 1а представлен результат расчета напряженности электрического поля в многослойной структуре, спроектированной с использованием двух полуволновых слоев с низким показателем преломления (слои с номерами 6 и 14).

На рис. 1б приведен результат расчета напряженности электрического поля в многослойной структуре, спроектированной с использованием двух полуволновых слоев с высоким показателем преломления (слои с номерами 5 и 11).

Расчет распределения электрического поля в многослойном тонкопленочном покрытии, образующем ИФ, показывает, что распределение напряженности поля неравномерно и имеет экстремумы в зависимости от локализации в структуре. С учетом этого обстоятельства, а также с целью уменьшения оптических потерь в многослойной системе на длине волны λ_{\max} с одновременным блокированием излучения в области спектра с $\lambda > \lambda_{\max}$ металлические пленки необходимо помещать в точках локальных минимумов, как это предложено в работе [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Процедура проектирования узкополосных ИФ с металлическими пленками базируется на результатах работ [10, 18]. В работе [10] описана методика синтеза ИФ с использованием тонких металлических пленок для блокирования длинноволновой области в спектре пропускания. В работе [18] описано использование тонких металлических пленок для применения в высококонтрастных оптических структурах типа отражающих ИФ.

Определенные трудности при проектировании и изготовлении многослойных интерференционных металлодиэлектрических покрытий возникают ввиду того обстоятельства, что для их создания требуются тонкие металлические пленки толщиной от 5 до 50 нм. При этом известно [19], что оптические константы

тонких пленок многих металлов существенно зависят от толщины и отличаются от оптических постоянных массивных образцов.

Анализ оптических свойств тонких металлических пленок приведен в работе [18]. Для пленок, обладающих высоким отражением, например, Ag, Au или Al, характерна гранулированная структура. Поэтому для получения требуемой активной проводимости необходимо использовать относительно толстые пленки: из Ag — примерно 200 нм, из Au — 100 нм в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. С увеличением длины волны толщина пленок с требуемым значением активной проводимости снижается. Показано [18], что наиболее пригодными для решения задачи, рассматриваемой в работе, являются пленки тугоплавких металлов. В качестве предельно тонких пленок металлов предлагается использовать пленки Mo, Co, Rh, Ni и, что несколько хуже, пленки Cr, Ta, Ti с толщиной до 10 нм. Пленки из Mo, Co, Rh, Ni толщиной более 6–8 нм однородны и могут применяться при синтезе оптических структур. При проектировании металлодиэлектрических покрытий в работе использовались металлические пленки никеля толщиной от 5 до 35 нм.

На первом этапе проектирования выбирались исходные структуры покрытий, рассчитывались их спектры пропускания и проводился расчет распределения электрического поля в многослойных системах.

Расчет распределения электрического поля модельных структур покрытий, используемых в работе, показывает, что в случае структуры ИФ, содержащей полуволновые пленки из материала с низким показателем преломления, минимумы напряженности поля располагаются на границах разделительных полуволновых слоев (рис. 1а). В случае ИФ с полуволновыми пленками с высоким показателем преломления минимумы амплитуды приходятся на середину полуволновых слоев (рис. 1б).

На следующем этапе проектирования в исходные структуры покрытий были добавлены металлические слои. В структуру № 1 было добавлено 4 пленки никеля с геометрической толщиной 5 нм таким образом, чтобы полуволновые разделительные слои оказались между металлическими слоями. В структуре № 2 в середину каждого из полуволновых

Структуры металлодиэлектрических покрытий после процедуры оптимизации

Структура № 1	Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Материал	Ge	SiO	Ge	SiO	Ge	Ni	SiO	Ni	Ge	SiO
	Толщина	0,977	0,922	0,969	0,904	0,998	0,091	1,926	0,080	0,939	1,055
	Номер слоя	11	12	13	14	15	16	17	18	19	–
	Материал	Ge	SiO	Ge	SiO	Ge	Ni	SiO	Ni	Ge	–
	Толщина	0,957	1,053	1,014	0,914	1,011	0,078	1,968	0,004	0,963	–

Структура № 2	Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Материал	Ge	SiO	Ge	SiO	Ge	Ni	Ge	SiO	Ge	SiO
	Толщина	1,000	1,000	1,366	0,886	0,892	0,142	0,921	1,008	0,969	1,000
	Номер слоя	11	12	13	14	15	16	17	18	–	–
	Материал	Ge	SiO	Ge	Ni	Ge	SiO	Ge	SiO	–	–
	Толщина	0,703	1,275	0,834	0,180	0,349	1,602	1,245	0,262	–	–

Примечание. Здесь толщина пленок представлена в долях $\lambda_{\max}/4$, где $\lambda_{\max} = 3,43$ мкм.

слоев были добавлены металлические пленки с геометрической толщиной 10 нм.

Далее полученные структуры оптимизировались с использованием программы Film Manager по эталонным спектрам. Спектры пропускания оптимизированных структур с металлическими слоями (таблица) приведены на рис. 2.

В таблице приведены структуры оптимизированных ИФ, покрытия которых содержат металлические слои.

При расчете спектров отражение (R) от обратной стороны подложки не учитывалось, так как его можно минимизировать до значений $R < 1\%$ за счет нанесения просветляющего покрытия.

Из спектров на рис. 2 видно, что использование металлических пленок приводит к снижению пропускания на длине волны λ_{\max} . Однако его уменьшение сравнимо с тем, которое получается при использовании дополнительных блокирующих (отрезающих) интерференционных покрытий или светофильтров.

Важным моментом при проектировании интерференционных покрытий является анализ устойчивости покрытия к ошибкам в толщине и оптических параметрах пленок, которые неизбежны в процессе их изготовления. Различные методы анализа структур из диэлектрических пленок описаны в ряде работ (см., например [20]). Анализ устойчивости металлодиэлектрических покрытий в литературе отсутствует.

Для исследования влияния вариации толщины металлических пленок на выходные характеристики металлодиэлектрических ИФ рассмотрим способ контроля процесса осаждения пленок в вакууме одноволновым методом по контрольному образцу-свидетелю. В этом случае достижимая погрешность при измерении пропускания (отражения) пленки на контрольном образце в процессе напыления составляет порядка 1–2%. Расчеты, выполненные для пленок Ni с геометрической толщиной 5–50 нм, показывают, что изменению пропускания на 2% соответствуют вариации толщины металлической пленки примерно

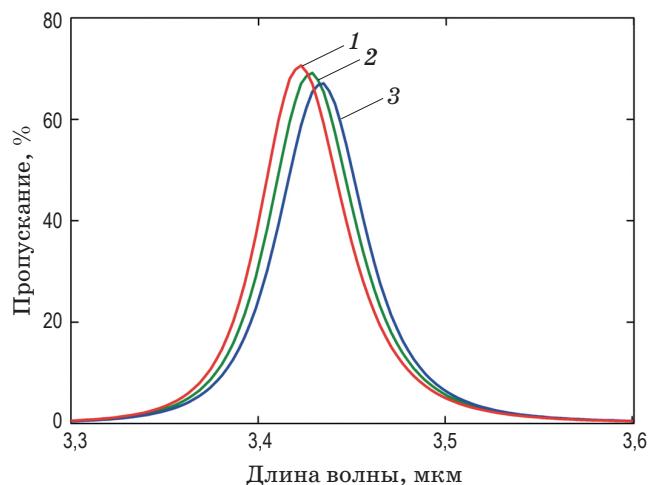


Рис. 3. Спектры пропускания ИФ со структурой № 1 при оптической толщине 6-го слоя (Ni) 0,082 (1), 0,091 (2), 0,10 (3) мкм.

на 10%. Эта ошибка приводит к искажению спектра пропускания всего фильтра.

На рис. 3 приведены спектры пропускания ИФ со структурой № 1 (таблица) при вариации толщины 6-го слоя (слой Ni) на 10%.

Из рис. 3 видно, что λ_{\max} , полуширина и пропускание в максимуме ИФ изменяются незначительно и в большинстве случаев эти параметры будут удовлетворять требованиям к спектру пропускания ИФ в рабочей области.

При этом вариации толщины металлической пленки в указанных пределах практически не сказываются на подавлении нежелательного пропускания металлодиэлектрических ИФ в спектральной области с длинами волн, превышающими λ_{\max} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и реализован новый метод проектирования металлодиэлектрических интерференционных фильтров с блокированием излучения в длинноволновой области спектра с длинами волн $\lambda > \lambda_{\max}$ (более 3,5 мкм). Метод заключается в анализе напряженности электрического поля внутри интерференционной структуры с последующим добавлением поглощающих металлических пленок и дальнейшей оптимизацией полученной структуры. Для реализации метода по математической программе, основанной на использовании характеристических матриц, проводится расчет напряженности электрического поля во всех точках структуры, и находятся точки, соответствующие минимальной напряженности электрического поля. В эти

точки структуры и помещаются металлические поглощающие пленки. Такие пленки работают не в качестве полупрозрачных зеркал, образующих металлодиэлектрический ИФ, построенный по принципу резонатора Фабри-Перо, а в качестве функциональных поглощающих слоев.

Анализ напряженности электрического поля в начальной структуре ИФ без поглощающих пленок показал, что поглощающие металлические пленки должны располагаться по краям полуволновых слоев, если последние имеют низкий коэффициент преломления, и в центре полуволновых слоев, если они имеют высокий коэффициент преломления. На основании этого предложенным методом спроектированы ИФ двух типов с максимумом пропускания на длине волны 3,43 мкм с перспективой использования таких фильтров в ИК абсорбционных сенсорах горючих углеводородов, в частности пропана.

Полученные результаты проектирования ИФ показывают, что для рассмотренных в работе многослойных покрытий, состоящих из пленок германия и монооксида кремния, добавление нескольких тонких слоев никеля толщиной от 15 до 35 нм создает возможность полностью блокировать пропускание в спектральной области с длинами волн более 3,5 мкм.

Использование указанного метода позволяет создавать металлодиэлектрические узкополосные ИФ с блокированием пропускания в длинноволновой области спектра с $\lambda > \lambda_{\max}$ без использования дополнительных фильтров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта МНиВО РФ №FSFR-2020-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vollmer M., Möllmann K.-P. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. 2nd ed. N.Y.: Willey, 2018. 794 p.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-техн. вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 1–13.
3. Sklorz A., Janssen S., Lang W. Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches // Sens. Act. B: Chem. 2012. V. 175. P. 246–254.
4. 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.
5. Афанасьев Д.С., Бардакова Е.А., Быстрыков Д.С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. С. 1–12.
6. Комликов Е.Н., Новикова Ю.А. Оптические константы кремния в диапазоне 30–10000 см⁻¹ // Опт. спектр. 2016. Т. 120. С. 165–168.

7. До Тан Дой, Губанова Л.А. Интерференционные металлодиэлектрические светофильтры // Научно-техн. вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2001. № 5. С. 19–22.
8. Macleod H.A. Thin film optical filters. Tucson: CRC, 2010. 772 p.
9. Jen Y.-J., Lin M.-J. Design and fabrication of a narrow bandpass filter with low dependence on angle of incidence // Coatings. 2018. № 8(231). P. 1–8.
10. Котликов Е.Н., Лавровская Н.П., Тропин А.Н. Металлодиэлектрические интерференционные фильтры для датчиков открытого пламени // X Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. научн. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 365–366.
11. Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А. Инфракрасные фильтры. Минск: Наука и техника, 1971. 228 с.
12. 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.
13. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
14. Золотарев В.М., Морозов И.Т., Смирнов Е.В. Оптические постоянные природных и технических средств. Л.: Химия, 1984. 216 с.
15. Tikhonravov A.V. Needle optimization technique: The history and the future // SPIE Proc. Optical Thin Films V: New Developments. 1997. V. 3133. P. 2–7.
16. Abeles F. Sur la Propagation des Ondes Electromagnetiques dans les Milieux Stratifiés // Ann. Phys. (Paris). 1948. № 3. P. 504–520.
17. Arnon O., Baumeister P. Electric field distribution and the reduction of laser damage in multilayers // Appl. Opt. 1980. V. 19. № 11. P. 1853–1855.
18. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985. 208 с.
19. Rouard P., Meessen A. II Optical properties of thin metal films // Progress in Optics. 1977. V. 15. P. 77–137.
20. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 9 . С. 61–67.