

Численное моделирование для определения показателя преломления тонкой пленки интерференционного покрытия при использовании результатов измерения спектра отражения

Ю. А. Новикова, Е.А. Боева

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация: Практика производства оптических интерференционных покрытий показывает, что при применении новых тонкопленочных материалов, получение оптических изделий с заданными требованиями к функции качества зависит от точности значения их показателя преломления. Результаты его оценки на больших кристаллах часто отличаются от значения, характерного для тонкой пленки, что не позволяет в итоге реализовывать узкополосные фильтры с требуемыми техническими параметрами. В данной статье предлагается подход к оценке параметров показателя преломления тонкой пленки на основе решения задачи инверсного синтеза, который базируется на экспериментальном определении толщины напыленных пленок при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора толщины покрытий и данных о спектре коэффициента отражения, полученных с использованием широкополосного спектрофотометра. Проведённое в ходе исследования численное моделирование показало, что даже при наличии 5% допусков по оцениванию толщины покрытий, можно ожидать достаточно точного определения показателя преломления. Корректность результатов использования данного подхода была проверена путем использования тонкой пленки с известным показателем преломления, который также определялся и по предложенной методике численного моделирования спектра отражения цифрового двойника покрытия.

Ключевые слова: интерференционное покрытие, численное моделирование, спектр коэффициента отражения.

Введение

Современные оптические изделия, ориентированные на применение в сложных оптико-электронных комплексах, часто требуют разработки тонкопленочных интерференционных покрытий разного типа: антиотражающих покрытий, светоделителей, частотные фильтров, диэлектрических зеркал. Оптические параметры получаемых изделий проверяются на соответствие требуемым критериям или заданной функции качества [1]. Но в основе успешного синтеза покрытий лежит знание показателя преломления тонкой пленки для нужной области оптического спектра. А в случае использования нового тонкопленочного материала его

значение необходимо найти, так как оно обычно отличается от значения, характерного для монокристалла [2]. Похожую задачу требуется решать и в случае использования процедуры инверсного синтеза оптического покрытия, когда толщины слоев с разными показателями преломления измерены рентгенофлуоресцентным анализатором, а показатели преломления для одного из слоев и подложки, выполненных из хорошо изученных оптических материалов установлены.

В настоящей статье решена задача разработки алгоритма, позволяющего путем обработки экспериментальных данных о фактической толщине слоев и структуре оптического покрытия найти ранее неизвестный показатель преломления, например, для перспективных тонкопленочных материалов с новым химическим составом.

Методика оценивания неизвестного показателя преломления перспективного материала

В основе спектрофотометрии лежит взаимодействие квазимонохроматического излучения с исследуемым объектом – в данном случае, с многослойным покрытием. Но поскольку данный метод является спектральным, используется ряд длин волн, на которых и происходит измерение параметров пропускания, отражения и поглощения [3]. Схема типового спектрофотометра представлена на рис. 1.

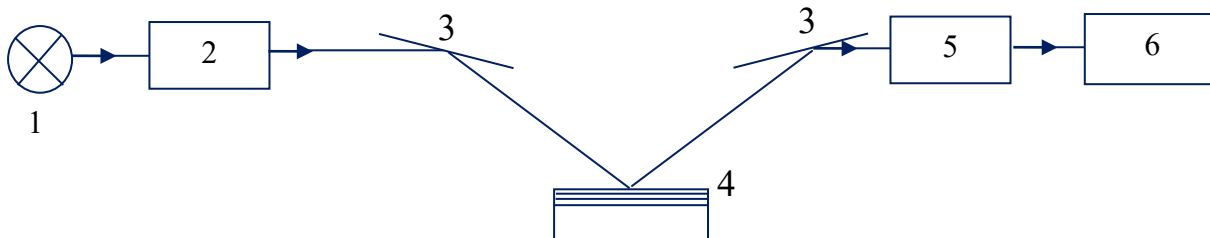


Рис. 1. – Схема типового спектрофотометра для измерения спектра коэффициента отражения

Измерение спектральных характеристик достигается за счет использования монохроматора 2, который выделяет из непрерывного спектра излучения немонахроматического источника света, например, лампы накаливания 1, определенный набор длин волн с малой шириной спектра. Специальное устройство – селектор 3 – пропускает на оптическое покрытие 4 конкретную длину волны излучения, и, далее, это излучение взаимодействует с образцом. Поочередная селекция этих длин волн приводит к распределению коэффициентов прохождения T , отражения R и поглощения A , по длинам волн. В зависимости от того, какой именно параметр определяется, на фотоприемник 5 попадает либо отраженное (как на рис.1), либо прошедшее через образец излучение (тогда схема измерений соответствующим образом трансформируется). Далее измеритель мощности 6 определяет интенсивность отраженного или прошедшего света, а поскольку интенсивность источника известна можно измерить соответствующие спектры коэффициентов отражения или пропускания.

Для примера корректности методики рассмотрим частный случай поиска показателя преломления n , принятого «неизвестным» для слоев с низким показателем преломления, которые входят в состав оптического покрытия диэлектрического интерференционного зеркала резонатора, сформированного с ошибкой по времени напыления, которая приводит к увеличению толщины слоев от заданной. Важно отметить, что зеркало должно иметь минимально возможный коэффициент поглощения в полосе генерации, особенно в импульсном режиме работы лазера, поскольку такой лазер обладает весьма большой мощностью, и поглощение такого излучения может привести к нагреву зеркала, в результате чего оно может выйти из строя [4].

В данном разделе будет рассматриваться выходное интерференционное зеркало резонатора твердотельного CO_2 лазера с максимальным

коэффициентом отражения порядка $R = 96\%$ на длине волны генерации $\lambda = 10,6$ мкм.

Математическое описание многослойной структуры ориентировано на оценку спектра, которая позволит на основе сравнения экспериментально определенного спектра отражения $R(\lambda)$ и теоретически построенного определить искомое значение показателя преломления. Для этого необходимо реализовать модель исследуемого покрытия с последовательным перебором значений n . Для каждого n производится расчет спектра отражения, являющимся функцией от λ , типа поляризации и угла падения на многослойное покрытие. Полученный спектр модели сравнивается с экспериментальным в каждой точке спектра с помощью функции качества, в качестве которой выступает оценка среднеквадратической ошибки MSE [5]:

$$MSE(n) = \frac{1}{2X} \sum_{i=1}^N (R_{\text{эксп}}(n) - R_{\text{теор}})^2,$$

где X – количество сравниваемых точек в спектрах; $R_{\text{эксп}}$ – экспериментально определенный коэффициент отражения; $R_{\text{теор}}$ – теоретически определенный коэффициент отражения модели.

После сравнения данных спектров с помощью аппроксимирующего метода наименьших квадратов значения n меняются таким образом, чтобы MSE была минимальна.

Основными материалами, из которых целесообразно изготавливать пленки с высоким n_h и низким n_l показателями преломления для нагревостойких интерференционных диэлектрических зеркал, ориентированных на работу при $\lambda=10,6$ мкм, являются: германий (Ge) с $n_h=4$ и селенид цинка (ZnSe) с $n_l=2,403$ [6,7]. В качестве подложки используется кремниевая подложка [8] с $n_s=2,33$.

Установив в качестве неизвестного показателя преломления n_l используем алгоритм поиска, приведенный на рис. 2.

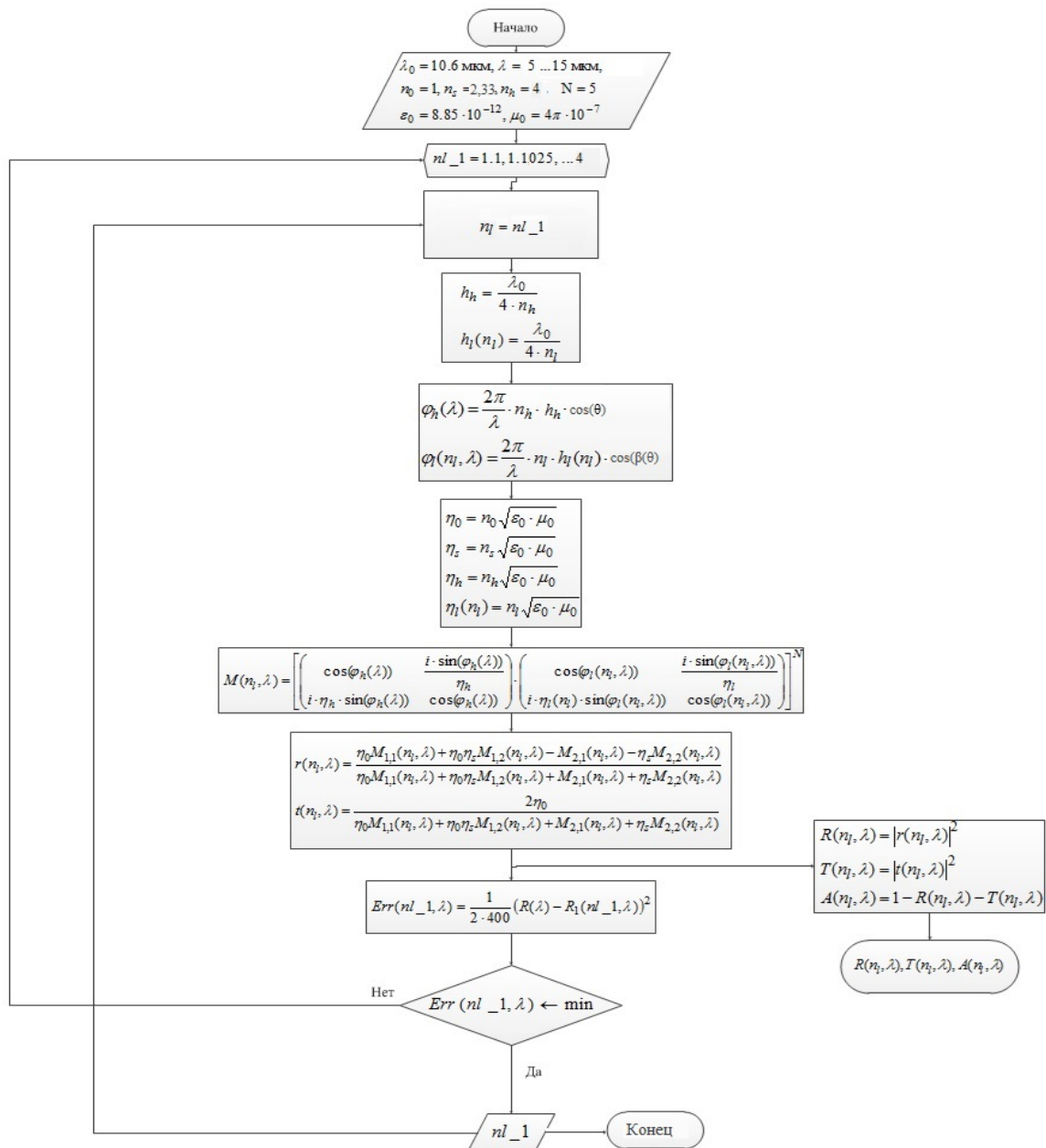


Рис. 2. – Блок схема определения неизвестного показателя преломления
(на примере диэлектрического зеркала)

В указанном алгоритме приняты следующие обозначения: N – число периодов повтора структуры: слой с высоким показателем преломления-слой с низким показателем преломления, θ – угол падения электромагнитной волны на покрытие, $\beta(\theta)$ – угол падения электромагнитной волны на границу раздела низкий слой – высокий слой, который определяется по формуле [1]

$$\beta(\theta) = \arcsin\left(\frac{\sin \theta}{n_h}\right).$$

В качестве образца для проверки методики поиска показателя преломления n_l использовались зеркало с четвертьволновыми слоями с ошибкой напыления порядка 5%, а для синтеза использовались идеальные слои. Для синтеза может быть рекомендовано программное обеспечение типа «FilmManager», описание и возможности которого хорошо описаны в [9,10]. В случае интерференционных покрытий произвольного типа толщина слоев берется из результатов измерения рентгенофлуоресцентным анализатором или из разработанной конструкторской документации.

Оценка корректности определения показателя преломления

В результате определения «неизвестного» показателя получили значение $n_l = 2,391$, которое отличается от идеального значения на 0,5%.

Соответствующий «медианный» спектр коэффициента отражения реального покрытия, полученный по результатам двадцати измерений и спектр коэффициента отражения для синтезированного зеркала с найденным показателем преломления приведены на рис.3.

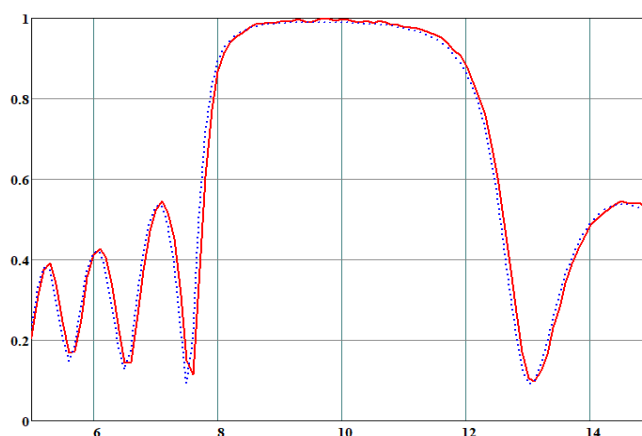


Рис. 3. – Измеренный спектр отражения и спектр отражения синтезированного зеркала с найденным показателем преломления

Посредством сравнения реального и синтезированного спектров коэффициентов отражения для диэлектрического зеркала, можно сделать вывод об их относительно малых различиях как в области длины волны излучения $\lambda=10,6$ мкм, так и в области боковых лепестков, которые говорят о корректности оценивания неизвестного показателя преломления. В более сложных оптических схемах, в которых происходит многократное переотражение от диэлектрических зеркал, требования можно предъявлять менее строгие в области боковых лепестков, поскольку они снижаются по уровню, а значимыми являются требования в частотном интервале с высоким коэффициентом отражения [11].

Заключение

Как следует из представленных результатов, предложенная методика поиска неизвестного показателя преломления, базирующаяся на алгоритме многократного синтеза с численным моделированием спектров отражения или пропускания и их сравнения с экспериментальными спектрами, снятыми на спектрофотометре при использовании функции качества в виде минимума суммы среднеквадратических отклонений, позволила получить для интерференционного зеркала с неидеальной толщиной напыленных четвертьволновых слоев (отличия от требуемой толщины порядка 5%) ошибку оценивания не более 0,5%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ «Госзадание» (проект FSRF-2023-0003 от 13.01.2023) «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Литература

1. Macleod H.A. Thin-Film optical filters. USA. CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. 697 p.
2. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Yurkovets E. V. Method for determining the optical constants of films on absorbing substrates // J. Opt. Technol. 2018. V.85. pp. 651-655.
3. Zhang C., Xiangli B., Zhao B., Yuan X. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope // Optics Communications. 2002. 203. pp. 21–26.
4. Meschede Dieter. Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Federal Republic of Germany. Mtirlenbach. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 1999. 421p.
5. Хасс Г. Физика тонких плёнок. Том 2. М.: Мир, 1967. 396 с.
6. Кульчицкий Н., Наумов А., Семенов В. Современные оптоэлектронные приборы на основе селенида цинка // Фотоника. 2015. № 6. С. 90-104.
7. Каплунов И.А., Рогалин В.Е. Оптические свойства и области применения германия в фотонике // Фотоника. 2019. № 1. С. 88-106.
8. Hasan M., Huq M.F., Mahmood Z.H. A review on electronic and optical properties of silicon nanowire and its different growth techniques // SpringerPlus. 2013. №2. URL: doi.org/10.1186/2193-1801-2-151.
9. Котликов Е. Н., Новикова Ю.А. Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 41-46.
10. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Юрковец Е.В. Синтез ахроматических светоделительных покрытий для фурье-спектрофотометров дальнего ИК-диапазона // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. № 6. С. 521-529.

11. Numata H., Nakagawa S., Taira Y. High-density optical interconnect based on precisely fabricated mirror attached waveguide // 2008 Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, Shanghai, China, 2008, pp. 1-3.

References

1. Macleod H.A. Thin-Film optical filters. USA. CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. 697 p.
2. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Yurkovets E. V. J. Opt. Technol. 2018. V.85. pp. 651-655.
3. Zhang C., Xiangli B., Zhao B., Yuan X. Optics Communications. 2002. 203. pp. 21–26.
4. Meschede Dieter. Optics, Light and Lasers: The Practical Approach to Modern Aspects of Photonics and Laser Physics. Federal Republic of Germany. Mtilenbach. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 1999. 421p.
5. Khass G. Fizika tonkikh plènok. Tom 2. [Physics of thin films. Volume 2]. Moskva. Mir, 1967. 396 p.
6. Kul'chitskiy N., Naumov A., Semenov V. Fotonika. 2015. 6. pp. 90-104.
7. Kaplunov I.A., Rogalin V.E. Fotonika. 2019. 1. pp. 88-106.
8. Hasan M., Huq M.F., Mahmood Z.H. SpringerPlus. 2013. 2. URL: doi.org/10.1186/2193-1801-2-151.
9. Kotlikov E. N., Novikova Yu.A. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. 2013. 1(62). pp. 41-46.
10. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Yurkovets E.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 2018. № 6. pp. 521-529.
11. Numata H., Nakagawa S., Taira Y. 2008 Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, Shanghai, China, 2008, pp. 1-3.

Дата поступления: 13.08.2025

Дата публикации: 25.09.2025