

УДК 539.216

Особенности спектров отражения тонких пленок углерода и кремния в видимой области

К.В. Соломатин, О.С. Мельникова, А.С. Белоусов

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Features of Carbon and Silicon Thin Films Reflection Spectra in the Visible Region

C.V. Solomatin, O.S. Melnikova, A.S. Belousow

Altai State University (Barnaul, Russia)

Статья посвящена рассмотрению отражения видимого света от тонкой поглощающей пленки. По ряду причин в последнее время тонкие пленки являются предметом пристального изучения. В рамках работы были изготовлены несколько пленок неметаллов на стеклянной подложке: кремниевые пленки (путем резистивного испарения) и углеродные пленки (с помощью лазерного испарения). Полученные пленки имеют оптическую толщину в пределах 1 мкм (т.е. реальная толщина слоя находится в диапазоне 0,2–0,4 мкм) и при этом заметно поглощают световой поток. Пленки были обработаны по стандартной методике в видимой области с использованием спектрометра USB4000. Спектры отражения для каждой из пленок были построены для нескольких разных точек поверхности. Если не принимать во внимание различия в числовых значениях, то спектры выглядят аналогично. При больших длинах волн (в красной области) вклад интерференции лучей, отраженных от передней и задней границ, значителен, тогда как в области коротких волн (фиолетовая часть спектра) интерференция практически исчезает на фоне шумов прибора. Причины этого в том, что поглощение при распространении внутри пленки коротковолновой части существенно уменьшает интенсивность луча, отраженного от задней поверхности пленки.

Ключевые слова: тонкие пленки, отражательная способность, поглощательная способность, комплексный показатель преломления, интерференционные методы.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)4-09

Введение

Тонкие пленки и покрытия представляют несомненный научный и практический интерес, поскольку являются незаменимыми компонентами большого количества промышленных изделий в самых разных областях и прежде всего в микроэлектронике [1, 2]. Разнообразны физико-химические свойства пленок,

The article is devoted to the reflection of visible light from a thin absorbing film. For a number of reasons, thin films have recently been the subject of close study. As part of the work, several non-metal films were fabricated on a glass substrate: silicon films (by resistive evaporation) and carbon films (using laser evaporation). The resulting films have an optical thickness in the range of 1 μm (that is, the actual layer thickness is in the range of 0.2–0.4 μm) and at the same time noticeably absorb the light flux. The films were processed according to the standard method in the visible region using a USB4000 spectrometer. Reflection spectra for each of the films were plotted for several different points on the surface. The spectra look similar when differences in numerical values are not considered. The contribution of the interference of rays reflected from the front and rear boundaries is significant at long wavelengths (in the red region), whereas the interference practically disappears against the background of instrument noise in the short wavelength region (violet part of the spectrum). The reason for this is that absorption during propagation of the short-wavelength part inside the film significantly reduces the intensity of the beam reflected from the rear surface of the film.

Key words: thin films, reflectivity, absorption capacity, complex refractive index, interference methods.

причем стандартное деление металл — диэлектрик — полупроводник, характерное для макроскопических систем, оказалось существенно дополненным не только переходными структурами, но и совершенно новыми типами [3]. Значителен и диапазон геометрических размеров покрытий: широко варьируются толщина (прежде всего) и поверхностный рельеф [4, 5]. В этой

связи особую важность приобретают методы контроля и анализа тонких пленок [6].

Один из способов получения информации о геометрии и оптических свойствах — анализ взаимодействия светового потока с пленкой [7]. Несмотря на давнюю историю изучения проблемы взаимодействия света с веществом, постоянно возникают новые вопросы при обработке и интерпретации данных. Для большого количества тонких пленок вполне подходят методы интерференционного анализа [8]. Интерференция в тонких пленках хорошо изучена и является классической задачей, если говорить об оптически однородной среде и монохроматическом излучении. В настоящей работе обсуждаются результаты, полученные авторами при анализе спектров отражения тонких пленок углерода и кремния.

Классические спектры отражения

Рассмотрим падение света на плоскопараллельную структуру, состоящую из пленки, расположенной между двумя полубесконечными средами, что вполне

$$R = E_{\text{отр}}/E_0, \quad T = E_{\text{пр}}/E_0, \quad r = (E_{\text{отр}}/E_0)^2, \quad \tau = n_2/n_1 \cdot (E_{\text{пр}}/E_0)^2. \quad (2)$$

Луч, прошедший в пленку, затем падает на следующую границу раздела, и процесс отражения — преломление повторяется (рис. 1). Если материал пленки не поглощает излучения, то возникает множество лучей, которые соответствуют отраженному и про-

соответствует простой модели пленки на подложке. Связь амплитуд колебаний вектора напряженности электрического поля (и фаз) бегущей волны для каждой из частей на границе раздела двух оптически прозрачных сред была получена Френелем [9]. Для случая нормального падения эти соотношения имеют наиболее простой вид:

$$E_{\text{отр}} = E_0 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad E_{\text{пр}} = E_0 \cdot \frac{2n_1}{n_1 + n_2}, \quad (1)$$

где $E_0, E_{\text{отр}}, E_{\text{пр}}$ — амплитуды колебаний напряженности электрического поля падающей, отраженной и преломленной волн соответственно, n_1 и n_2 — показатели преломления сред.

Определим коэффициенты отражения и пропускания по амплитуде (R и T) как отношения напряженностей и по интенсивности (r и τ) — как отношение произведения показателей преломления на квадрат амплитуды:

шедшему свету. Каждая система лучей когерентна, поэтому результирующие волны получаются в ходе многолучевой интерференции:

$$E_{\text{отр}} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (3)$$

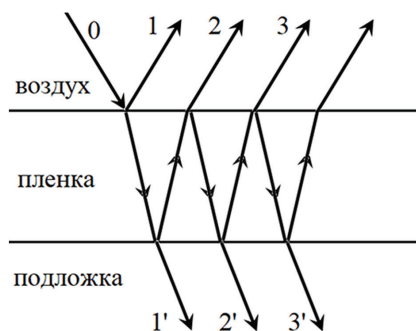


Рис. 1. Многолучевая интерференция в тонкой пленке

Обозначим показатели преломления воздуха, пленки и подложки как 1 (при нормальных условиях $n_0=1,00029$), n и n_0 . Для двух первых отраженных лучей оптическая разность хода при толщине пленки d и угле падения α равна:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \lambda / 2. \quad (4)$$

Напряженности поля колебаний (с учетом фазы в комплексной форме) будут равны:

$$E_1^{\text{отр}} = R_1 E_0, \quad E_2^{\text{отр}} = R_2 E_1^2 E_0 \cdot e^{ik\Delta}, \quad E_3^{\text{отр}} = R_2^3 T_1^2 E_0 \cdot e^{2ik\Delta}, \dots, \quad (5)$$

здесь k — волновое число ($k = 2\pi n/\lambda$), индексы 1 и 2 соответствуют передней (воздух — пленка) и задней (пленка — подложка) границам раздела.

Для получения расчетной формулы и анализа следует сложить слагаемые (5), а затем перейти в полученном выражении к действительной части.

Поскольку фаза экспоненты в (5) линейна относительно $1/\lambda$, то зависимость результирующей амплитуды (коэффициента отражения) лучше всего строить от обратной длины волны (частоты, с точностью до множителя $c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

На рисунке 2 приведены 4 линии (для наглядности), соответствующие тройкам значений (nd, n, n_0) : 1 — (0,7; 1,9; 1,4), 2 — (0,6; 1,9; 1,6), 3 — (0,6; 3,5; 1,4), 4 — (0,5; 3,5; 1,6). Значения выбраны с учетом усредненной действительной части показателя преломления в видимой области для углерода — 1,9 и крем-

ния — 3,5; nd — оптическая толщина пленки в мкм. Данный идеализированный спектр соответствует синусоиде, смещенной относительно осей. Отчетливо видны три момента: 1) повышение показателя преломления приводит к увеличению отражательной способности пленки; 2) чем ближе значения показателей преломления пленки и подложки, тем меньше размах интерференции в спектре отражения; 3) увеличение оптической плотности пленки приводит к росту числа наблюдаемых экстремумов.

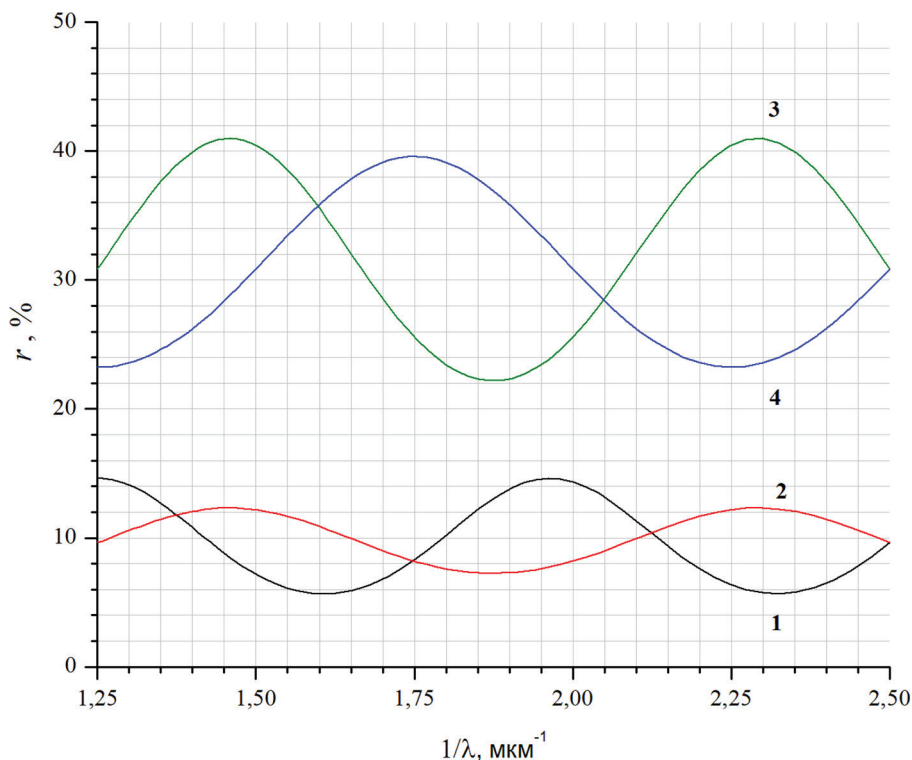


Рис. 2. Спектры отражения пленок без учета поглощения

Теперь рассмотрим отражение от среды, которая поглощает излучение. Показатель преломления для поглощающих сред является комплексной величиной: $m = n - i\kappa$, где κ — мнимая часть, отвечающая за поглощение. В этом случае на границе раздела двух сред справедливо соотношение [10]:

$$\sin\beta(n_2 - i\kappa_2) = \sin\alpha(n_1 - i\kappa_1), \quad (6)$$

которое приводит к выражениям для коэффициента отражения на границе поглощающей ($m = n - i\kappa$) и непоглощающей (n_0) сред в виде [11]:

$$R = \frac{n - n_0 - i\kappa}{n + n_0 - i\kappa}, \quad r = \frac{(n - n_0)^2 + \kappa^2}{(n + n_0)^2 + \kappa^2}. \quad (7)$$

Разумеется, можно учесть и поглощение внутри пленки (для всех лучей, начиная со второго). Для этого умножим соответствующие амплитуды с номером p на множитель вида: $\exp\left(-\frac{4\pi\kappa dn}{\lambda} \cdot p\right)$.

Для анализа построим на рисунке следующие линии: 1 — $dn = 0,7$ мкм, $n_0 = 1,4$ и $m = 1,9 - 0,5i$ (без учета поглощения внутри пленки); остальные линии — $dn = 0,5$ мкм, $n = 2,5$, $n_0 = 1,5$: 2 — $\kappa = 0,1$; 3 — $\kappa = 0,2$; 4 — κ линейно возрастает от 0,15 до 0,3.

Сравнение построенных зависимостей показывает, что: 1) учет мнимой части увеличивает отражение от пленки (сравним линии 1 на рис. 2 и 3); 2) учет поглощения излучения внутри пленки приводит к снижению влияния интерференции на отражение с ростом частоты.

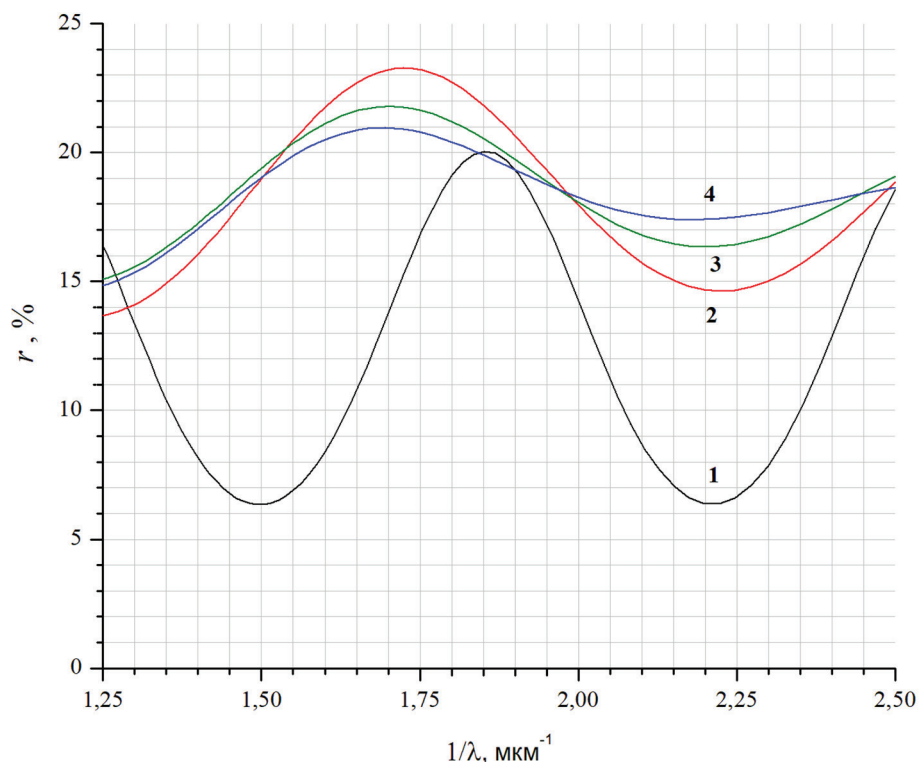


Рис. 3. Спектры отражения пленок с учетом поглощения

Аппаратура и измерения

Для проведения исследования были выбраны углеродные и кремниевые пленки на стеклянных подложках. Первые изготавливались с помощью лазерно-плазменного метода под вакуумным колпаком. Варьируя энергию импульса лазера, получили углеродные пленки разной структуры связей (графитоподобные и алмазоподобные). Кремниевые пленки напылялись резистивным методом.

Для определения показателя отражения образцов использовался метод наклонного падения светового потока [12]. Компоновка установки и ход луча представлены на рисунке 4. Источник света (1) подключался к генератору напряжения (2) через стабилизатор, необходимый для постоянства освещенности рабочей области. Излучение направлялось к закрепленному

на столике исследуемому образцу (4) вдоль линии (3^а). При взаимодействии светового луча с пленкой возникал отраженный луч (3^б), падающий на коллиматор (6) через линзу (5), установленную для увеличения сигнала, поступающего по волноводу на вход спектрометра USB4000 (7). Далее происходила аппаратная обработка данных через *usb*-разъем на вход ноутбука (8) с установленным специализированным программным обеспечением SpectraSuite. Данные в программе сравнивались с опорным сигналом, полученным при отражении от зеркала.

Для выделения области исследования на поверхности пленки (фрагмента площади порядка 1 мм²) использовалась специальная черная диафрагма, накладываемая на поверхность рабочего образца.

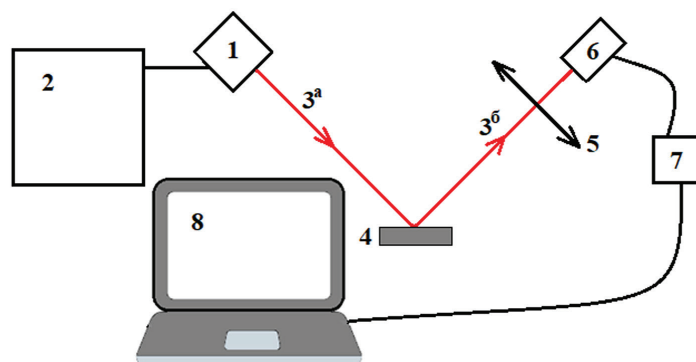


Рис. 4. Схема установки: 1 — источник света, 2 — блок питания, 3 — ход луча, 4 — пленка на поворотном столике, 5 — линза, 6 — коллиматоры с волноводами, 7 — спектрометр, 8 — компьютер

Реальные спектры отражения

Для проведения анализа спектров отражения были обработаны по несколько пленок каждого типа, нанесенных на стеклянную подложку: кремниевых и углеродных. На каждой пленке с помощью диафрагмы выбиралось несколько (до 10) областей исследования малого размера (диаметр порядка 1 мм). Угол падения света на пленку варьировался в пределах от 20° до 60° . Снятые зависимости экспериментальной функции $r(1/\lambda)$ были построены и для обсуждения нами оставлены по три наиболее характерных линии на каждом из графиков: рисунки 5 (Si) и 6 (C).

Существенного различия в характере отражения графитоподобных и алмазоподобных пленок не обнаружено. Также не оказало заметного влияния изменение угла падения света на пленку.

Как следует из графиков, положения экстремумов (как максимумов, так и минимумов) для рассматриваемых областей на образцах отличаются. Это связано с неоднородностью толщины пленки: в экспериментальной установке поток напыляемого вещества на подложку был не изотропным, поэтому в разных областях количество осажденного вещества различно.

Положения экстремумов были использованы для нахождения оптической толщины. На участках разной оптической толщины хорошо просматривается отличие в количестве наблюдаемых экстремумов: от двух до четырех.

Диапазон средних значений коэффициента отражения вполне соответствует известным литературным данным [8, 10].

При малых частотах (в красной области спектра) интерференция лучей, отраженных от передней и задней границ, оказывает существенное влияние на значение коэффициента отражения. Наиболее сильно различие в коэффициентах отражения в максимумах и минимумах имеет место для кремния: от (2–5)% (min) до (35–45)% (max). По-видимому, это связано с большими значениями действительной части показателя преломления (n) и меньшими значениями мнимой части (κ) для кремния (по сравнению с углеродом).

В области больших частот (фиолетовая часть спектра) интерференция практически исчезает для кремния и существенно снижается для углерода, что, скорее всего, связано с серьезным ростом поглощения излучения в этом диапазоне для обоих материалов.

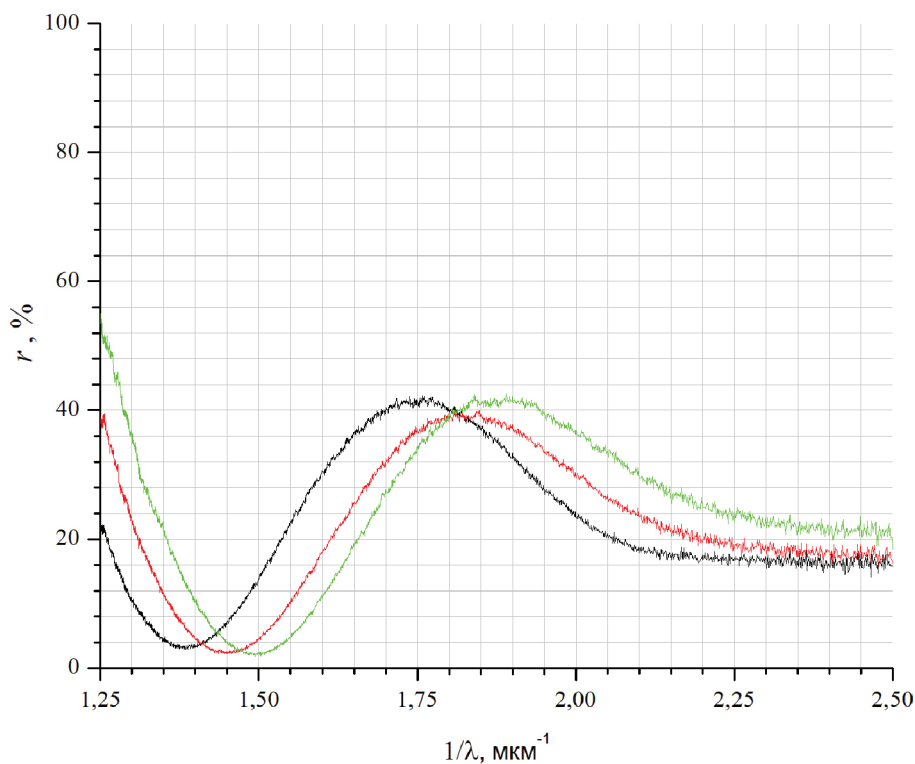


Рис. 5. График зависимости коэффициента отражения от частоты для кремниевой пленки (линии 1, 2 и 3 сняты в разных областях образца)

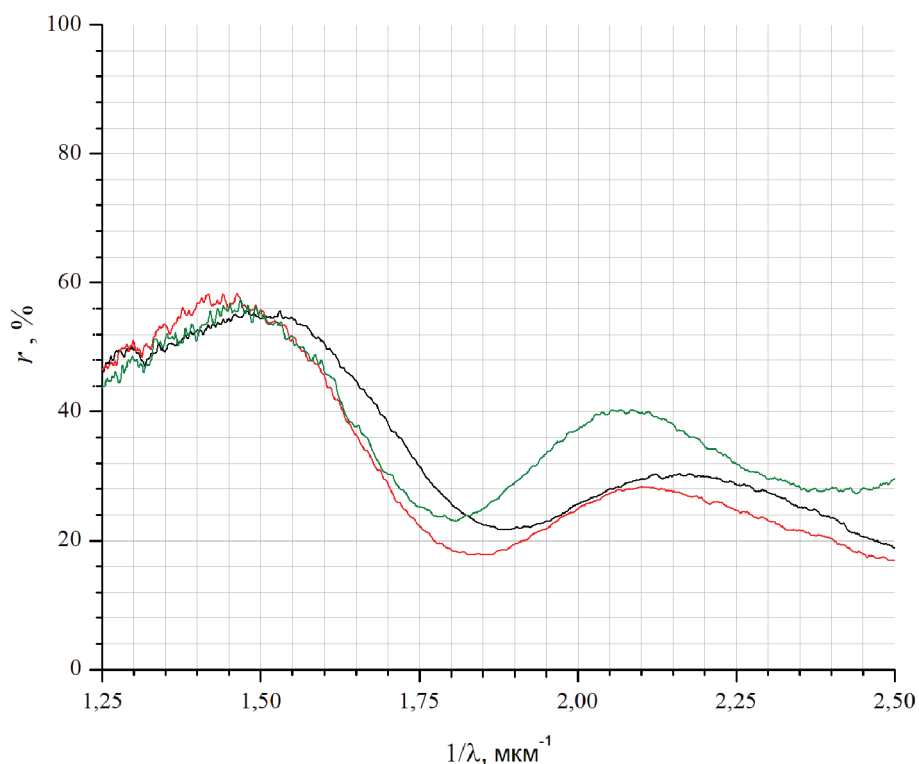


Рис. 6. График зависимости коэффициента отражения от частоты для углеродной пленки (линии 1, 2 и 3 сняты в разных областях образца)

Заключение

Спектры отражения, снятые на углеродной и кремниевой пленках, обнаруживают определенное сходство, связанное, как мы полагаем, с аналогичным характером зависимости поглощательной способности материала пленки от длины волн.

При больших длинах волн (в красной области) интерференция лучей, отраженных от передней и задней границ, существенна. Хорошо видны максимумы и минимумы, причем коэффициент отражения

отличается вблизи максимумов и минимумов в разы.

В области коротких волн (фиолетовая часть спектра) при достаточной оптической толщине пленки интерференция практически исчезает на фоне шумов прибора. Причины этого в том, что поглощение при распространении внутри пленки коротковолновой части существенно уменьшает интенсивность луча, отраженного от задней поверхности пленки.

Библиографический список

1. Золотарев, А.А. Современные материалы теплового контроля на основе углерода в микроэлектронике // Инновационные технологии в электронике и приборостроении : сб. докл. Российской научн.-технич. конф. с междунар. участием. М., 2021.
2. Иовдальский В.И., Пелипец О.В., Зубков Н.П., Ковалев В.И. Исследование состава алмазоподобных пленок углерода, используемых в изделиях микроэлектроники // Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов : сб. докл. XI Международной конф. Ялта, 2009.
3. Мансуров Г.Н., Петрий О.А. Электрохимия тонких металлических пленок. М., 2011.
4. Хорьков К.С., Герке М.Н., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. Образование тонких углеродных пленок при воздействии фемтосекундного лазерного излучения в вакууме // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 6.
5. Григорьев Ф.В. Математическое моделирование процесса напыления тонких пленок, их структуры и свойств : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2019.
6. Маскаева Л.Н., Федорова Е.А., Марков В.Ф. Технология тонкопленочных покрытий. Екатеринбург, 2019.
7. Юнович А.Э. Оптические явления в полупроводниках. М., 1989.

8. Карпова А.А., Котова Е.И., Парфенова А.Д., Щеглов С.А. Метод измерения параметров тонких пленок, разработанный на основе методов интерферометрии переменного угла падения // Наука и инновации в технических университетах : матер. XIII Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб., 2019.

9. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 2010.

10. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжов Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М., 1991.

11. Лизункова Д.А. Исследование электрических и оптических свойств фоточувствительных структур на наноструктурированном кремнии : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Самара, 2018.

12. Соломатин К.В., Елькина Е.А. Определение толщины тонкой углеродной пленки оптическими методами : сб. науч. ст. VI Российско-Казахстанской молод. науч.-технич. конф. «Новые материалы и технологии». Барнаул, 2018.