

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 металлодиэлектрических 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 (пирометры), 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 не селективные, 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 заблокировано излучение в дальней области ИК спектра. При этом тонкие металлические пленки предполагается использовать не в качестве полупрозрачных зеркал, как в традиционных металлодиэлектрических 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 металлодиэлектрических 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 недостатка 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  $\lambda_{\max}$  — длину волны максимума пропускания ИФ. В соответствии с принятой терминологией такой тип ИФ характеризуется следующими основными параметрами: коэффициент пропускания в максимуме  $\tau_{\max}$ , 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 загораживания.

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 —  $\Pi(\text{ВН})^2\text{В}(\text{2Н})(\text{ВН})^3\text{В}(\text{2Н})\text{В}| \text{Воздух}$ , где  $\Pi$  — подложка, В — четвертьволновый слой с высоким показателем преломления, Н — 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 —  $\Pi(\text{ВН})^2(\text{2В})(\text{НВ})^2\text{Н}(\text{2В})\text{НВН}| \text{Воздух}$ . 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). 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).

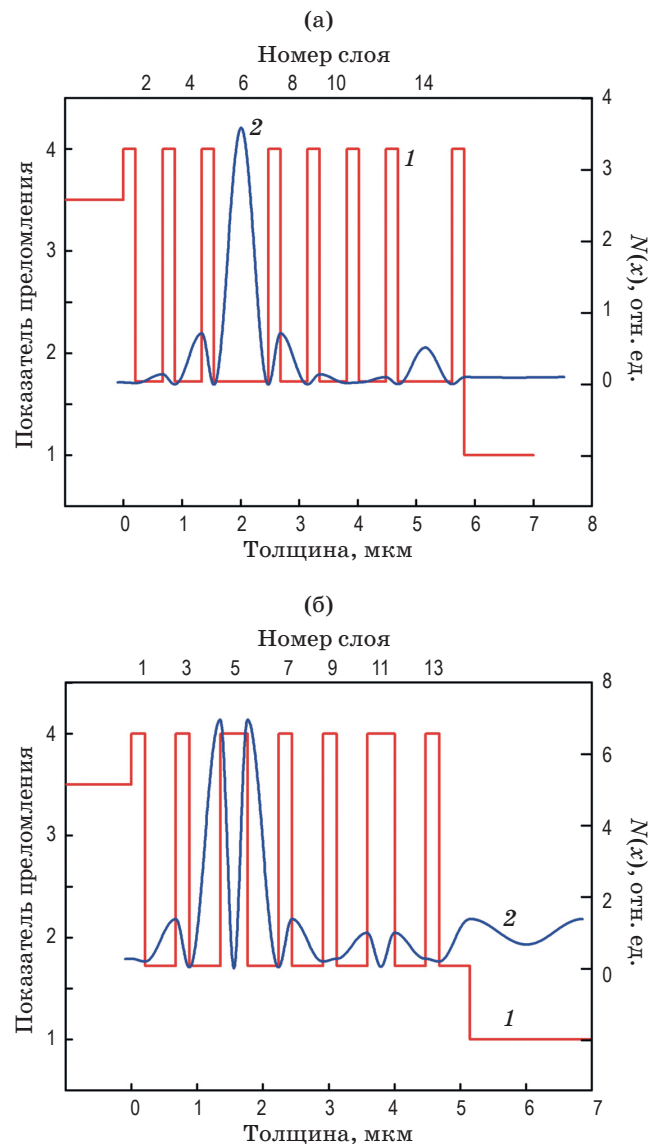
Расчет и проектирование покрытий выполнялись с использованием программы Film

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

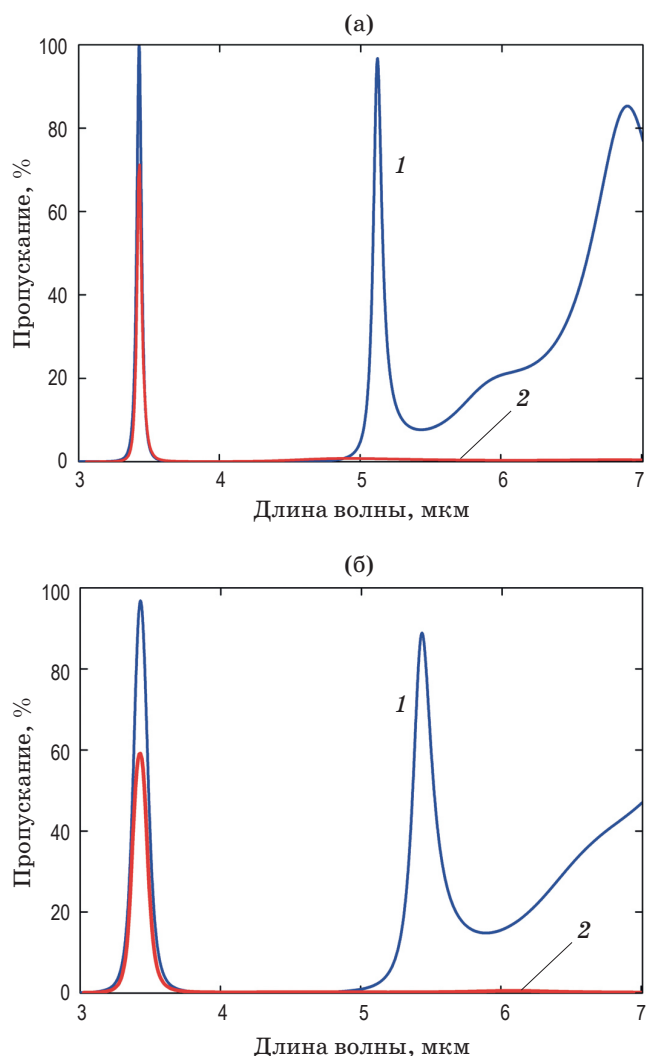
Синтез покрытий проводился путем минимизации функции качества вида

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

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,  $\lambda_{\min}$  — 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  $\lambda_{\max}$  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  $\lambda_{\max}$ . 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

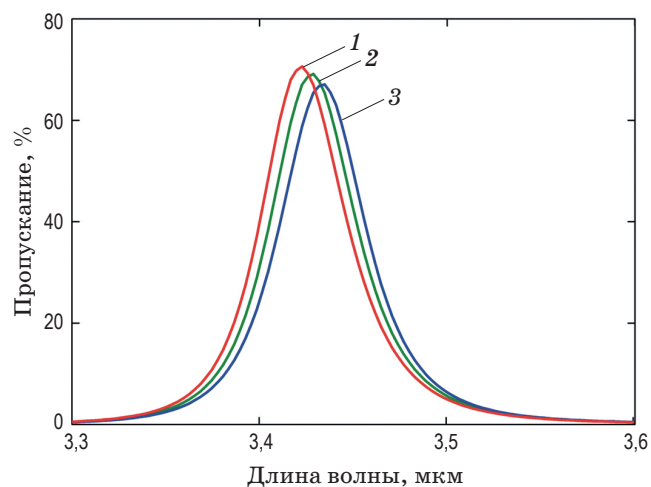


Рис. 3. Спектры пропускания ИФ со структурой № 1 при оптической толщине 6-го слоя (Ni) 0,082 (1), 0,091 (2), 0,10 (3) мкм.

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  $\lambda_{\max}$ , 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  $\lambda_{\max}$ .

## 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 МНВ0 РФ №FSFR-2020-0004.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vollmer M., Möllmann K.-P. Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications. 2<sup>nd</sup> ed. N.Y.: Wiley, 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., Быстряков Д.С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. С. 1–12.
6. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. Оптические константы кремния в диапазоне 30–10000 см<sup>-1</sup> // 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 Stratifies // 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. Троцкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск: Наука, 1985. 208 с.
19. Rouard P., Meessen A. 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.