

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.341: 535.345.67: 535.39: 539.216.2: 681.7.064.45

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ, КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ЭКСТИНКЦИИ, МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПОЛИПАРАКСИЛИЛЕН-СЕРЕБРО

© 2013 г. И. А. Богинская, аспирант; К. Н. Афанасьев; А. С. Ильин, канд. техн. наук; А. В. Гусев, канд. техн. наук; К. А. Маилян, канд. хим. наук; И. А. Рыжиков, канд. техн. наук

Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва

E-mail: cokher@mail.ru

Представлены результаты расчета оптических характеристик – коэффициентов экстинкции и преломления, металлополимерного композита полипараксилилен-серебро в диапазоне длин волн 300–2000 нм для различных концентраций серебра. Описан алгоритм расчета с помощью специально созданной программы. Представлены рассчитанные на основе полученных данных многослойные полимерные интерференционные фильтры, отсекающие ультрафиолетовый и видимый диапазоны длин волн на основе металлополимерного нанокompозита полипараксилилен-серебро.

Ключевые слова: металлополимерный композит, полипараксилилен, определение коэффициента экстинкции, определение коэффициента преломления, интерференционные отсекающие фильтры.

Код OCIS: 310.6860, 160.4236, 160.5470, 160.4760

Поступила в редакцию 28.02.2012

Введение

Получение новых оптических материалов для оптики на основе металлополимерных композитов является перспективной областью работ в оптоэлектронике. В частности, внедряя металлические частицы нанометрового размера в полимерную диэлектрическую прозрачную в видимой области спектра матрицу, можно получить среду с новыми оптическими свойствами, отличными от свойств исходных материалов [1]. Одной из них является металлополимерный композит полипараксилилен-серебро (ППК-Ag), который представляется перспективной оптической металлополимерной средой для оптоэлектроники. Результаты структурных и электрофизических исследований материала представлены в статье [2]. Однако ранее не были подробно исследованы его оптические характеристики. В настоящей статье впервые приведены результаты расчета оптических параметров – коэффициентов экстинкции (k) и преломления (n), среды ППК-Ag

с разными объемными содержаниями серебра, а также отсекающих фильтров на их основе.

Эксперимент

Целью исследования является определение оптических параметров материала ППК-Ag с различными объемными концентрациями серебра – коэффициентов преломления и экстинкции.

Предметом исследования являются образцы металлополимерного композита полипараксилилен-серебро, полученные методом криохимического синтеза (при 77 К) в вакууме (давление в камере порядка 10^{-7} Па) в виде тонких пленок [3] с известной толщиной на кварцевых подложках с различными объемными содержаниями серебра (0, 5, 7, 9, 11%) на специально сконструированной установке. Серебро и мономер, поступающие из разных источников, одновременно напылялись на подложку. Цвет полученных пленок меняется с ростом концентрации серебра от светло-желтого до

темно-красного, что определяется плазмонным резонансом [4].

На спектрофотометре *Cary Varian* были измерены спектры пропускания и отражения образцов ППК-Ag в диапазоне длин волн 300–2000 нм при нормальном падении света.

Для определения коэффициентов преломления и экстинкции металлополимерной среды ППК-Ag по данным измерений спектров пропускания и отражения была написана расчетная программа в среде MathLab по следующему алгоритму и со следующими приближениями:

- Композит рассматривается как однородная среда на непоглощающей в видимой области спектра подложке из кварца,

- Решается обратная задача, т. е. из спектров пропускания (T) и отражения (R) и измеренной толщины композита по формулам Френеля [5] определяются оптические константы,

- Задача имеет несколько решений, из которых для дальнейшей проверки выбираются имеющие физический смысл пары решений n и k ,

- Решение осуществляется методом подбора с шагом изменения величин $<0,01$,

- Свет падает на образец по нормали. Образец находится на кварцевой подложке с параметрами $n = 1,46$, $k = 0$,

- n и k подбираются параллельно, при этом шаг прироста n больше шага прироста k ,

- Расчетное значение k меньше значения k , рассчитанного по закону Бугера–Ламберта–Бера $I = I_0 \exp(-kd)$, d – толщина слоя,

- k и n неотрицательные, n композита не может быть меньше наименьшего n полимера ППК и больше максимального n компонентов композита, то же условие аналогично для k ,

- Выбор начальной точки приближения. Если отражение композита ниже отражения подложки при отсутствии поглощения, тогда начальная точка приближения находится как среднее между коэффициентом отражения композита и соответствующим коэффициентом подложки. Начальная точка приближения для k – это $1/2$ максимально возможной экстинкции по закону Бугера–Ламберта–Бера для тонких пленок,

- Дисперсия n в непоглощающей области должна быть положительной.

Выбранные пары решений проверялись обратным расчетом с помощью программы Essential Macleod (Optical Coating Design Software Ver. 9.1). На рис. 1, 2 показано сопоставление результатов обратного расчета и экспериментальных данных для спектров пропускания и отражения.

Совпадение результатов можно считать удовлетворительным, так как фотометрическая погрешность спектрофотометра составляет $\pm 1\%$. Кроме того наблюдается рассеяние

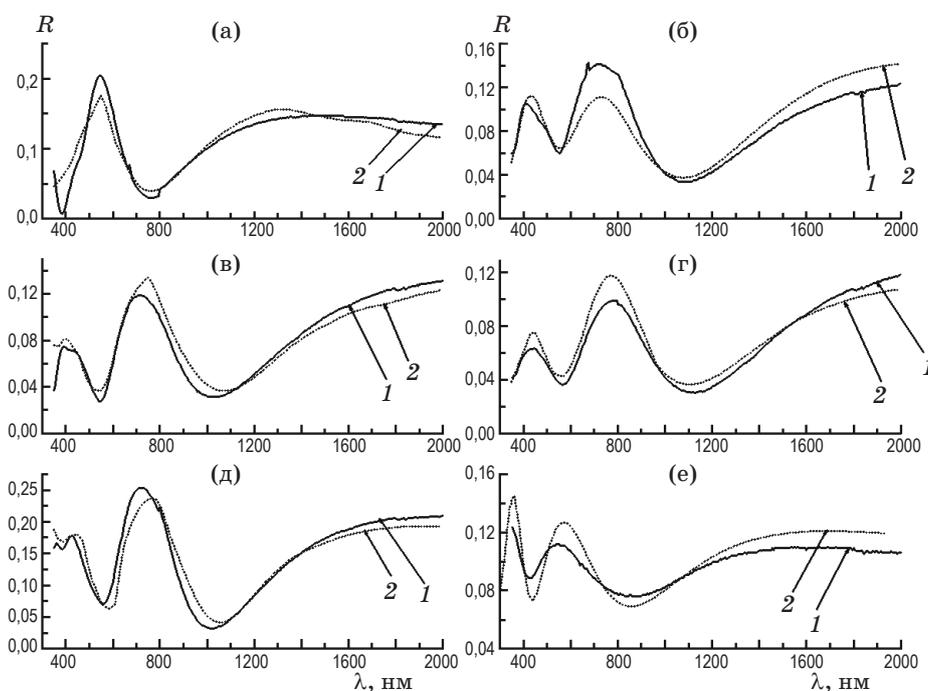


Рис. 1. Результаты обратного расчета и измерения спектров отражения композитов ППК-Ag с объемным содержанием серебра 5 (а), 7 (б), 9 (в), 11 (г), 15 (д) и 0% (е). Кривые 1 – экспериментальные, 2 – расчетные.

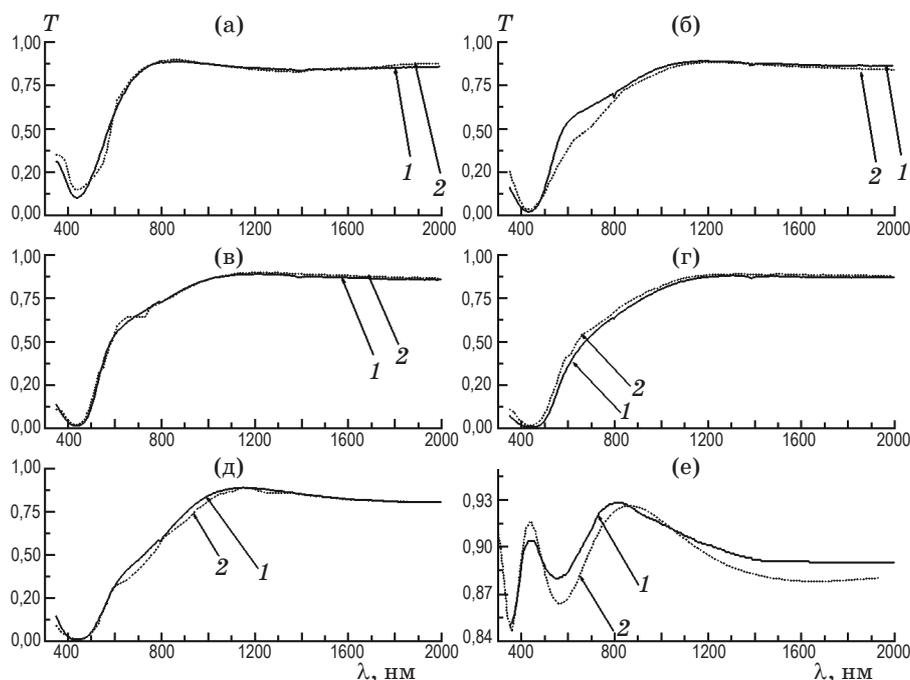


Рис. 2. Результаты обратного расчета и измерения спектров пропускания композитов ППК-Ag с объемным содержанием серебра 5 (а), 7 (б), 9 (в), 11 (г), 15 (д) и 0% (е). Кривые 1 – экспериментальные, 2 – расчетные.

света в материале, которое при измерениях на спектрофотометре учитывается как поглощение. Данные факторы объясняют погрешности измерений и небольшое рассогласование экспериментальных данных и данных обратного расчета.

Результаты и обсуждение

Расчетным способом были получены значения n и k композита ППК-Ag, результаты приведены на рис. 3, 4. Из них следует, что удалось получить материал с изменениями коэффициента преломления в диапазоне 1,4–2,4 и коэффициента экстинкции в диапазоне 0,001–0,6. Подобный разброс значений указывает на возможность создания интерференционных фильтров [6]. Поглощение у чистого ППК в расчетном диапазоне отсутствует.

На основе полученных оптических характеристик были рассчитаны интерференционные полимерные фильтры, отсекающие ультрафиолетовую (УФ) и видимую области оптического спектра, такие как фильтры для диапазона 300–2000 нм, отсекающие УФ и видимую области спектра до 1300 нм, а также фильтры для диапазона 350–850 нм, отсекающие ближнюю УФ область. Фильтры состоят из чередующих-

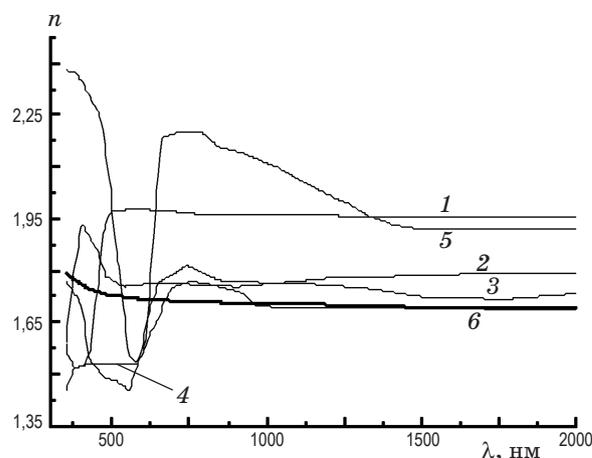


Рис. 3. Коэффициенты преломления металлополимерного композита ППК-Ag с различными объемными содержаниями серебра. 1 – 5, 2 – 7, 3 – 9, 4 – 11, 5 – 15, 6 – 0%.

ся слоев композита и прозрачного в видимой области диэлектрика.

В табл. 1, 2, 3 представлены результаты расчета толщин слоев фильтров и их схемы. Фильтры представляют собой систему из 16 и 17 чередующихся слоев диэлектрика и композита. Фильтры 1 и 2 отсекают видимую и ближнюю УФ области спектра и демонстрируют рез-

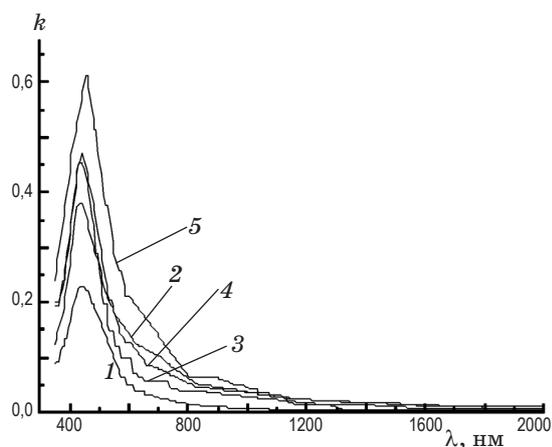


Рис. 4. Коэффициенты экстинкции металло-полимерного композита ППК-Ag с различными объемными содержаниями серебра. 1 – 5, 2 – 7, 3 – 9, 4 – 11, 5 – 15%.

Таблица 1. Схема и толщина слоев фильтра 1 ВК7[(ППК+15% Ag)SiO₂]₈. Подложка – стекло марки ВК7, $n = 1,50127$, $k = 0,001$

| Номер слоя | Материал | Толщина геометрическая, нм |
|---------------|------------------|----------------------------|
| 1 | SiO ₂ | 878,99 |
| 2 | ППК+15% Ag | 2430,20 |
| 3 | SiO ₂ | 508,05 |
| 4 | ППК+15% Ag | 344,18 |
| 5 | SiO ₂ | 536,12 |
| 6 | ППК+15% Ag | 2218,02 |
| 7 | SiO ₂ | 567,44 |
| 8 | ППК+15% Ag | 1827,75 |
| 9 | SiO ₂ | 537,75 |
| 10 | ППК+15% Ag | 1815,84 |
| 11 | SiO ₂ | 8537,74 |
| 12 | ППК+15% Ag | 2277,29 |
| 13 | SiO ₂ | 2551,72 |
| 14 | ППК+15% Ag | 2267,96 |
| 15 | SiO ₂ | 2592,20 |
| 16 | ППК+15% Ag | 2398,66 |
| Общая толщина | | 32289,91 |

Примечание. SiO₂ был выбран как аналог гибкого тонкого полимера, совпадающий с ним по значениям n и k .

кую линию отрезания. Их описание приведено в табл. 1, 2, спектры пропускания – на рис. 5. Фильтр 3 (табл. 3) предназначен для отрезания ближнего ультрафиолета и пропускает только видимую и ближнюю инфракрасную области

Таблица 2. Схема и толщина слоев фильтра 2 ВК7[(ППК+15% Ag)ППК]₈. Подложка – стекло марки ВК7, $n = 1,50127$, $k = 0,001$

| Номер слоя | Материал | Толщина геометрическая, нм |
|---------------|------------|----------------------------|
| 1 | ППК | 250,17 |
| 2 | ППК+15% Ag | 1262,46 |
| 3 | ППК | 141,24 |
| 4 | ППК+15% Ag | 143,81 |
| 5 | ППК | 102,07 |
| 6 | ППК+15% Ag | 1180,86 |
| 7 | ППК | 150 |
| 8 | ППК+15% Ag | 1001,73 |
| 9 | ППК | 150 |
| 10 | ППК+15% Ag | 1000 |
| 11 | ППК | 150 |
| 12 | ППК+15% Ag | 1184,31 |
| 13 | ППК | 150 |
| 14 | ППК+15% Ag | 1000 |
| 15 | ППК | 150 |
| 16 | ППК+15% Ag | 1219,67 |
| Общая толщина | | 9236,32 |

Таблица 3. Схема и толщина слоев фильтра 3 ВК7[ППК(ППК+5% Ag)]₈. Подложка – стекло марки ВК7, $n = 1,50127$, $k = 0,001$

| Номер слоя | Материал | Толщина геометрическая, нм |
|---------------|-----------|----------------------------|
| 1 | ППК | 102,53 |
| 2 | ППК+5% Ag | 150 |
| 3 | ППК | 187,51 |
| 4 | ППК+5% Ag | 66,66 |
| 5 | ППК | 622,88 |
| 6 | ППК+5% Ag | 150 |
| 7 | ППК | 467 |
| 8 | ППК+5% Ag | 150 |
| 9 | ППК | 798,02 |
| 10 | ППК+5% Ag | 150 |
| 11 | ППК | 249,97 |
| 12 | ППК+5% Ag | 150 |
| 13 | ППК | 1806,82 |
| 14 | ППК+5% Ag | 216,52 |
| 15 | ППК | 391,97 |
| 16 | ППК+5% Ag | 162,18 |
| 17 | ППК | 247,8 |
| Общая толщина | | 6069,86 |

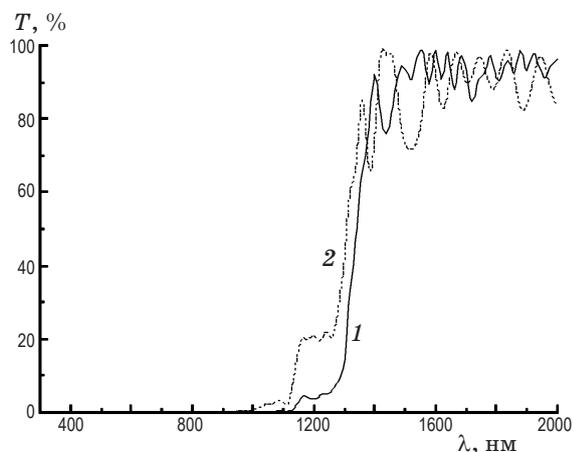


Рис. 5. Спектры пропускания фильтров ВК7[(ППК+15% Ag)ППК]×8 (1) и ВК7[(ППК+15% Ag)SiO₂]×8 (2).

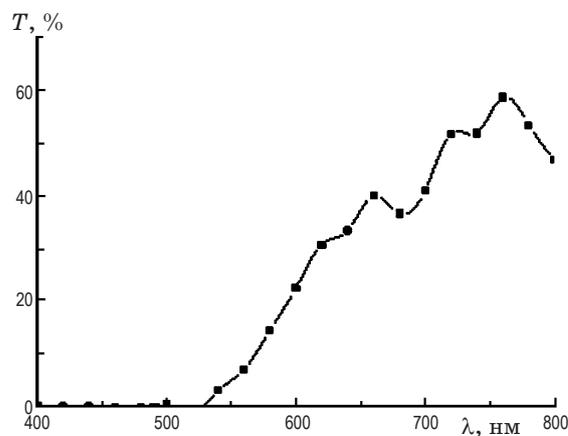


Рис. 6. Спектр пропускания фильтра ВК7 [ППК(ППК+5% Ag)]×8.

с максимумом пропускания на длине волны 850 нм. Спектр его пропускания приведен на рис. 6.

Представленные фильтры обладают простой архитектурой и по своим характеристикам, резкости линии отрезания и коэффициенту пропускания, не уступают коммерческим интерференционным отрезающим фильтрам [7, 8].

Заключение

Показана возможность создания оптической металлополимерной композитной среды полипараксилилен-серебро с вариацией содержания

металла, обуславливающей изменение коэффициентов преломления и экстинкции в пределах, соответственно, 1,4–2,4 и 0,001–0,6. Проведен расчет оптических параметров n , k этой среды.

Показана возможность создания на ее основе интерференционных отрезающих фильтров с простой архитектурой, не уступающих по своим характеристикам аналогичным коммерческим отрезающим интерференционным фильтрам.

Работа поддержана грантами РФФИ 10-02-90466-Укр_а, 10-02-91750-АФ_а, 11-02-92475-МНТИ_а.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Богинская И.А., Гусев А.В., Маилян К.А., Мешков А.С., Пибалк А.В., Чвалун С.Н., Рыжиков И.А. Полимерные пленки поли-*p*-ксилилена для применения в микро- и оптоэлектронике // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 17–22.
2. Богинская И.А., Гусев А.В., Маилян К.А., Озерин С.А., Пибалк А.В., Рыжиков И.А., Седова М.В., Чвалун С.Н. Структура и электропроводность пленочных металлополимерных нанокомпозитов поли-пара-ксилилен-серебро // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 1. С. 1–7.
3. Богинская И.А., Гусев А.В., Рыжиков И.А. Металлополимерный нанокомпозит поли-пара-ксилилен-Ag для микро- и оптоэлектронике // Тез. докл. VI междунар. конф. молодых ученых и специалистов “Оптика-2009”. Санкт-Петербург, 2009. С. 163.
4. Богинская И.А., Быков И.В., Виноградов А.П., Гусев А.В., Дорофеев А.В., Маилян К.А., Озерин С.А., Пибалк А.В., Рыжиков И.А., Чвалун С.Н., Седова М.В. Оптические характеристики металлополимерного нанокомпозита полипараксилиленсеребро // Тез. докл. XI ежегод. научн. конф. ИТПЭ РАН. Москва, 2010, 29 марта–1 апреля. С. 40.

5. Гребеничиков И.В., Власов А.Г., Непорент Б.С., Суйковская Н.В. Просветление оптики: уменьшение отражения света поверхностью стекла. М.: ОГИЗ, 1946. 212 с.
 6. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А.В., Бакаев М.И., Белова И.В., Бубис И.Я., Вейденбах В.А., Воронцова Н.М., Данилов С.В., Дудкина Н.Ю., Духопел И.И., Кузнецов С.М., Куклева З.А., Листратова Г.В., Назарова В.Я., Понфиленок Е.Н., Петров Б.И., Петровский Г.Т., Повещенко В.П., Придатко Г.Д., Прохорчик С.М., Савушкин В.Н., Соколова Р.С., Сайковская Н.В., Тарановская Л.В., Торбин И.Д., Черезова Л.А., Чунин Б.А., Шатилов А.В., Шепурев Э.И., Широкива З.Б., Ягмхоров В.Х. Справочник технолога-оптика, 2-е изд., переработанное и дополненное / Под ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
 7. Edmund Optics Catalog for Optics and Optical Instrument. Barrington, New Jersey: Edmund Optics Inc., 2009. P. 304.
 8. *Stransky R., Wheathley J.* Polymer optical interference filters // Optics&Photonics News. 2002. V. 13. № 11. P. 34–50.
-