

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-12-82-89

УДК 535.015; 535.32

Исследование и применение оптических плёнок оксида алюминия Al_2O_3 в ультрафиолетовом диапазоне спектра

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОТЛИКОВ^{1✉}, НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА ЛАВРОВСКАЯ^{2✉},
ТИХОМИР КОЛЕВ ТЕНЕВ³, ИЛКО КИРИЛОВ МИЛУШЕВ⁴

^{1, 2}Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

^{3, 4}Институт физики твёрдого тела Болгарской академии наук, София, Болгария

¹ekotlikov45@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1799-944X>

²adele1993@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-2317-8181>

³tihomirtenev@abv.bg <https://orcid.org/0000-0002-4011-7540>

⁴miloushev@issp.bas.bg <https://orcid.org/0000-0002-9641-2151>

Аннотация

Предмет исследования. Приведены результаты исследования оптических плёнок оксида алюминия Al_2O_3 на подложке из кварца в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. **Цель работы.** Оптические константы плёнок определялись спектрофотометрическим методом по спектрам отражения и пропускания. **Метод.** Для этого использована оригинальная методика коррекции спектров плёнок с учётом поглощения. **Основные результаты.** По свободным от поглощения спектрам в диапазоне 0,20–0,85 мкм определены показатели преломления, а по спектрам поглощения — коэффициенты экстинкции плёнок. **Практическая значимость.** Полученные константы использованы для синтеза и изготовления высокоотражающих зеркал в ультрафиолетовой области спектра в диапазоне 0,22–0,23 мкм.

Ключевые слова: оптические плёнки, спектры, отражение, пропускание, поглощение, показатель преломления, коэффициент экстинкции, синтез, зеркала в ультрафиолетовой области спектра

Благодарность: работа выполнена по гранту № КП-06-Н57/5 от 16.11.2021 г. при финансовой поддержке Болгарской Академии наук и гранту МНиВО Российской Федерации № FSFR-2020-0004.

Ссылка для цитирования: Котликов Е.Н., Лавровская Н.П., Тихомир Колев Тенев, Илко Кирилов Милушев. Исследование и применение оптических плёнок оксида алюминия Al_2O_3 в ультрафиолетовом диапазоне спектра // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 12. С. 82–89. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-12-82-89>

Коды OCIS: 120.01 20; 300.0300; 310.0310.

ВВЕДЕНИЕ

Плёнки оксида алюминия Al_2O_3 нашли применение в интерференционных покрытиях видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов спектра [1, 2]. Широкого распространения они не получили ввиду технических трудностей при их изготовлении, а также

в силу того, что в видимом и среднем ИК диапазонах спектра имеется достаточное количество плёнокообразующих материалов с показателями преломления в диапазоне 1,5–1,8 [3], которые удобны в изготовлении.

Перспективным представляется использование плёнок Al_2O_3 в ультрафиолетовой (УФ)

области спектра. Пропускание оптического сапфира (лейкосапфира) толщиной 5 мм на длине волны 0,2 мкм составляет 75% и 30% на длине волны 0,15 мкм. Для оптических плёнок поглощение на несколько порядков выше, чем в монокристаллах, но их толщина обычно не превышает микрона, поэтому поглощение в плёнке не превысит единиц процентов в диапазоне длин волн 0,15–0,3 мкм. Показатели преломления плёнок мало отличаются от показателей преломления монокристаллов. Можно ожидать, что плёнки Al_2O_3 будут иметь показатели преломления в области спектра 0,15–0,35 мкм около 1,8–1,9. По этой причине оксид алюминия [1–5] практически не имеет конкурентов среди материалов с минимальным поглощением и максимальным показателем преломления в УФ области спектра 0,15–0,35 мкм.

Для использования этих плёнок при синтезе интерференционных покрытий требуется знание их оптических констант (ОК) — показателя преломления $n(\lambda)$ и коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ или коэффициента экстинкции $k(\lambda)$ [1–6]. В литературе данные по этим константам в УФ области спектра практически отсутствуют. Представляет интерес исследование оптических констант плёнок Al_2O_3 в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. Поэтому в настоящей работе описаны методы изготовления и исследования оптических свойств плёнок Al_2O_3 в диапазоне спектра 0,2–0,8 мкм, которые использовались при синтезе и изготовлении высокоотражающих зеркал в УФ диапазоне спектра.

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ПЛЁНОК

Плёнки Al_2O_3 и интерференционные покрытия на их основе изготавливались в вакууме на установке Symphony 9 (Techport Optics), имеющей две электронно-лучевые пушки, два резистивных испарителя, источник для ионного ассистирования Кауфман–Робинсон (Kaufman–Robinson) и подогрев подложек с контролем температуры до 300 °С. Система откачки состояла из пластинчато-роторного насоса, насоса Рутса и масляного диффузионного насоса, имеющего ловушки, охлаждаемые до –110 °С системой Поликолд (Polycold). Датчик на кристалле кварца, регистрирую-

щий изменение частоты колебаний, контролирует толщину плёнки и скорость её осаждения. Измерения осуществляются системой Инфikon-6 (Inficon-6). Исходным материалом для плёнок являлись монокристаллы Al_2O_3 . Подложки под напыление изготавливались из оптического плавленого кварца SiO_2 VIOSIL SQ толщиной 1,6 мм. Покрытия и плёнки выполнялись с подогревом подложки при температуре 300 °С. Для получения стехиометрического состава Al_2O_3 напыление проводилось с дополнительным напуском кислорода до давления в камере 2×10^{-4} торр. Скорость осаждения составляла 2 Å/с. Подложки предварительно обрабатывались ионным источником в течении 2,5 мин для удаления остаточного водяного пара и углеводородов.

Нахождение оптических констант проводилось спектрофотометрическим методом по спектрам отражения и пропускания. Спектры отражения и пропускания подложек и плёнок измерялись на спектрометре Perkin Elmer Lambda 1000 UV/VIS/NIR. Абсолютные погрешности измерения спектров отражения и пропускания по паспортным данным составляли 0,5% и 0,2% соответственно. Поглощение определялось расчётом по известной формуле $R + T + A = 1$ [6], где R — интенсивность отражённой части светового потока, T — прошедшей части, A — поглощённой части.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для нахождения ОК из спектров используют аналитические и численные методы. Обычно их называют T -, R -методами. Существует ряд методов расчёта оптических констант из спектров отражения и пропускания. Имеющиеся способы можно разделить на два типа. Первый вид даёт возможность получить аналитические выражения для расчёта оптических констант [7, 8]. В целом эта методика хорошо зарекомендовала себя при анализе спектров материалов, в которых отсутствуют полосы поглощения. При наличии полос поглощения данная группа методов неэффективна. В этом случае можно использовать предложенную в [9] вторую группу методов, основывающуюся на учёте поглощения.

В работе исследовались спектры отражения (R_λ), пропускания (T_λ) и поглощения (A_λ) в самих подложках из кварца и плёнок Al_2O_3

на подложках из кварца. Они связаны соотношением

$$A_\lambda = 1 - R_\lambda - T_\lambda. \quad (1)$$

При нахождении спектров пропускания с помощью Фурье-спектрофотометров обычно используют нормальное падение света. Для определения спектров отражения используются отражающие приставки, в которых падение излучения составляет $8\text{--}10^\circ$. В нашем случае оно составляло 8° .

Спектры отражения, пропускания и поглощения плёнки Al_2O_3 на подложке из SiO_2 в диапазоне $0,2\text{--}0,8$ мкм, снятые по описанной методике, показаны на рис. 1. Спектры отражения и пропускания даны в масштабе 100%. Поглощение A дано в обычном масштабе 100% и в увеличенном в 10 раз.

Из рисунка видно, что поглощение принимает небольшое отрицательное значение (до $0,2\text{--}0,3\%$), что в принципе невозможно. Для объяснения полученного результата были проведены расчёты спектров пропускания, отражения и поглощения плёнки с постоянным коэффициентом преломления и небольшим поглощением при различных углах падения излучения.

Все расчёты проводились с использованием программы FilmManager [10]. Спектры пропускания T_{theor} , отражения R_{theor} и поглощения A_{theor} были получены с помощью матричного метода. Детально методика расчёта спектров с использованием матричного метода описана в ряде работ [6–10].

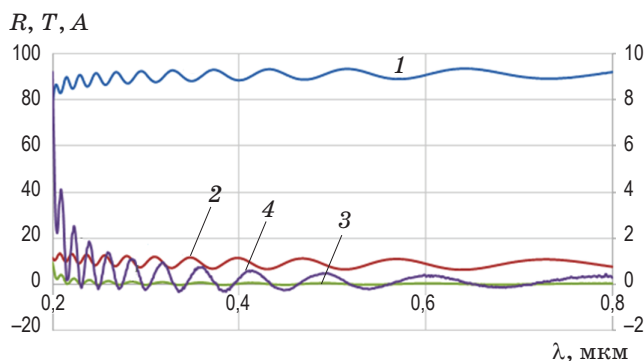


Рис. 1. Спектры плёнки Al_2O_3 на подложке из кварца, полученные экспериментально по традиционной методике: кривая 1 — пропускания, 2 — отражения, 3 — поглощения и 4 — поглощения в увеличенном в десять раз масштабе

Программа также позволяет проводить синтез интерференционных плёнок и структур, т.е. находить по заданным спектрам параметры плёнок (толщины, показатели преломления и поглощения). В этой программе предусмотрена возможность нахождения параметров и одиночной плёнки по заданному спектру.

В основе работы нашей программы [10] лежит поиск минимума функции качества F .

$$F(\mathbf{X}) = \left\{ \sum_{i=1}^L w(\lambda_i) |T(\mathbf{X}, \lambda_i) - T_0(\lambda_i)|^q \right\}^{1/q}, \quad (2)$$

где $w(\lambda_i)$ — весовая функция (чаще всего выбирается равной единице), $T(\mathbf{X}, \lambda_i)$ — пропускание (или отражение) на данном этапе расчёта всех плёнок \mathbf{X} , $T_0(\lambda_i)$ — коэффициент пропускания, который задаётся в начале расчёта, q — целое положительное число (обычно равно двум).

В программе заложена возможность выполнения двух алгоритмов расчёта:

1. Случайного перебора параметров плёнок и расчёта функции (2). Когда достигается минимум функции качества, показатели преломления и толщина плёнок сохраняется.

2. Квадратичной аппроксимации Пауэлла [11], при применении которого исходным приближением может служить найденная с использованием первого метода структура. Данный метод используется для уточнения результата и для оптимизации времени расчёта структуры оптического покрытия.

Используемая в программе база данных материалов плёнок и подложек даёт возможность рассчитать значение $T(\lambda)$ или $R(\lambda)$ в требуемом спектральном диапазоне. Базу данных можно вводить в программу, используя известные значения оптических констант плёнок и подложек.

Расчёты спектров показали, что при нахождении пропускания и отражения при разных углах падения в спектрах поглощения присутствует небольшое отрицательное поглощение, описывающее экспериментальные спектры. Анализ расчётов спектров показал, что причиной этого является различие угла падения при отражении и пропускании. Для устранения этого расхождения мы проводили

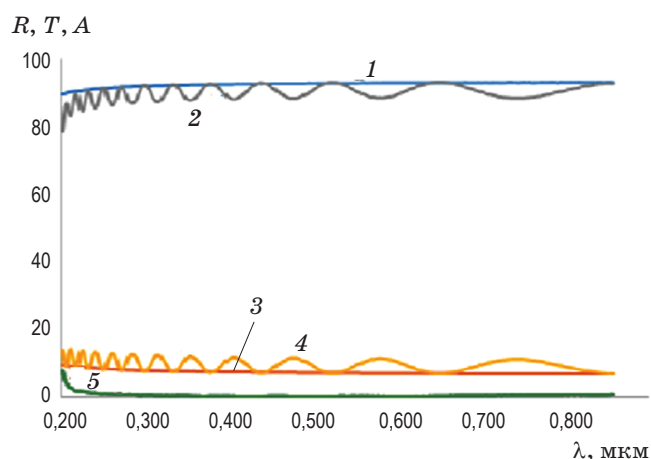


Рис. 2. Спектры, полученные экспериментально при угле падения 8° : 1 — пропускание кварцевой подложки, 2 — пропускание плёнки Al_2O_3 на подложке из кварца, 3 — отражения кварцевой подложки, 4 — отражение плёнки Al_2O_3 на подложке из кварца, 5 — поглощение плёнки Al_2O_3 на подложке из кварца

измерение спектров отражения и пропускания при одинаковых углах падения, равных 8° . На рис. 2 представлены полученные в эксперименте спектры отражения, пропускания и поглощения подложки SiO_2 и подложки с плёнкой, снятые при углах падения 8° . Поглощение здесь везде положительное.

Из этого небольшого исследования можно сделать вывод, что при точности измерения спектров отражения и пропускания выше 0,1% требуется проводить измерение спектров отражения и пропускания при одинаковых углах падения.

МЕТОДИКА НАХОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ ПЛЁНКИ

Для нахождения оптических постоянных плёнок — показателей преломления n_f и коэффициентов экстинкции k_f , (связанных соотношением $N_f = n_f + ik_f$ для комплексного показателя преломления N_f [3, 4]) — исследовались спектры отражения R и пропускания T . Эти спектры использовались для дальнейшего расчёта, чтобы убрать поглощение в плёнке и подложке.

Для реализации этого подхода модель плёнки строилась с показателями преломления $n(\lambda)$ и коэффициентами экстинкции $k(\lambda)$,

схожими с экспериментальными данными. ОК плёнки определялись в несколько этапов. Первый шаг — измерение спектров отражения R_s и пропускания T_s подложки и определение её геометрической толщины h_s . Исходя из этих данных производится расчёт поглощения в подложке $A_s = 1 - R_s - T_s$. Из спектра поглощения определяются оптические константы подложки n_s и k_s . Особенности определения ОК подложки приведены в работе [12].

Оптические коэффициенты подложки применялись далее при расчёте спектров подложки с плёнкой. База FilmManager позволяет дополнить сведения об оптических константах подложки (n_s , k_s) и плёнки (n_f , k_f) и их геометрических характеристиках h_f и h_s .

Второй шаг — измерение спектров отражения R_{fs} и пропускания T_{fs} плёнки на подложке. Из них находилось поглощение плёнки на подложке $A_{\text{exp}} = A_{fs} = 1 - R_{fs} - T_{fs}$. Спектры отражения и пропускания измерялись при падении излучения под 8° .

Можно предположить, что поглощение $A_{fs} = A_s + A_f$, где A_s — поглощение в подложке, A_f — поглощение в плёнке. Это справедливо с точностью до членов второго порядка малости. Дополнительно, при использовании части спектра, в которой нет поглощения, можно найти толщину h_f и показатель преломления плёнки n_f .

В данной работе привлекалась методика, основанная на определении оптических спектров плёнки, для которой исключено поглощение. Разберем её. Из эксперимента известны следующие параметры оптической структуры (плёнка на подложке) — значения пропускания $T = T_{fs}$ и отражения $R = R_{fs}$. Нашей задачей является нахождение оптических постоянных плёнки: показателей преломления n_f и коэффициентов поглощения α_f или коэффициентов экстинкции k_f .

Из закона сохранения энергии значения для плёнки без поглощения на подложке без поглощения R_0 и T_0 можно выразить через R_{exp} , T_{exp} и A_{exp} :

$$T_0 = T_{\text{exp}} + f_t A_{\text{exp}}, \quad (3a)$$

$$R_0 = R_{\text{exp}} + f_r A_{\text{exp}}. \quad (36)$$

Здесь f_t и f_r — функции, которые показывают, какая доля всего поглощения приходится

на пропускание и на отражение. Нахождение этих функций в явном виде столь же сложно, как и определение самих оптических констант.

При численном нахождении f_r и f_t первоначально рассчитываются спектры моделей плёнок на подложке. Эти модели выбираются такими, чтобы приблизительно, качественно соответствовать экспериментальным спектрам. В модели учитывается определённое из экспериментального спектра значение толщины плёнки h_f и среднее значение её коэффициента преломления n .

Если поглощение присутствует только в плёнке, функции f_r и f_t почти не зависят от спектров поглощения [9]. Ниже мы покажем, насколько существенно использование конкретной модели при нахождении f_r и f_t .

Получим значения отражения R_{mod} , пропускания T_{mod} и поглощения A_{mod} модели с поглощением в подложке и плёнке. Затем проведём расчёт спектров отражения $R_{0\text{mod}}$ и пропускания $T_{0\text{mod}}$ модели на подложке без поглощения. Отсюда, наконец, можно получить функции коррекции для модели:

$$f_{r\text{mod}} = (R_{0\text{mod}} - R_{\text{mod}}) / A_{\text{mod}}, \quad (4a)$$

$$f_{t\text{mod}} = (T_{0\text{mod}} - T_{\text{mod}}) / A_{\text{mod}}. \quad (4б)$$

Для покрытий в УФ и видимой областях спектра предложенная методика коррекции спектров с учётом поглощения показывает, что после коррекции поглощения достаточно использовать либо спектры отражения, либо спектры пропускания. В нашем случае более удобно использовать спектры отражения. Они меньше искажены дисперсией показателя преломления подложки.

Для коррекции спектров на поглощение использовали следующие модели. В качестве первого приближения показателя преломления использовался участок спектра 0,6–0,8 мкм, в котором отсутствовало поглощение (рис. 3). Использовались данные по оптическим константам подложки из кварца SiO_2 , взятые из [13]. Полученные с использованием программы FilmAnalysis [14] значения показателя преломления и толщины плёнки в диапазоне спектра 0,5–0,85 мкм равны $n_f = 1,636$, $h_f = 0,792$ мкм. Эта толщина использовалась нами в дальнейших расчётах.

Были рассчитаны три модели плёнки на подложке из кварца. На рис. 4 представлены спектры моделей. В модели 1 отсутствует поглощение. В модели 2 и 3 использовались различные поглощения.

Из рисунка видно, что в случае использования подложки из кварца и поглощающей плёнки из Al_2O_3 поглощение в плёнке сказывается практически только на спектрах пропускания. Поглощение практически не влияет на спектры отражения. Все модели дают спектры отражения, которые отличаются друг от друга менее чем на 0,2%. Поэтому мы для нахождения показателей преломления использовали спектры отражения.

Спектры моделей использовались также для нахождения функций коррекции в качестве $R_{0\text{mod}}$ и $T_{0\text{mod}}$. Расчёт спектров функций

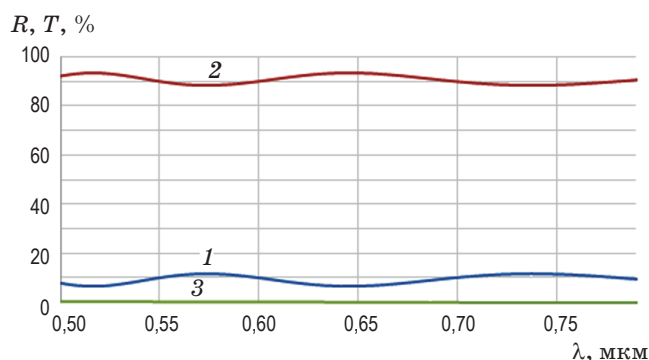


Рис. 3. Спектр плёнки в области 0,5–0,8 мкм: 1 — отражение, 2 — пропускание, 3 — поглощение

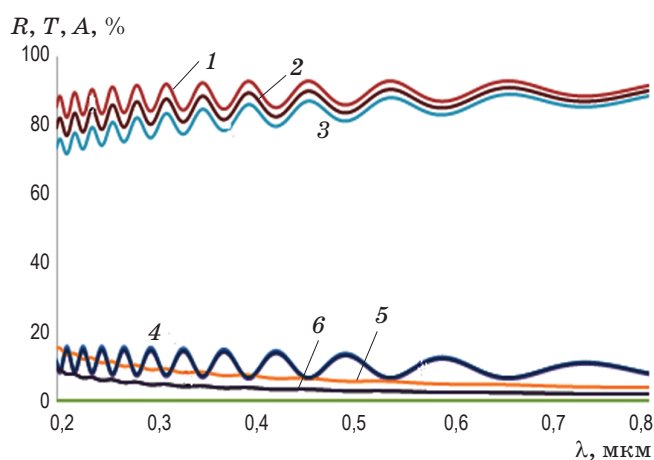


Рис. 4. Спектры моделей: 1–3 спектры пропускания моделей 1, 2 и 3; 4–6 спектры отражения моделей 1, 2 и 3, 5 и 6 — спектры поглощения моделей 2 и 3

коррекции, проделанный по уравнениям (4а) и (4б) приведён на рис. 5.

Из анализа рис. 5 видно, что функции коррекции для существенно отличающихся значений поглощения практически одинаковы с точностью не хуже 0,2%.

Значения толщины плёнки использовались для нахождения дисперсии показателя преломления во всем диапазоне 0,2–0,8 мкм. При нахождении показателя преломления использовался следующий подход. По описанной выше методике проводилась коррекция спектра на поглощение. Далее выбирался участок спектра, в который попадает не менее двух экстремумов. Для этого участка находилось значение показателя преломления. Затем

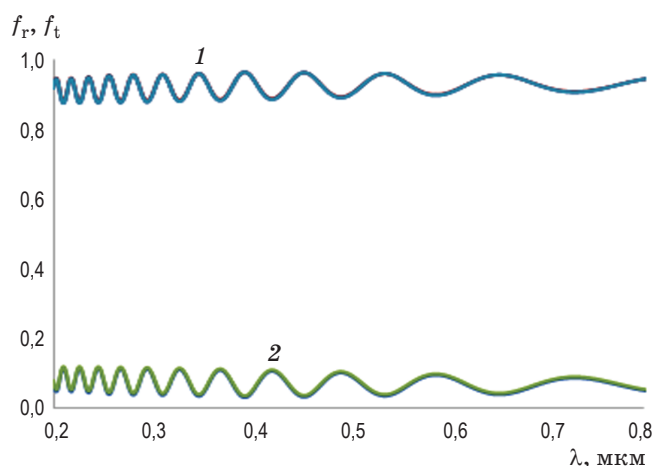


Рис. 5. Спектры функций коррекции f_t (кривая 1) и f_r (кривая 2), совпадающие для моделей 1, 2, 3

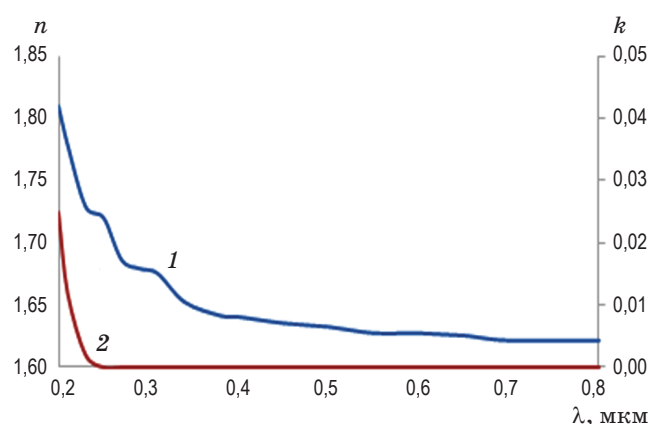


Рис. 6. Значение показателя преломления (кривая 1) и коэффициента экстинкции (кривая 2) в диапазоне спектра 0,2–0,8 мкм

переходили к следующему участку, где находили показатель преломления. Процедура выполнялась до того момента, когда был пройден весь спектр. Результаты расчётов показателя преломления приведены на рис. 6. Неравномерность хода дисперсионной кривой показателя преломления объясняется тем, что мы использовали участки конечной ширины.

Программа FilmManager также использовалась для нахождения коэффициента экстинкции плёнки Al_2O_3 в диапазоне 0,2–0,8 мкм. Для этого использовались спектры поглощения плёнки, по которым находились коэффициенты экстинкции. Результаты также приведены на рис. 6.

Значения оптических констант плёнки Al_2O_3 , полученные в этой работе и известные значения плёнок SiO_2 [3, 12–17] использовались для синтеза, изготовления и исследования зеркала в УФ области спектра. В качестве синтезируемой структуры использовалось зеркальное покрытие из четвертьволновых плёнок с оптической толщиной 0,215/4 мкм. Структура зеркала имела вид

$$\text{ПВ(НВ)}^{22}, \quad (5)$$

где П — подложка из оптического кварца, В — плёнка Al_2O_3 , Н — плёнка SiO_2 .

Рассчитанный спектр зеркала приведён на рис. 7. На рис. 8 представлены экспериментальные спектры зеркального покрытия на длину волны 0,22 мкм.

Из сравнения рисунков 7 и 8 видно, что рассчитанный спектр качественно хорошо согла-

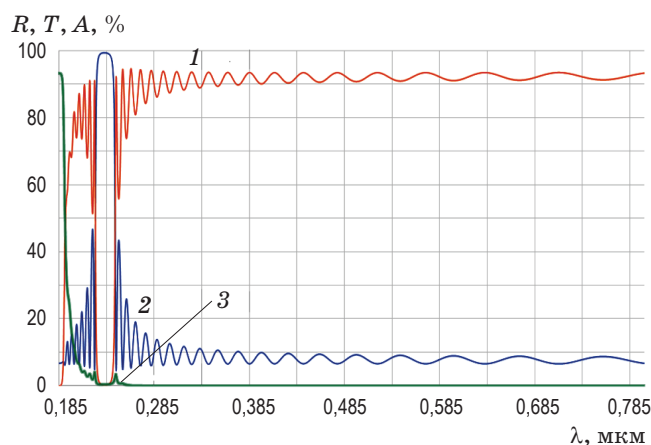


Рис. 7. Рассчитанный спектр зеркала: 1 — пропускание, 2 — отражение, 3 — поглощение

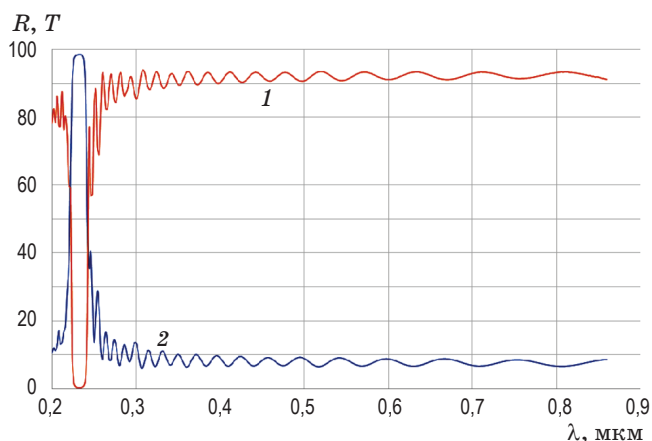


Рис. 8. Экспериментальный спектр изготовленного зеркала в УФ области спектра: 1 — пропускание, 2 — отражение

суется с экспериментальным спектром, несмотря на большое количество слоёв. Количественные расхождения в области 0,15–0,27 мкм можно объяснить ошибками в толщинах слоёв.

Наличие таких ошибок приводит к снижению отражения на центральной длине волны и в области вблизи центрального пика.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследования оптических плёнок Al_2O_3 на подложке из кварца в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. Определены оптические константы плёнок. Они находились спектрофотометрическим методом по спектрам отражения и пропускания. Для этого использована оригинальная методика коррекции спектров плёнок с учётом поглощения. По свободным от поглощения спектрам в диапазоне 0,20–0,85 мкм определены показатели преломления, а из спектров поглощения — коэффициенты экстинкции плёнок. Эти величины использованы для синтеза и изготовления высокоотражающего зеркала в УФ области спектра на длине волны 0,22–0,23 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
2. Середин П.В., Голощапов Д.Л., Лукин А.Н., Бондарев А.Д., Арсентьев И.Н., Растегаева М.Г., Тарасов И.С. Оптические устройства ультратонких плёнок Al_2O_3 на подложках GaAs (100) // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16. № 2. С. 196–200.
3. Тропин А.Н. Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 206–211.
4. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 336 с.
5. Marvin J. Weber. Handbook of optical materials. NY: CRC Press, 2003. 499 p.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination // Thin Solid Films. 2011. № 520. P. 501–509.
8. Моргунов Р.Б., Коплак О.В., Дмитрием А.В. Физико-химические методы исследования. М.: ЕАОИ, 2013. 394 с.
9. Котликов Е.Н., Юрковец Е.В. Метод определения оптических констант поглощающих плёнок. Подложки без поглощения // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 1. С. 59–64.
Kotlikov E.N., Yurkovets E.V. Method of determining the optical constants of absorbing films: substrates with no absorption // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. Iss. 1. P. 48–52. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000651>.
10. Котликов Е.Н., Коваленко И.И., Новикова Ю.А. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий FilmManager // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3(76). С. 51–59.
11. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
12. Котликов Е.Н. Спектрофотометрический метод определения оптических констант материалов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 2. С. 1–5.
Kotlikov E.N. A spectrophotometric method for determination of the optical constants of materials // Journal of Optical Technology. 2016. V. 83. Iss. 2. P. 77–80. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000077>.

13. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических средств. Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
14. Котликов Е.Н., Котликов А.Н., Юрковец Е.В. Программное обеспечение для нахождения оптических констант пленок. Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем // Сб. докладов научной сессии ГУАП. С. Петербург, ГУАП. 2016. С. 253–257.
15. Котликов Е.Н., Юрковец Е.В. Анализ возможности применения численных методов для определения оптических констант пленок // Сб. докладов IV конференции по фотонике и информационной оптике. М.: МИФИ, 2015. С. 346–347.
16. Окатов М.А., Антонов М.Э., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
17. Мутилин С.В., Хасанов Т. Показатель преломления тонкой однородной пленки SiO_2 // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105. № 3. С. 505–510.

АВТОРЫ

Евгений Николаевич Котликов — доктор физ.-матем. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-1799-944X>, ekotlikov45@mail.ru

Наталья Павловна Лавровская — канд. физ.-мат. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-2317-8181>, adele1993@mail.ru

Тихомир Колев Тенев — канд. физ. наук, доцент, Институт физики твёрдого тела Болгарской академии наук, 1782, София, Болгария, <http://orcid.org/0000-0002-4011-7540>, tihomirtenev@abv.bg

Илко Кирилов Милушев — канд. техн. наук, главный ассистент, Институт физики твёрдого тела Болгарской академии наук, 1782 София, Болгария, <http://orcid.org/0000-0002-9641-2151>, miloushev@issp.bas.bg

AUTHORS

Evgueny N. Kotlikov — Dr.Sc. in Physics, Professor, Saint Petersburg State University of aerospace instrumentation, 190000, Saint-Petersburg, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-1799-944X>, ekotlikov45@mail.ru

Natalia P. Lavrovskaya — PhD, docent, Saint Petersburg State University of aerospace instrumentation, 190000, Saint-Petersburg, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-2317-8181>, adele1993@mail.ru

Tihomir Kolev Tenev — PhD, docent, Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Science, 1782, Sofia, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0002-4011-7540>, tihomirtenev@abv.bg

Ilko Kirilov Milushev — PhD, Chief Assistant, Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Science, 1782, Sofia, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0002-9641-2151>, miloushev@issp.bas.bg