

Моделирование спектров поглощения пленок для нахождения их оптических констант

Е. Н. Котликов[✉], В. М. Андреев, Н. П. Лавровская, Г. В. Терещенко

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

✉ ekotlikov45@mail.ru

Аннотация. Достижение максимальной потенциальной дальности действия, эффективная передача контраста и получение изображений, характеризующихся более высоким отношением сигнал/шум, достигается в системах технического зрения с оптическими антеннами, которые характеризуются коэффициентом прозрачности, близким к максимальному. Часто подобные системы используют для получения изображения когерентные источники подсвета и инфракрасного диапазона. Техническая реализация оптических систем, предназначенных для работы в подобных системах, требует разработки просветляющих и защитных покрытий интерференционного типа. Качество их синтеза базируется на решениях задачи нахождения оптических констант, особенно для пленок, для которых в рассматриваемой части спектра существуют диссипативные потери энергии. Поиск констант пленок с использованием спектрофотометрического метода измерения осложнен неоднозначностью процедуры анализа спектрофотометрических спектров. В настоящей статье используется методика, позволяющая минимизировать ошибки подобного анализа. Она основана на коррекции спектров пленок с учетом диссипативных потерь, связанных с коэффициентом поглощения. Спектры корректируются с помощью модели поглощающей пленки. Проведен расчет влияния формы модели на точность коррекции спектров на поглощение. Данная методика для позволила получить частотные зависимости оптических констант пленок BaMgF_4 на длинах волн от 1.3 до 27 мкм.

Ключевые слова: оптические константы, поглощение, спектр, методика моделирования

Для цитирования: Моделирование спектров поглощения пленок для нахождения их оптических констант / Е. Н. Котликов, В. М. Андреев, Н. П. Лавровская, Г. В. Терещенко // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 10. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Modeling of the Absorption Spectra of Films for a Finding Optical Constants

Е. Н. Kotlikov[✉], V. M. Andreev, N. P. Lavrovskaya, G. V. Tereshchenko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia

✉ ekotlikov45@mail.ru

Abstract. Achieving the maximum potential range, effective contrast transmission and obtaining images characterized by a higher signal-to-noise ratio is achieved in vision systems with optical antennas, which are characterized by a transparency coefficient close to the maximum. Often such systems use coherent illumination and infrared sources to obtain an image. The technical implementation of optical systems designed to work in sys-

tems of this type requires the development of antireflection and protective coatings of interference type. The quality of their synthesis is based on solving the problem of finding optical constants, especially for films for which there are dissipative energy losses in the considered part of the spectrum. The search for film constants using the spectrophotometric measurement method is complicated by the ambiguity of the procedure for analyzing spectrophotometric spectra. In this paper, a technique is used to minimize the errors of such an analysis. It is based on the correction of film spectra taking into account dissipative losses characterized by an absorption coefficient. Correction of the spectra is carried out by using an absorbing film model. The influence of the model shape on the accuracy of correction of absorption spectra is calculated. This technique allowed us to obtain the frequency dependences of the optical constants of BaMgF₄ films at wavelengths from 1.3 to 27 microns.

Keywords: optical constants, absorption, spectrum, modeling technique

For citation: Kotlikov E. N., Andreev V. M., Lavrovskaya N. P., Tereshchenko G. V. Modeling of the Absorption Spectra of Films for a Finding Optical Constants // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 10. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-10-5-12.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. При разработке приемных и передающих оптических антенн для систем технического зрения с искусственным лазерным монохромным подсветом, предназначенных для работы в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн, одна из основных задач заключается в сведении к минимуму энергетических потерь на переотражение светового потока. Если ввести функцию, определяющую коэффициент пропускания T (на рабочей длине волны λ) для оптического слоя конечной ненулевой толщины, то ее можно записать в виде

$$T_{\text{сл}}(\lambda) = 1 - [R_{\text{сл}}(\lambda) + A_{\text{сл}}(\lambda)],$$

где $R_{\text{сл}}(\lambda)$ – коэффициент отражения от внешней границы раздела, а $A_{\text{сл}}(\lambda)$ – коэффициент поглощения, учитывающий потери энергии электромагнитной волны в материале слоя. При разработке оптической антенны с многослойным просветляющим и защитным покрытием интерференционного типа, состоящим из чередующихся слоев пленочных материалов, необходимо максимизировать коэффициент пропускания с учетом явления переотражения от границ разделов оптических сред с разными показателями преломления и наличия потерь энергии в слоях покрытия. Это можно сделать только в том случае, когда удастся исследовать оптические свойства пленки и определить зависимость показателя преломления пленки $n(\lambda)$ и ее коэффициента поглощения $k(\lambda)$ от длины волны. Указанные параметры также называют оптическими константами (ОК) [1]. Нас будут интересовать ОК пленочных материалов в той части инфракрасной области спектра, для которой уже существует множество когерентных оптических генераторов, которые могут вы-

ступать в качестве источников искусственного подсвета. Задача поиска ОК наиболее часто решается за счет применения спектрофотометрических методов, в основе которых лежит экспериментальное измерение зависимостей $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$. Эффективность их применения давно подтверждена высокой корреляцией ожидаемых теоретических и экспериментальных данных, полученных в [1]–[8]. Данный подход к оценке ОК получил название (R, T) -метода. Именно с его помощью были получены и результаты исследований, представленные в настоящей статье.

Следует отметить, что точность (R, T) -метода в значительной степени зависит от применяемой методики обработки экспериментальных результатов. Дело в том, что задача определения ОК исследуемых пленок по результатам измерений спектров отражения и пропускания некорректна. Одному и тому же значению R может соответствовать целый набор значений n , а учитывая, что существует еще и инструментальная погрешность, вопрос корректности методики становится очень существенным. Таким образом, получение наиболее достоверных значений спектральных характеристик ОК исследуемых пленок требует критического подхода к проверке корректности методики обработки результатов эксперимента.

Сложность решаемой задачи обусловлена тем, что не существует единого универсального метода оценки ОК реальных пленок по данным, полученным в ходе спектрофотометрических измерений для оптической системы, состоящей из исследуемой пленки, размещенной на подложке из материала, оптические свойства которого заранее известны. Сложность поиска корректного решения такой обратной задачи связано, в первую

очередь, с неоднозначностью методик, используемых для нахождения ОК из спектров отражения и пропускания [8].

Процедуру поиска ОК пленок из T - R -спектров можно провести как аналитическими, так и численными методами. В основе аналитических методов лежит поиск математических однозначных функций, которые могут быть применены для непосредственного расчета оптических констант при определенных частных условиях [2]–[5]. Так, например, хорошие результаты при использовании этой группы методов получаются в случае оценки ОК для непоглощающих пленок.

Численные методы базируются на различных оптимизационных решениях [6]–[10]. Поиск ОК требует нахождения решения нелинейных уравнений для энергетических коэффициентов R и T системы пленка–подложка на длине волны λ посредством минимизации следующей функции качества:

$$F = \sum_{i=1}^N \left| L_{\text{расч}}(n_i, \lambda_i) - L_{\text{эксп}}(\lambda_i) \right| W(\lambda_i),$$

где $L_{\text{расч}}(n_i, \lambda_i)$ и $L_{\text{эксп}}(\lambda_i)$ – расчетная и измеренная в ходе эксперимента величины коэффициента пропускания T или отражения R ; $W(\lambda_i)$ – весовой коэффициент; λ_i – длины волн, при которых проводились соответствующие оптические измерения. Это направление, предложенное для исследования тонких пленок в [10], также в основном применялось при нахождении ОК пленок без диссипативных потерь.

В настоящей статье для решения задачи было выбрано альтернативное направление поиска ОК пленок и материалов проходной оптики, которое базируется на коррекции спектров на поглощение в них [6]–[8] с последующим использованием минимизационных методов. Такая коррекция позволяет упростить задачу, поскольку поглощением в спектрах после коррекции можно пренебречь. Таким образом, в предположении, что поглощение равно нулю ($A = 0$), при обработке спектров одна переменная полностью исключается, что существенно облегчает задачу поиска ОК известными методами. Данным методом найдены показатели преломления и коэффициенты поглощения пленок BaMgF_4 на кремнии в диапазоне спектра 1.3...27 мкм. Ранее такие пленки изучались только в диапазоне прозрачности подложек из ZnSe до 1...14 мкм [11].

Описание метода. Основы и особенности применения методики оценки показателей преломления n_f и коэффициентов экстинкции k_f для

пленок, имеющих в исследуемом спектральном диапазоне полосы поглощения, излагаются в [6]–[8]. Методика предполагает проведение коррекции спектральных зависимостей ОК пленок на поглощение [6], [7]. После коррекции задача определения показателей преломления пленок сводится к определению показателей преломления непоглощающих пленок, которое рассмотрено в [8].

В настоящей статье анализируется точность используемого метода на основе сравнения результатов определения оптических констант пленок на поглощающей подложке при использовании различных моделей с разными значениями коэффициентов поглощения.

Данным методом найдены показатели преломления и коэффициенты поглощения пленок BaMgF_4 на кремнии в диапазоне спектра 1.3...27 мкм. Ранее такие пленки изучались только в диапазоне прозрачности подложек из ZnSe до 12...14 мкм [7], поскольку эти подложки реально прозрачны только до длин волн 14...16 мкм. Оптические пленки BaMgF_4 изготавливались посредством термического испарения спеченных исходных материалов пленки в вакууме при температуре подложки 150 °С [13]. Спектры пленок снимались на Фурье-спектрофотометре ФСМ-1202. Механически пленки BaMgF_4 намного более твердые и влагостойкие, чем аналогичные пленки фторида бария. Механически более прочны пленки фторида иттрия. Однако эти пленки разрушаются при толщинах в несколько микрометров. Спектры пленок не меняли своих характеристик при длительном хранении в лабораторных условиях.

Коррекция спектров с учетом поглощения происходила в несколько этапов. На первом этапе измерялись спектры подложек. По ним находились коэффициенты экстинкции (k_s) и показатели преломления (n_s) подложки по методу, описанному в [14]. Найденные спектральные зависимости $k_s(\lambda)$ и $n_s(\lambda)$ применялись в качестве исходных данных для программы синтеза интерференционных покрытий Film Manager [12]. Поглощение в подложке при таком подходе учитывается автоматически и с очень высокой точностью.

На втором этапе учитывается поглощение в пленке. Предположим, что нами измерены спектры отражения $R_{\text{экс}}$ и пропускания $T_{\text{экс}}$ пленок на подложке. Тогда полное экспериментально найденное поглощение $A_{\text{экс}}$, очевидно, может быть определено по формуле

$$A_{\text{экс}} = 1 - (R_{\text{экс}} + T_{\text{экс}}).$$

С другой стороны, полное поглощение $A_{\text{экс}}$ складывается из поглощений в спектрах отражения A_{fs}^r и пропускания A_{fs}^t . Для выражения A_{fs}^r и A_{fs}^t через $A_{\text{экс}}$ вводятся функции коррекции f_r и f_t :

$$\begin{aligned} A_{fs}^r &= f_r A_{\text{экс}}; \\ A_{fs}^t &= f_t A_{\text{экс}}. \end{aligned}$$

Отметим, что определенные выше функции коррекции связаны соотношением $f_r + f_t = 1$.

Спектры пленки R_0 и T_0 , в которой поглощение было бы равно нулю, могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_{\text{экс}} + A_{fs}^r = R_{\text{экс}} + f_r A_{\text{экс}}; \\ T_0 &= T_{\text{экс}} + A_{fs}^t = T_{\text{экс}} + f_t A_{\text{экс}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из этого следует, что функции коррекции могут быть выражены через известные спектры R_0 , T_0 , $R_{\text{экс}}$ и $T_{\text{экс}}$:

$$\begin{aligned} f_r &= (R_0 - R_{\text{экс}}) / A_{\text{экс}}; \\ f_t &= (T_0 - T_{\text{экс}}) / A_{\text{экс}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Нахождение f_r и f_t некорректно, поскольку, как уже отмечалось, нет однозначной связи оптических констант пленки с коэффициентами отражения и пропускания пленки на подложке [8]. Но если бы удалось каким-либо образом определить f_r и f_t , то по известным $R_{\text{экс}}$ и $T_{\text{экс}}$ можно было бы из (1) легко найти спектры R_0 и T_0 .

Чтобы обойти эту трудность, применим для определения f_r и f_t численное моделирование. При этом модель пленки на подложке подберем так, чтобы рассчитанные спектры качественно соответствовали экспериментальным. Толщина пленки h_f и коэффициент преломления n_f определяются из экспериментально полученного спектра. Чтобы модель соответствовала реальным спектрам фторидов, заложим в нее поглощение в характерных областях инфракрасного диапазона.

Случай пленки, нанесенной на непоглощающую подложку, рассмотрен в [6], где показано, что форма спектров поглощения почти не влияет на вид функций коррекции f_r и f_t . Далее будет

рассмотрена более сложная модель, когда пленка нанесена на поглощающую подложку. Речь пойдет о кремнии в диапазоне длин волн до 25 мкм. Будут сделаны расчеты для разных моделей и показано, насколько выбор конкретной модели влияет на вид функций коррекции f_r и f_t .

Итак, рассмотрим пленку BaMgF_4 на подложке из кремния. Сравним спектры – экспериментальные и расчетные.

Экспериментальные спектры пленки BaMgF_4 на подложке из кремния приведены на рис. 1. Там же приведен спектр отражения от пленки, нанесенной на подложку в виде клина. Последний случай характерен тем, что в спектре нет отражения от обратной стороны пластины. Следовательно, поглощение в подложке не отражается в спектре. Кроме того, в точках, в которых отражение равно отражению от поверхности кремния, показатель преломления пленки равен единице, что становится хорошим репером при анализе показателя преломления пленки.

С целью проверки, насколько сильно функции коррекции f_r и f_t зависят от оптических параметров конкретной модели, были построены три разные модели пленки на подложке, отличающиеся спектром поглощения. Затем по этим моделям были рассчитаны спектры пропускания и поглощения пленки на подложке, и уже по расчетным спектрам определены соответствующие функции коррекции.

Для построения моделей и дальнейшего численного расчета спектров отражения и пропускания необходимо выбрать конкретные значения расчетных параметров. Поскольку требуется подобрать модели, спектры которых качественно соответствуют экспериментальным, была применена программа анализа спектров Film Manager [12], которая позволяет ввести в качестве исходного любой экспериментально полученный спектр, например приведенный на рис. 1. Результат работы программы заключается в определении оптических констант исследуемой оптической системы.

Подбор параметров проводился в два этапа. Сначала были определены оптические константы подложки по методике, описанной в [14]. Значение показателя преломления подложки было зафиксировано для всех расчетных моделей и численно равно 1.39.

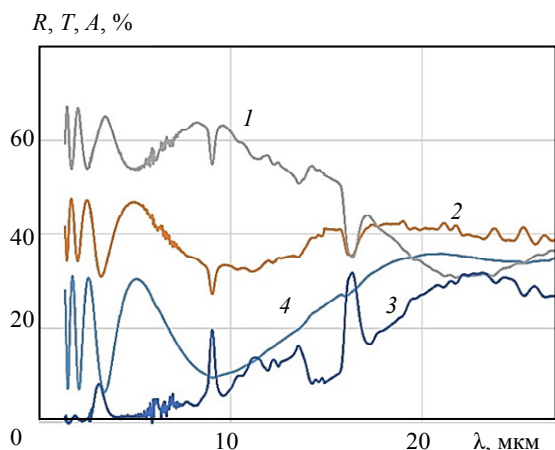


Рис. 1. Экспериментальные спектры пленки BaMgF₄ на подложке из кремния:
 1 – спектр пропускания, 2 – спектр отражения, 3 – спектр поглощения, 4 – спектр отражения на подложке в виде клина
 Fig. 1. Experimental spectra of the BaMgF₄ film on a silicon substrate:
 1 – transmission spectrum, 2 – reflection spectrum, 3 – absorption spectrum, 4 – reflection spectrum on a wedge-shaped substrate

Оптическая толщина пленки также была определена из экспериментального спектра, для чего диапазон длин волн был ограничен интервалом 1.3...2.5 мкм, где диссипативные потери ни в пленке, ни в подложке можно не учитывать. Полученные в результате анализа экспериментального спектра значения толщины пленки $h = 1.738$ мкм и коэффициента преломления пленки $n = 1.437$ были взяты для построения всех трех расчетных моделей пленки.

В результате были разработаны три расчетные модели, которые отличались только разными спектрами поглощения пленки. Разные виды диссипативных потерь пленки привели в итоге к разным расчетным спектрам поглощения и пропускания моделей. Рассчитанные спектры моделей поглощающей пленки на поглощающей подложке приведены на рис. 2.

Заключительный этап численного моделирования – определение функций коррекции по расчетным спектрам $R_{\text{мод}}$, $T_{\text{мод}}$ и $A_{\text{мод}}$ моделей. Как видно из (2), для этого достаточно произвести еще один расчет спектров отражения $R_{0\text{мод}}$ и пропускания $T_{0\text{мод}}$ в предположении, что поглощение как в пленке, так и в подложке отсутствует.

Полученных в результате численного моделирования спектров достаточно для расчета функций коррекции каждой из построенных моделей поглощающей пленки на подложке из кремния. Соответствующие функции получают в результате простой обработки расчетных спектров:

$$f_r \text{ мод} = (R_{0\text{мод}} - R_{\text{мод}}) / A_{\text{мод}};$$

$$f_t \text{ мод} = (T_{0\text{мод}} - T_{\text{мод}}) / A_{\text{мод}}.$$

На рис. 3 приведены функции коррекции $f_r \text{ мод}$ и $f_t \text{ мод}$ для каждой из трех расчетных моделей. Видно, что функции коррекции для разных моделей похожи, несмотря на то, что спектры поглощения моделей (рис. 2) отличаются достаточно сильно.

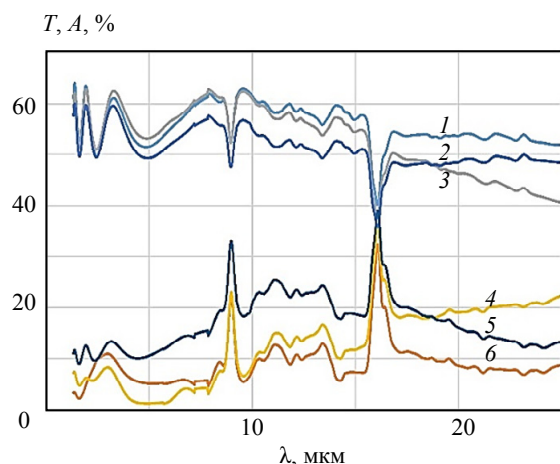


Рис. 2. Спектры моделей пленок:
 1, 2, 3 – спектры пропускания моделей;
 4, 5, 6 – спектры поглощения моделей
 Fig. 2. Spectra of film models:
 1, 2, 3 – transmission spectra of models;
 4, 5, 6 – absorption spectra of models

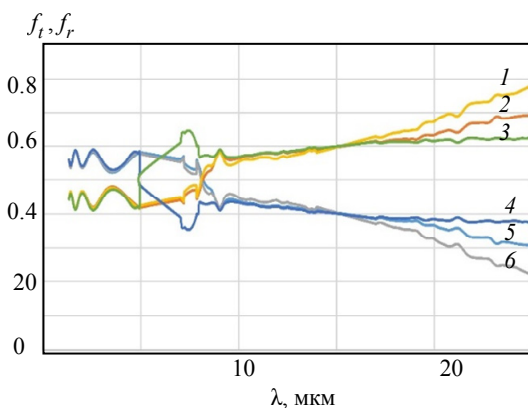


Рис. 3. Спектры функций коррекции:
 1, 2, 3 – функции коррекции f_t ;
 4, 5, 6 – функции коррекции f_r
 Fig. 3. Spectra of correction functions:
 1, 2, 3 – correction functions f_t ;
 4, 5, 6 – correction functions f_r

Наконец, можно попытаться применить полученные в результате численного моделирования расчетные функции коррекции для разных моделей, чтобы обработать экспериментальные спектры в соответствии с (1), где в качестве функций

коррекции f_r и f_t будут подставлены функции коррекции моделей $f_{r\text{ мод}}$ и $f_{t\text{ мод}}$:

$$R_{0\text{ кор}} = R_{\text{экс}} + f_{r\text{ мод}} A_{\text{экс}};$$

$$T_{0\text{ кор}} = T_{\text{экс}} + f_{t\text{ мод}} A_{\text{экс}}.$$

Погрешность коррекции поглощения в пленке можно оценить по разнице численных значений скорректированных спектров для разных использованных в расчетах моделей.

Предложенная методика позволила провести коррекцию экспериментально полученных спектров отражения и пропускания пленки для случая отсутствия поглощения. Скорректированные спектры приведены на рис. 4. Видно, что результаты коррекции с применением различных расчетных функций коррекции очень хорошо согласуются. В области от 1.3 до 16 мкм они совпадают друг с другом с точностью до 0.3 %. Расхождение в длинноволновой области спектра связано с тем, что показатель преломления пленки меньше единицы, что сказывается на точности определения функций коррекции. Это свидетельствует о том, что выбор конкретной модели поглощающей пленки оказывается совершенно некритичным для поставленной задачи.

В [3] предложено находить отдельно поглощения в подложке A_s и в подложке с нанесенной пленкой A_{fs} . Поглощение в пленке A_f находится как $A_f = A_{fs} - A_s$, при этом мы пренебрегаем старшими по сравнению с линейной зависимостью степенями. Коэффициент поглощения k в этом случае имеет погрешность определения порядка $A_{fs}A_s$. При поглощении в несколько процентов ошибка определения k составляет доли процента и ею можно пренебречь. При поглощении порядка десятков процентов ошибка большая, и пренебрегать ею нельзя. Анализ ошибок предложенного метода при нахождении коэффициента экстинкции не проводился, поэтому в данной статье поглощение A_f рассчитывается на основе модельных представлений о поглощении в пленке и подложке из кремния и измеренных значений поглощения в подложке, а также оценивается точность предлагаемого метода. Прямое нахождение коэффициента поглощения k_f из спектров – это некорректная обратная задача, которая не имеет решения [8]. В настоящей статье для нахождения k предлагается использовать функции коррекции f_k , с помощью которых нахо-

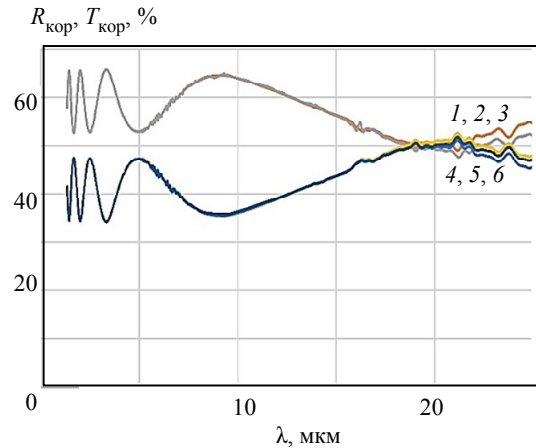


Рис. 4. Спектры пленки BaMgF₄, скорректированные на поглощение с использованием различных моделей пленок:

1, 2, 3 – коэффициент отражения $R_{\text{кор}}$;

4, 5, 6 – коэффициент пропускания $T_{\text{кор}}$

Fig. 4. Absorption-corrected BaMgF₄ film spectra

using different film models:

1, 2, 3 – reflection coefficient $R_{\text{кор}}$;

4, 5, 6 – transmittance $T_{\text{кор}}$

дится $A_f = f_k A_{sf}$. Функции коррекции f_k определяются с помощью моделей спектров поглощающих пленок и измеренных спектров подложек.

По скорректированным спектрам можно рассчитать спектральную зависимость оптических констант пленки по методу, описанному в [4].

Расчет k проводился численным методом с помощью программы Film Manager, позволяющей рассчитать A_f , A_s и A_{fs} по заданным значениям коэффициентов экстинкции пленки и подложки. Поглощение в пленке A_f и коэффициент экстинкции k связаны соотношением [1]

$$A_f = 4\pi nkd / \lambda,$$

где d – геометрическая толщина пленки, которая определяется из спектров.

На рис. 5 приведены результаты измерения показателей преломления (кривая 1) и коэффициентов экстинкции (кривая 2) пленок BaMgF₄ в диапазоне спектра 1.3...27 мкм. В области 1.3...16 мкм они согласуются с результатами измерений в [7].

Заключение. В ходе проведенных исследований определены спектры показателей преломления n и коэффициентов экстинкции k для тонкой пленки BaMgF₄ в интервале длин волн инфракрасной части оптического диапазона от 1.3 до 27 мкм. Данные по оптическим константам

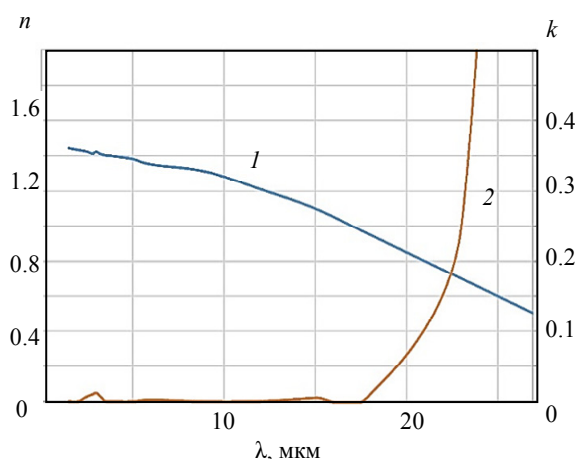


Рис. 5. Оптические константы пленки BaMgF₄:

1 – показатель преломления n ;

2 – коэффициент экстинкции k

Fig. 5. Optical constants of the BaMgF₄ film:

1 – refractive index n ; 2 – extinction coefficient k

BaMgF₄ в указанном диапазоне в литературе отсутствуют. Их оценка была проведена с использованием экспериментальных данных о спектрах

отражения и пропускания. В качестве материала подложек использовался кремний, отличающийся высокой прозрачностью в указанном диапазоне спектра, но имеющий несколько полос поглощения. Для улучшения качества оценивания ОК спектры пленок были скорректированы на поглощение. Проведен сравнительный анализ применения различных моделей спектров. С использованием численных методов определены дисперсионные зависимости коэффициента преломления пленки BaMgF₄ от 1.3 до 27 мкм. Оптические пленки двойных фторидов механически прочны, влагостойки и не меняли своих параметров после длительного хранения. Их можно рекомендовать для реализации интерференционных покрытий оптических антенн систем технического зрения с активным подсветом инфракрасного диапазона.

Работа выполнена при финансовом участии министерства образования и науки РФ, грант № FSRF-2020-0004.

Список литературы

1. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. Poelman D., Smet P. F. Methods for the determination of the optical constants of thin films from single transmission measurements: a critical review // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 1850–1857.
3. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination // Thin Solid Films. 2011. No. 520. P. 501–509.
4. Tropin A. N. Film's forming materials for optical coatings: new problems and perspectives (a review) // Advances in Appl. Physic. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 204–211.
5. Filippov V. V. Analytical method of determining the optical constants and the thickness of absorbing films from the reflection spectra // Optics and Spectroscopy. 1995. Vol. 78, no. 5. P. 798–801.
6. Котликов Е. Н., Юрковец Е. В. Метод определения оптических констант поглощающих пленок. Подложки без поглощения // ОЖ. 2018. Т. 85, № 1. С. 59–64.
7. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Юрковец Е. В. Метод определения оптических констант пленок на поглощающих подложках // ОЖ. 2018. Т. 85, № 10. С. 59–64.
8. Котликов Е. Н. Метод нахождения оптических констант пленок // ОЖ. 2021. Т. 88, № 7. С. 56–63.
9. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
10. Kotlikov E. N., Tereshchenko G. V. Investigation of the optical constants of films used for the synthesis of broadband antireflection coatings // Opt. and Spectroscopy. 1997. Vol. 82, no. 4. P. 653–659.
11. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А. Оптические константы пленок MgBaF₄ в диапазоне спектра 1.3–16 мкм // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019, № 10. С. 9–14.
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. Справочник технолога – оптика. Справочник / под общ. ред. М. А. Окатова. СПб.: Политехника. 2004. 679 с.
14. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Тропин А. Н. Проектирование и изготовление интерференционных покрытий. СПб.: ГУАП, 2016. 288 с.

Информация об авторах

Котликов Евгений Николаевич – доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП.
E-mail: ekotlikov45@mail.ru

Андреев Владимир Михайлович – кандидат физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП.
E-mail: andreev.vm@gmail.com

Лавровская Наталья Павловна – кандидат физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП.

E-mail: adele1993@mail.ru

Терещенко Георгий Викторович – кандидат физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП.

E-mail: gvter@yandex.ru

References

1. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Oxford: Pergamon Press, 1970.
2. Poelman D, Smet P. F. Methods for the determination of the optical constants of thin films from single transmission measurements: a critical review // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 1850–1857.
3. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination // Thin Solid Films. 2011. No. 520. P. 501–509.
4. Tropin A. N. Film's forming materials for optical coatings: new problems and perspectives (a review) // Advances in Appl. Physic. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 204–211.
5. Filippov V. V. Analytical method of determining the optical constants and the thickness of absorbing films from the reflection spectra // Optics and Spectroscopy. 1995. Vol. 78, no. 5. P. 798–801. (In Russ.).
6. Kotlikov E. N., Jurkovec E. V. Metod opredeleniya opticheskikh konstant pogloshhajushhih plenok. Podlozhki bez pogloshheniya // OZh. 2018. T. 85, № 1. S. 59–64. (In Russ.).
7. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A., Jurkovec E. V. Metod opredeleniya opticheskikh konstant pljonok na pogloshhajushhih podlozhkah // OZh. 2018. T. 85, № 10. S. 59–64. (In Russ.).
8. Kotlikov E. N. Metod nahozhdeniya opticheskikh konstant plenok // OZh. 2021. T. 88, № 7. S. 56–63. (In Russ.).
9. Vasil'ev F. P. Chislennye metody resheniya jekstremal'nyh zadach. M.: Nauka, 1980. 520 s. (In Russ.).
10. Kotlikov E. N., Tereshchenko G. V. Investigation of the optical constants of films used for the synthesis of broadband antireflection coatings // Opt. and Spectroscopy. 1997. Vol. 82, no. 4. P. 653–659.
11. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A. Opticheskie konstanty plenok MgBaF₄ v diapazone spektra 1.3–16 mkm // Izv. SPbGETU «LETI». 2019, № 10. S. 9–14. (In Russ.).
12. Kotlikov E. N., Kovalenko I. I., Novikova Ju. A. Programma sinteza i analiza interferencionnyh pokrytij Film Manager // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 2015. № 3 (76). S. 51–59. (In Russ.).
13. Spravochnik tehnologa – optika. Spravochnik / pod obshh. red. M. A. Okatova. SPb.: Politehnika. 2004. 679 s. (In Russ.).
14. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A., Tropin A. N. Proektirovanie i izgotovlenie interferencionnyh pokrytij. SPb.: GUAP, 2016. 288 s. (In Russ.).

Information about the authors

Evgeniy N. Kotlikov – Dr of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Leading Researcher, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Engineering.

E-mail: ekotlikov45@mail.ru

Vladimir M. Andreev – Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Engineering.

E-mail: andreev.vm@gmail.com

Natalya P. Lavrovskaya – Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Engineering.

E-mail: adele1993@mail.ru

Georgy V. Tereshchenko – Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Engineering.

E-mail: gvter@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13.10.2022; принята к публикации после рецензирования 26.10.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.

Submitted 13.10.2022; accepted 26.10.2022; published online 25.12.2022.