

УДК 535.321: 535.32

Метод нахождения оптических констант пленок по спектрам отражения и пропускания

© 2021 г. **Е. Н. Котликов, доктор физ.-мат. наук**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург

E-mail: ekotlikov45@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-07-57-64

Проведен анализ возможности определения оптических констант пленок по их спектрам пропускания и отражения. Показаны неоднозначность такой задачи в отдельных точках или на небольших участках спектра и пути ее решения. Предложен спектрофотометрический метод нахождения оптических констант пленок, включающий коррекцию спектров на поглощение и последовательное использование заданных участков спектра. Определяется оптимальная ширина участков спектра для нахождения однозначного решения. В качестве примера данным методом определены оптические константы пленки CaY_2F_8 в диапазоне спектра 1,3–17 мкм.

Ключевые слова: анализ, однозначность решения, пленки, показатели преломления, спектрофотометрический метод, спектры пропускания, отражения, коррекция.

Коды OCIS: 300.0300, 310.4165

ВВЕДЕНИЕ

Среди оптических характеристик материалов и пленок одно из основных мест принадлежит оптическим константам (ОК) — показателю преломления n и коэффициенту поглощения α (или коэффициенту экстинкции k) [1]. Они являются основными фундаментальными характеристиками, определяющими свойства материалов и пленок, и требуются при конструировании проходной оптики и интерференционных покрытий. Одними из наиболее распространенных методов их определения являются спектрофотометрические, в которых используются спектры отражения R , пропускания T и поглощения $A = 1 - R - T$ [2–7]. Недостатком этого метода является неоднозначность решения уравнения спектров пленок относительно ОК. В работе описывается метод нахождения ОК пленок, включающий коррекцию спектров на поглощение и пошаговое прохождение выде-

ленных участков спектра. Предлагаемый метод позволяет получать однозначные значения ОК.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для определения ОК пленок по спектрам используются аналитические и численные методы [1–7]. В настоящее время не существует единого универсального метода определения оптических параметров реальных пленок по спектрофотометрическим данным. Это связано с тем, что задача определения параметров пленки по спектрам отражения и пропускания является типичной некорректной обратной задачей синтеза, не имеющей однозначного решения. Ее решение существенно зависит от наличия априорной информации о специфических особенностях исследуемых пленок и выбора метода решения.

Рассмотрим основные методы определения ОК пленок по спектрам отражения и пропускания. Первая группа методов предполагает поиск аналитических выражений для прямого расчета ОК. Примером такого подхода являются публикации [2–6]. В работе [2] получены основные уравнения спектра непоглощающих пленок и рассматриваются их решения для нахождения показателей преломления. В работах [3, 4] находятся аналитические уравнения для слабо поглощающих пленок в точках, соответствующих экстремумам спектров. В работах [5, 6] при нахождении поглощения в пленках используют метод плавной огибающей по экстремумам пропускания. Методы удобны при работе с пленками, свободными от поглощения. Их ограничения заключаются в том, что можно находить показатели преломления только в отдельных точках спектра, а также в том, что при наличии полос поглощения они неприменимы.

Вторая группа базируется на различных оптимизационных методах синтеза [6–7]. Для синтеза оптических пленок и покрытий используется метод минимизации функции качества [8]. Этот метод заключается в нахождении минимума функции отклонения (функции качества) рассчитанного спектра от заданного экспериментально при вариации оптических параметров. В работе [9] было предложено для расчета ОК пленки использовать минимизацию функции качества вида

$$F(n_2, k_2, h_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |M_{\text{exp}}(\lambda) - M_{\text{theor}}(n_2, k_2, \lambda)| d\lambda, \quad (1)$$

где M_{theor} , M_{exp} — рассчитанные и экспериментальные спектры отражения или пропускания пленок, n_2 и k_2 — показатели преломления и коэффициенты экстинкции пленки, h_2 — ее толщина, λ_1 и λ_2 граничные длины волн участка спектра, на котором находятся ОК пленки. Таким образом, поиск ОК сводится к поиску значений показателей преломления, коэффициента экстинкции (поглощения) и толщины пленки, при которых функция

качества минимальна. Вопрос однозначности нахождения ОК для частного случая рассматривался в работе [10]. Ранее в литературе в общем виде он не обсуждался.

Как правило, аналитические и численные методы применимы для непоглощающих пленок. При наличии сильных полос поглощения использование аналитических и численных методов без дополнительных ограничений невозможно в общем виде.

Третья группа методов базируется на нахождении свободных от поглощения спектров пленок, которые могут анализироваться одним из перечисленных выше методов. В работе [11] описан метод коррекции спектров пленок или материалов подложек на поглощение, которое присутствует в пленках и подложках вместе или отдельно.

АНАЛИЗ ОДНОЗНАЧНОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ СПЕКТРОВ ПЛЕНОК

Рассмотрим возможность решения уравнения спектра пленки на подложке относительно показателя преломления. В случае спектров, свободных от поглощения, или скорректированных на поглощение, нахождение ОК затруднительно или просто невозможно в отдельных точках спектра. Это связано с тем, что уравнение спектра пленки трансцендентное [1] и не имеет однозначного решения. Кроме того, число точек в спектрах отражения и пропускания $2N$ меньше числа неизвестных, так как есть еще неизвестная величина — толщина пленки h_2 , т.е. число неизвестных равно $2N + 1$.

Для наглядности рассмотрим случай пленки без поглощения. Пленка с коэффициентом преломления n_2 расположена между двумя средами — 1 и 3. Среда 1 — воздух $n_1 = 1$, среда 3 — подложка конечной толщины с коэффициентом преломления n_3 , среда 2 — пленка с коэффициентом преломления n_2 и геометрической толщиной h_2 . Отражение от пленки R_0 , пропускание T_0 , при отсутствии поглощения $T_0 + R_0 = 1$.

Расчет спектров пленки на полубесконечной подложке приведен в работе [1]. Имеем в случае пропускания T_{1-2-3} и отражения R_{1-2-3} пленки на подложке

$$R_{1-2-3} = (r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta) / (1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta), \quad (2)$$

$$T_{1-2-3} = (n_3/n_1) [(t_{12}^2 t_{23}^2) / (1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta)], \quad (3)$$

где r_{ik} и t_{ik} — френелевские амплитудные коэффициенты отражения и пропускания, β — набег фазы при прохождении слоя пленки толщиной h_2 , $\beta = 2\pi n_2 h_2 / \lambda_0$ [1].

Уравнения (2), (3) являются трансцендентными уравнениями четвертой степени. Аналитического решения они не имеют. Поэтому анализ решения уравнения спектра пленок проводился в численном виде с использованием программ FilmMgr [12] и созданной на ее базе программы FilmAnalysis [13], в которой имелись дополнительные опции, позволяющие реализовывать описываемый ниже метод. Программа FilmMgr включает следующие подразделы: «Ввод данных» — для ввода используемых дисперсионных спектров показателей преломления и поглощения пленок и материалов, «Результаты» — для численного вывода рассчитанных результатов, «График» — для графического вывода спектров всех заданных и рассчитанных результатов, «Материалы» — для задания дисперсионных спектров показателей преломления пленок и материалов. Программа предназначена для анализа и синтеза оптических пленок и интерференционных покрытий. В этой программе для нахождения ОК пленок и покрытий, а также толщины пленок ведется поиск минимума функции качества с использованием уравнения (1). В расчетах учитывалось отражение от обратной стороны подложки. Для минимизации функции качества используются оптимизационные методы случайного перебора в диалоговом режиме с переменным шагом поиска и квадратичной аппроксимацией Пауэлла [8]. Детально работа и опции программы описаны в публикации [12].

На рис. 1 представлены рассчитанные спектры пропускания пленки заданной геометрической толщины $h_2 = 7,364$ мкм с различными коэффициентами преломления ($n_2 = 1,35$ – $1,45$) на подложке из селенида цинка ($n_3 = 2,45$). Выбранная толщина соответствует толщине реально изготавливаемой и исследуемой пленки CaY_2F_8 .

Из рис. 1 видно, что для заданного значения коэффициента пропускания при одинаковой геометрической толщине пленки в точках пересечения спектров имеется два значения n_2 . Это значит, что при поиске решений методом минимизации функции качества (1)

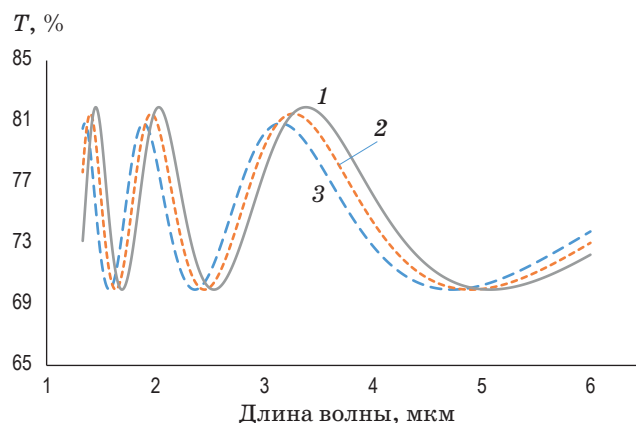


Рис. 1. Спектры пропускания пленки при показателях ее преломления 1,45 (1), 1,40 (2), 1,35 (3).

возможны переходы от одного значения n_2 к другому, которое может значительно отличаться от предыдущего.

Области неоднозначности решений лежат вблизи экстремумов пропускания (или отражения). Кроме того, существуют области, где число решений больше двух при небольших отклонениях в коэффициенте пропускания. Так, например, на длине волны 5,3 мкм значения коэффициента пропускания трех кривых совпадают с точностью до $\pm 0,3\%$ (рис. 1). Таким образом получается, что при нахождении решения уравнения спектра пленки в этой области не получается единственного решения. Это относится к любому методу нахождения показателя преломления, в том числе и при нахождении решения методом минимизации функции качества и аналитическими методами [3–7, 9].

Из проведенного анализа следует, что прямой метод нахождения ОК в отдельных точках спектра или на небольшом его участке с использованием минимума функции качества (1) или аналитические методы невозможны даже при известной толщине пленки. Дополнительным усложняющими факторами являются наличие полос поглощения в спектрах и неизвестная толщина пленки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ ПЛЕНКИ CaY_2F_8

Для иллюстрации предлагаемого метода нахождения ОК в работе использовались пленки CaY_2F_8 . Пленки изготавливались в вакууме на установке ВУ-2М путем электронно-

лучевого испарения с использованием установки ЭЛИ-22 [14]. Температура подложек при напылении поддерживалась $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контроль толщины напыляемых пленок и скоростей осаждения конденсата осуществлялся фотометрическим методом. Толщина определялась по экстремумам в спектре пропускания в тех областях, где поглощение в пленках отсутствует (или оно незначительно), а дисперсия показателя преломления невелика. В качестве пленкообразующего материала использовалась спеченная в вакууме до однородного состава смесь CaF_2 и YF_3 . В качестве подложек для напыления использовались образцы из селенида цинка марки CVD [14] плоскопараллельной или клиновидной формы. Спектры отражения R , пропускания T и поглощения A находились с использованием фурье-спектрофотометра *Bruker Vertex 70* в диапазоне $1,3\text{--}20\text{ }\mu\text{м}$. Погрешности измерения спектров пропускания и отражения оценивались как $\pm 0,2\%$. Экспериментальные спектры пропускания, отражения и поглощения пленки CaY_2F_8 на плоскопараллельной подложке из селенида цинка в диапазоне $1,3\text{--}20\text{ }\mu\text{м}$ приведены на рис. 2.

КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРОВ ПЛЕНКИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ

Экспериментальные спектры корректировались на поглощение в них. Рассмотрим используемый метод коррекции спектров на поглощение [11]. Метод базируется на том, что поглощение A является аддитивной величиной и его можно представить в виде суммы вкладов поглощения в отражении A_R и в пропускании A_T , т.е. $A = A_T + A_R$. Тогда имеем

$$A_R = R_0 - R, \quad A_T = T_0 - T, \quad (4)$$

где R_0, T_0 — коэффициенты отражения и пропускания непоглощающей пленки, которая имеет те же значения коэффициента преломления, что и поглощающая пленка. Зная A_R и A_T , можно скорректировать спектры на поглощение, прибавив их к коэффициентам отражения и пропускания.

Для нахождения $A_R(\lambda)$ и $A_T(\lambda)$ используются функции коррекции f_R и f_T , которые определяют вклад полного поглощения A в $A_R(\lambda)$

и $A_T(\lambda)$. Функции коррекции f_R и f_T можно задать как

$$f_R = \frac{R_0 - R}{A}, \quad f_T = \frac{T_0 - T}{A}. \quad (5)$$

Функции коррекции f_R и f_T отражают долю искажений, вносимых общим поглощением A в отражение и пропускание отдельно, поэтому их сумма должна равняться единице $f_R + f_T = 1$.

Скорректированные спектры отражения и пропускания определяются по формулам

$$R_{\text{corr}} = R + f_R A, \quad T_{\text{corr}} = T + f_T A. \quad (6)$$

Как следует из формул (4), для нахождения f_R и f_T необходимо знать R_0 и T_0 , т.е. спектры, свободные от поглощения. В конечном счете, их нахождение и является нашей задачей. Найти аналитическое выражение для ОК из спектров, свободных от поглощения, не представляется возможным в силу того, что однозначного решения для них нет. Смоделировать спектр поглощения, соответствующий реальному, практически невозможно, так как это также является обратной задачей, схожей по сложности с нахождением ОК.

Для расчета функций коррекции предложена следующая методика [11]. Вводится модель поглощающей пленки, спектры которой приблизительно соответствуют экспериментальным спектрам рассматриваемой пленки, и рассчитываются спектры такой модели R , T и A . Также рассчитываются спектры отражения и пропускания модели пленки с теми же самыми коэффициентами преломления, что и поглощающая пленка. Их рассчитанные спектры обозначим как R_0, T_0 . После расчета R_0, T_0, R, T и A можно будет рассчитать функции коррекции различных моделей пленок по формулам (6). Функции коррекции будут использованы для коррекции реальных спектров пленок. Расчет спектров R_0, T_0, R, T, A и функций f_R и f_T проводился по программе *FilmMgr* [12], в которой предусмотрена возможность введения дисперсии коэффициентов преломления и поглощения пленок.

Найденные функции коррекции зависят от параметров пленки и формы спектра поглощения. В работе [11] проведен анализ влияния амплитуды и формы спектров поглощения

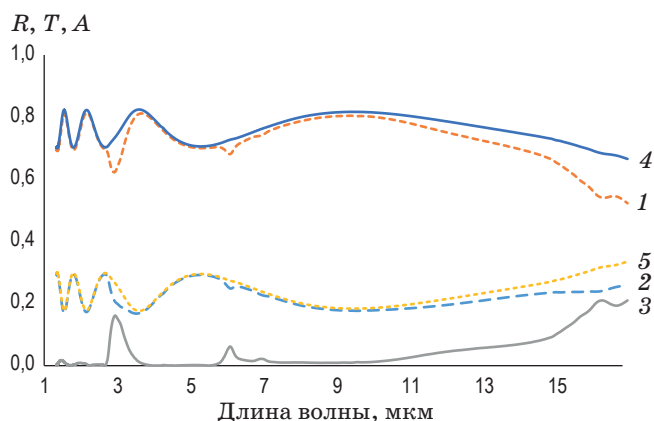


Рис. 2. Экспериментальные спектры пропускания T (кривая 1), отражения R (кривая 2), поглощения A (кривая 3) пленки CaY_2F_8 на плоскопараллельной подложке из селенида цинка в диапазоне 1,3–20 мкм и скорректированные на поглощение спектры пропускания (4) и отражения (5) пленки CaY_2F_8 .

на функции коррекции. Для этого использовались спектры поглощения, имеющие разные амплитуды и формы. Анализ показал, что ошибки при коррекции спектров не превышают погрешности измерения самих спектров.

Данным методом были найдены спектры пленки CaY_2F_8 , свободные от поглощения. На рис. 2 приведены скорректированные на поглощение спектры пропускания и отражения пленки CaY_2F_8 .

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Предлагаемый «Пошаговый метод» заключается в нахождении ОК на небольшом участке i спектра $\Delta\lambda_i$ с последующим переходом на соседний участок $\Delta\lambda_{i+1}$ спектра в области $\Delta\lambda$ с шагом $\delta\lambda$. Затем процедура повторяется по всей задаваемой области спектра $\Delta\lambda$, при этом $\Sigma\Delta\lambda_i = \Delta\lambda$. Предполагается, что на небольшом участке спектра $\Delta\lambda_i$ показатель преломления не меняется. Кроме того, используется найденная на выбранном участке спектра $\Delta\lambda^* \leq \Delta\lambda$ толщина пленки h_2 . В работе было рассмотрено влияние ширины используемого участка спектра $\Delta\lambda_i$ на однозначность нахождения показателя преломления n_2 . Не анализируя решения, можно утверждать, что с увеличением $\Delta\lambda_i$ решение должно детерминироваться, т.е. возможность неоднозначного решения снижается.

На первом этапе находится толщина пленки h_2 и среднее значение ее показателя преломления. Для этого используется достаточно большая область спектра $\Delta\lambda$, в которой имеется ряд экстремумов и отсутствует поглощение. Из рис. 2 видно, что в области 1,33–2,60 мкм поглощение в экспериментальных спектрах мало (лежит в пределах точности измерения спектра порядка 0,3%) и имеются несколько экстремумов. Эта область использована для нахождения геометрической толщины пленки и среднего значения показателя преломления. Было найдено $h_2 = 7,364$ и $\langle n_2 \rangle = 1,402$. При дальнейших расчетах пошаговым методом использовалось найденное значение h_2 . Найденное значение $\langle n_2 \rangle$ бралось в качестве первого приближения, которое в процессе оптимизации структур варьировалось. При нахождении показателя преломления n_2 однозначность решения определялась путем сравнения значений n_2 , найденных на разных участках спектра пленки.

Возможность нахождения ОК методами, основанными на минимизации функции качества (1), и пошаговое прохождение участков спектра рассмотрим на примере спектров пленки CaY_2F_8 . Иллюстрация возможности применения описываемого метода проведена в области спектра 2,60–17,0 мкм. В этом диапазоне были использованы экспериментальные и коррелированные на поглощение спектры, приведенные на рис. 2 (кривые 4 и 5). Предварительно определялись показатели преломления подложки n_3 из ZnSe методом, описанным в публикации [13], с использованием программы FilmMgr в диапазоне 1,33–2,5 мкм. Полученное значение показателя преломления подложки — 2,433 с точностью $\pm 0,005$, соответствует известным литературным данным [14, 15].

Расчеты показателей преломления пленки проводились в программе FilmAnalysis [10]. В этой программе реализованы все опции программы FilmMgr. Дополнительно введена опция «Пошаговый метод».

Рассмотрим работу программы, реализующей «Пошаговый метод». В ней предусмотрено введение файла экспериментального спектра и показателя преломления подложки. Из спектра выделяется нужный участок $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$, задается требуемое число точек спектра, т.е. задается $\Delta\lambda_i$ и шаг $\delta\lambda$. После этого

он вводится в программу «Пошаговый метод». На выделенном участке спектра $\Delta\lambda_i$ из всего заданного спектра $\lambda_1-\lambda_2$ (см. (1)) ищется показатель преломления n_i , после нахождения которого программа переходит к следующему участку спектра $\Delta\lambda_{i+1}$ с шагом δ_i , на котором ищется показатель преломления n_{i+1} . Таким образом проходится весь спектр $\lambda_1-\lambda_2$. При этом $\Sigma\Delta\lambda_i = \lambda_1 - \lambda_2$. На вариации показателя преломления накладываются дополнительные условия по ограничению изменения значения показателя преломления. Эти ограничения связаны с возможным переходом от одного значения n_2 к другому вследствие неоднозначности нахождения n_2 . Полученные спектры дисперсии показателя преломления выводятся в графическом и численном виде.

Также для найденных значений показателя преломления n_2 выводятся в численном виде спектр пропускания (отражения) и разность между рассчитанным по найденному значению n_2 спектру пропускания $T_{\text{теор}}$ и экспериментально полученным T_{Exp}

$$\Delta T = |T_{\text{теор}}(n_2) - T_{\text{Exp}}(n_2)|. \quad (7)$$

Как было сказано, в диапазоне спектра $\lambda_1-\lambda_2$ (1,33–2,60 мкм) поглощение пленки и подложки незначительно (менее 0,3%) и в спектре имеется несколько экстремумов. Поэтому именно этот диапазон был выбран для нахождения геометрической толщины пленки и среднего значения показателя преломления пленки в этом диапазоне, как было описано выше. При этом показатель преломления подложки варьировался до получения минимума функции качества (1).

Наличие нескольких (больше или равных двум) экстремумов в спектре давало однозначное решение для толщины пленки и среднего значения показателя преломления. Однозначность значений n_2 определялась их сравнением между собой при варьировании значений диапазонов спектра $\Delta\lambda \leq (\lambda_1 - \lambda_2)$ в пределах 1,3–2,5 так, чтобы в этом диапазоне было не менее 2 любых из 5 экстремумов. Дополнительно на участках спектра $\Delta\lambda$ находилась геометрическая толщина пленки, которая равнялась 1,871 мкм (в долях $\lambda/4$), и среднее значение показателя преломления 1,402. Толщина получалась одинаковой с точностью не хуже 0,003 на всех используемых участках спектра.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 приведены результаты нахождения зависимости показателя преломления n_2 и коэффициента экстинкции k описанным методом от длины волны в диапазоне спектра 1,3–3,5 мкм при разных значениях $\Delta\lambda_i$. Использовались скорректированные на поглощение пленки. В качестве примера приведены спектры n_2 и разности спектров пропускания экспериментального и рассчитанного по найденному по дисперсии показателя преломления — $\Delta T = |T_{\text{теор}}(n_2) - T_{\text{Exp}}(n_2)|$ в диапазонах $\Delta\lambda_i = 0,007$ мкм и 0,017 мкм с шагом 0,0011 мкм.

На участке $\Delta\lambda_i = 0,007$ мкм в областях, соответствующих экстремумам спектра пропускания 1,36, 1,56, 1,80, 2,15, 2,70 и 3,58 мкм (см. рис. 3), наблюдаются резкие изменения показателя преломления. При увеличении используемого участка спектра $\Delta\lambda_i$ до 0,2–0,3 мкм эти изменения исчезали. Таким образом, выбор участка анализируемого спектра $\Delta\lambda_i$ позволяет однозначно находить показатель преломления n_2 .

Точность метода иллюстрируется (см. (11)) средним разбросом $\langle\Delta T\rangle$ между рассчитанным $T_{\text{теор}}(n_2)$ и экспериментально полученным $T_{\text{Exp}}(n_2)$. Расчет показал, что $\langle\Delta T\rangle = 0,003$. Рассчитанные значения $T_{\text{теор}}(n_2)$ при разных значениях $\Delta\lambda_i$ отдельно не приведены на рис. 2, так как они сливаются с экспериментальным спектром, несмотря на вариации в показателе преломления. Таким образом, точность описанного спектрофотометрического метода нахождения показателя преломления можно оценить в пределах $\pm 0,003$.

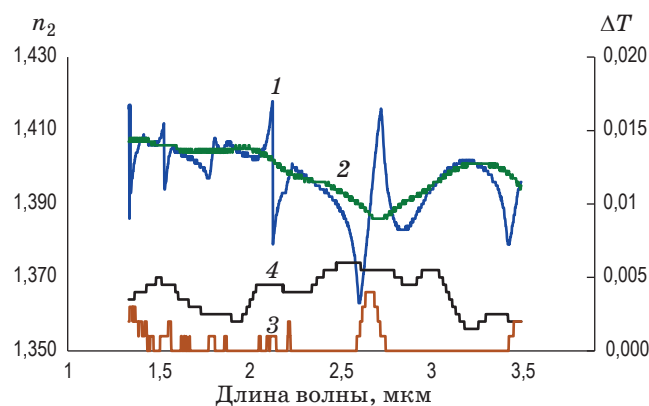


Рис. 3. Спектры показателя преломления n_2 при $\Delta\lambda_i$ 0,007 (1) и 0,017 (2) мкм и ошибок ΔT при $\Delta\lambda_i$ 0,007 (3) и 0,017 (4) мкм.

Также проводились расчеты с использованием моделей пленок и подложки для определения точности предлагаемого метода. Точность оценивалась по минимуму функции качества для каждого значения показателя преломления подложки. Проводилась вариация показателя преломления подложки в пределах 2,35–2,45 с шагом 0,01. Расчеты в спектральном диапазоне 1,3–2,5 мкм показали, что минимум функции качества получается при $n_2 = 2,43$, что соответствует найденному для этого диапазона значению n_3 .

Из рис. 3 видно, что с увеличением $\Delta\lambda_i$ кривая становится более плавной и исчезают резкие изменения показателя преломления. Одновременно увеличивается разница между рассчитанным $T_{\text{теор}}(n_2)$ и экспериментальным $T_{\text{эксп}}(n_2)$. Все это определяется тем, что используется более широкая область спектра $\Delta\lambda_i$.

Проведенный анализ показывает, что для однозначного нахождения решения уравнения спектров требуется использовать $\Delta\lambda_i$ порядка 0,2–0,3 доли от расстояния между экстремумами пропускания в спектре пленки, т.е.

$$\Delta\lambda_i \approx 0,25[\lambda_{\text{extr}(i)} - \lambda_{\text{extr}(i\pm 1)}]. \quad (8)$$

Таким образом, уравнение (8) задает разрешающую способность предлагаемого метода.

Для нахождения коэффициента экстинкции использовались спектры поглощения подложки из селенида цинка A_S и спектры поглощения подложки с пленкой A_{FS} . Поглощение в пленке A_F определялось исходя из следующих соображений. Полное поглощение A_{FS} может быть разложено в степенной ряд по A_S и A_F . Поскольку A_S^2 , A_F^2 и $A_SA_F \ll 1$, пренебрегая членами второго порядка малости, имеем

$$A_{FS} = A_F - A_S, \quad A_F = A_{FS} - A_S. \quad (9)$$

Отсюда и находим поглощение в пленке A_F .

Расчет k проводился численным методом. Для этого использовалась программа FilmAnalysis, в которой предусмотрен расчет A_{FS} , A_S и A_F по заданным значениям коэффициента экстинкции пленки, подложки и их толщин. Поглощение в пленке A_F и коэффициент экстинкции k связаны хорошо известным [1] уравнением

$$A_F = 4\pi n k h / \lambda.$$

Так же с использованием программы FilmAnalysis находились показатели преломления по отражениям от пленки, нанесенной на клиновидные подложки. В этом случае отражение от задней поверхности отсутствует. Кроме того, на спектрах отражения практически не сказывается поглощение в подложке.

Для оценки погрешности измерения по программе рассчитывалось отклонение значения отражения пленки ΔR на подложке из селенида цинка с учетом поглощения ($k_3 = 0,0001$) и без учета поглощения в подложке ($k_3 = 0$). На длине волны 10 мкм коэффициент поглощения α в этих случаях будет примерно равен 30 см^{-1} , что при толщине подложки 0,4 см соответствует поглощению более 99,9%. При показателе преломления 2,40, значение которого соответствовало среднему значению показателя преломления селенида цинка на длине волны 10 мкм, найденное ΔR равнялось 0,0011, что меньше погрешности измерения. Для найденного значения α отличие в отражении от поглощающей подложки и от поверхности будет менее 0,001. Тем самым показана возможность нахождения ОК по отражениям от поверхности полубесконечной подложки при наличии высокого поглощения.

Результаты расчетов спектров преломления n_2 и коэффициентов экстинкции k пленки CaY_2F_8 приведены на рис. 4.

Расчеты показали, что на участке спектра 2,60–3,50 мкм зависимость показателя преломления от длины волны имела форму дисперсионной кривой, связанную с наличием полосы поглощения вблизи 3 мкм. Наличие дисперсионной кривой свидетельствует о достаточном разрешении описанного метода.

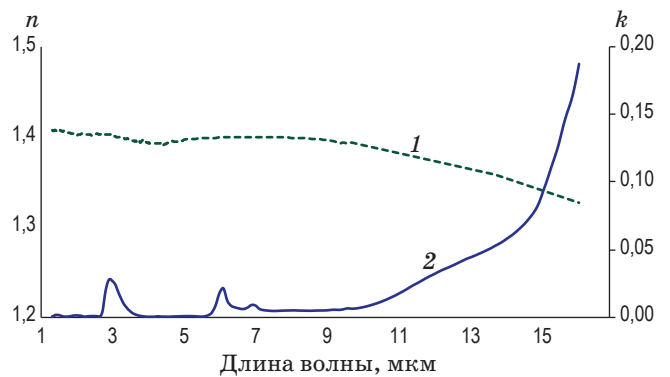


Рис. 4. Дисперсия показателя преломления n_2 (1) и коэффициента экстинкции k (2) пленки CaY_2F_8 .

Описанный метод можно использовать во всех диапазонах спектра. Однако он требует знания показателя преломления подложки с точностью порядка 0,002 и погрешности измерения спектров пропускания и отражения пленки, а также подложки не хуже 0,002.

ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ возможности однозначного определения оптических констант пленок спектрофотометрическими методами. Показано, что решение такой задачи в отдельных точках или на небольших участках спектра невозможно. Получены пути ее решения при использовании участка спектра конечной ширины и найдены ограничения предлагаемого метода.

На основании проведенного анализа предложен метод нахождения оптических констант пленок, обладающих поглощением, который можно использовать во всех диапазонах спектра. Метод апробирован на примере пленки CaY_2F_8 . По спектрам пропускания и отражения определены показатели прелом-

ления и коэффициенты экстинкции пленки в спектральном диапазоне 1,3–17 мкм.

Ограничения предлагаемого метода заключаются в следующем. Во-первых, существует минимальный размер участка спектра $\Delta\lambda$, который может быть использован для однозначного определения оптических констант пленки. В рассматриваемом случае в диапазоне спектра пленки 1–4 мкм минимально достигаемое разрешение порядка 0,1–0,2 мкм. Такое разрешение достаточно для прецизионного анализа спектра показателя преломления. Так, в области полосы поглощения пленки в диапазоне 2,7–3,5 мкм хорошо видна дисперсионная кривая. Вторым ограничением предлагаемого метода является использование спектра, свободного от поглощения. Для преодоления этого ограничения была использована коррекция спектров пропускания и отражения пленки на поглощение в ней. Это позволит находить оптические константы по предложенному выше методу.

Работа выполнена при финансировании по гранту Министерства образования и науки РФ No. FSRF-2020-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э.М. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
2. Хевенс О.С. Измерение оптических констант тонких пленок. Физика тонких пленок. Т. 2. М.: Мир, 1967. С. 136–185.
3. Андриевский Б.В., Вахулович В.Ф., Романюк Н.А. Определение дисперсии показателя преломления и толщины тонких пленок по спектрам отражения или пропускания // Опт. спектр. 1988. Т. 65. № 1. С. 136–140.
4. Коновалова О.П., Шаганов И.И. Определение оптических констант слабо-поглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке // ОМП. 1988. № 8. С. 39–41.
5. Тропин А.Н. Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 206–211.
6. 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. V. 36. P. 1850–1857.
7. Dobrowolski J.A., Waldorf A. Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 20. P. 3191–3200.
8. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач М.: Наука, 1980. 520 с.
9. Котликов Е.Н., Терещенко Г.В. Использование халькогенидных соединений для изготовления просветляющих покрытий в средней ИК области спектра // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 3. С. 110–115.
10. Котликов Е.Н., Котликов А.Н., Юрковец Е.В. Анализ спектров оптических пленок. Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем // Сб. докладов научной сессии ГУАП. СПб: ГУАП, 2016. С. 247–252.
11. Котликов Е.Н., Юрковец Е.В. Метод определения оптических констант поглощающих пленок. Подложки без поглощения // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 1. С. 59–64.
12. Котликов Е.Н., Коваленко И.И., Новикова Ю.А. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий FilmMgr // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3(76). С. 51–59.
13. Котликов Е.Н. Спектрофотометрический метод определения оптических констант материалов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 2. С. 61–67.
14. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика. СПб: Политехника. 2004. 679 с.
15. Qi H., Zhang X., Jiang M., Wang Q., Li D. Optical constants of zinc selenide in visible and infrared spectral range // Zhurnal Prikladnoii Spektroskopii. 2017. B. 84. P. 660–663.