

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 535.015; 535.393.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-89-100

Измерения спектральной зависимости коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала спектрофотометра Shimadzu UV-2700*

**А.В. МИХАЙЛЕНКО^a, К.Г. АКСЁНОВ^b, М.Г. КИСТЕНЕВА^c,
А.С. АКРЕСТИНА^d, С.М. ШАНДАРОВ^e**

*634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники*

^a nastyamih1999@mail.ru ^b avmhno@gmail.com ^c m-kisteneva@mail.ru

^d aka_83@mail.ru ^e stanislavshandarov@gmail.com

Представлены результаты экспериментов по измерению спектральной зависимости коэффициента отражения алюминиевого зеркала, входящего в комплект приставки для исследования спектров отражения образцов для спектрофотометра Shimadzu UV-2700 в рабочем диапазоне от 185 до 900 нм. В качестве сравнительного эталона использовались полученные на том же спектрофотометре для стандартного угла падения 5° экспериментальные данные для коэффициента отражения от плоскопараллельной пластины из плавленого кварца, спектральные зависимости показателя преломления которого, определяемые формулой Зельмейера, хорошо известны. В экспериментах использовалась стандартная пластина из кварцевого стекла толщиной 2,2 мм и шириной щели спектрофотометра 5 нм, при которых можно пренебречь эффектами интерференции, обусловленными многократными отражениями. Из экспериментальных зависимостей коэффициента пропускания данной пластины были найдены необходимые для определения расчетной спектральной зависимости ее коэффициента отражения в рабочем диапазоне спектрофотометра спектр показателя поглощения. На основе последнего спектра в приближении нормального падения были рассчитаны абсолютные значения коэффициента отражения кварцевой пластины с использованием формул Френеля, с учетом многократных отражений и дисперсии показателя преломления в соответствии с формулой Зельмейера. Сопоставление спектров рассчитанных абсолютных и измеренных на спектрофотометре относительных значений коэффициента отражения кварцевой пластины с экспериментальными данными для коэффициента отражения алюминиевого зеркала позволило получить для последнего спектральную зависимость для

* Статья получена 16 марта 2023 г.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023–2025 гг.

всего рабочего диапазона от 185 до 900 нм. Получено, что спектральная зависимость коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала имеет немонотонный характер. При этом только в спектральном диапазоне от 350 до 670 нм отклонения его коэффициента отражения от идеального единичного значения не превосходят 10 %. Таким образом, для количественных измерений во всем рабочем диапазоне спектрофотометра Shimadzu UV-2700 от 185 до 900 нм учет полученной спектральной зависимости коэффициента отражения комплектного зеркала является необходимым.

Ключевые слова: спектрофотометр, оптическое отражение и пропускание, алюминиевое зеркало, кварцевое стекло, спектральная зависимость, показатель преломления, показатель поглощения, формула Зельмейера, Shimadzu UV-2700

ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопические исследования коэффициентов отражения оптического излучения $R(\lambda)$ позволяют получать информацию о структурных, электронных и оптических свойствах монокристаллических, фотонно-кристаллических и плазмонных материалов, метаповерхностей и пленочных структур (см., например, [1–11]). При измерениях спектральных зависимостей $R(\lambda)$ на спектрофотометре Shimadzu UV-2700 используется метод сравнения интенсивностей световых пучков, отраженных от исследуемого образца и от входящего в комплект алюминиевого зеркала, при угле падения 5° [12]. Однако коэффициент отражения данного эталонного зеркала, обычно считающийся принимающим значение $R_e(\lambda) = 1$, является спектрально зависимым в рабочем диапазоне от 185 до 900 нм. Результаты экспериментального исследования для излучения с энергией квантов от 0,64 до 2,5 эВ (диапазон 496...1937 нм), приведенные в работах [13, 14], показывают, что при температуре 300 К коэффициент отражения напыленными в вакууме пленками алюминия имеет немонотонную спектральную зависимость. В длинноволновой области, при $\lambda = 1937$ нм, он имеет максимальное значение $R_{Al\max} = 0,982$, затем, при $\lambda \approx 856$ нм, достигает минимума ($R_{Al\min} = 0,864$) и увеличивается до 0,930 при $\lambda = 496$ нм. Таким образом, для измерения с достаточной точностью абсолютных значений для коэффициента отражения $R_s(\lambda)$ исследуемых на спектрофотометре образцов необходимо учитывать реальную спектральную зависимость коэффициента отражения эталонного алюминиевого зеркала $R_e(\lambda)$.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных измерений спектральной зависимости коэффициента отражения $R_e(\lambda)$ алюминиевого зеркала, входящего в комплект спектрофотометра Shimadzu UV-2700, в рабочем диапазоне от 185 до 900 нм. В качестве сравнительного эталона нами использовалась плоскопараллельная пластина из плавленого кварца, спектральные характеристики оптических параметров которого известны и определены с высокой точностью. Коэффициент отражения от данной пластины рассчитывался с использованием формул Френеля [15] на основе уравнения Зельмейера и оптических констант, приведенных в [16].

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовался спектрофотометр Shimadzu UV-2700 в режиме измерения спектральной зависимости зеркального коэффициента отражения $R_s(\lambda)$ от плоской оптически полированной грани образца при ширине щели $\Delta\lambda = 5$ нм. Для этого в его кюветном отделении размещается приставка, обеспечивающая разделение светового потока с заданной длиной волны λ на два пучка, падающих под углами $\theta_e = \theta_s = 5^\circ$ на позиционируемые в ней эталонное плоское алюминиевое зеркало и исследуемый образец. Двухлучевая схема спектрофотометра обеспечивает в этом режиме измерение световых потоков пучков $P_s(\lambda)$ и $P_e(\lambda)$, отраженных от исследуемого образца и эталона соответственно. Схема фоторегистрации и стандартное программное обеспечение прибора позволяют задавать диапазон длин волн λ и шаг сканирования $\delta\lambda$, для которых регистрируется в цифровом виде отношение световых потоков $P_s(\lambda)/P_e(\lambda)$. Это отношение и определяет спектральную зависимость экспериментально измеряемого прибором относительного коэффициента отражения

$$R_r(\lambda) = \frac{P_s(\lambda)}{P_e(\lambda)} = \frac{R_s(\lambda)}{R_e(\lambda)}, \quad (1)$$

однако для нахождения абсолютного значения $R_s(\lambda)$ требуются цифровые данные по зависимости $R_e(\lambda)$ для эталона, входящего в комплект данного прибора.

Для определения зависимости $R_e(\lambda) = R_s(\lambda)/R_r(\lambda)$ в качестве исследуемого образца использовалась стандартная плоскопараллельная пластина из кварцевого стекла SiO_2 с толщиной $d_s = 2,2$ мм и поперечными размерами 20×20 мм². Экспериментальные данные $R_r(\lambda)$ регистрировались для нее с шагом 1 нм в диапазоне от 185 до 900 нм и усреднялись по пяти измерениям. В дальнейших расчетах эти данные использовались только для диапазона 200...900 нм, поскольку в более коротковолновой области для расчета коэффициента отражения от SiO_2 в его показателе преломления $n(\lambda) = n'(\lambda) - in''(\lambda)$ необходимо учитывать мнимую часть $n''(\lambda)$. Экспериментально измеренная спектральная зависимость $R_r(\lambda)$ показана рис. 1, где для наглядности соответствующие точки представлены с шагом в 2 нм. Она демонстрирует немонотонное поведение $R_r(\lambda)$, связанное, в частности, со сложной спектральной зависимостью коэффициента отражения эталонного алюминиевого зеркала $R_e(\lambda)$.

Как известно [15], спектральная зависимость коэффициента отражения $R_s(\lambda)$ для прозрачных материалов определяется дисперсией показателя преломления $n_s(\lambda)$. В диапазоне от 210 нм до 4 мкм для кварцевого стекла вкладом в отражение света, связанным с оптическими потерями, описываемыми мнимой частью показателя преломления, можно пренебречь, а зависимость его вещественной части $n_s(\lambda)$ известна с высокой точностью [16]. Однако при обработке результатов измерения необходимо учитывать, что в световой поток,

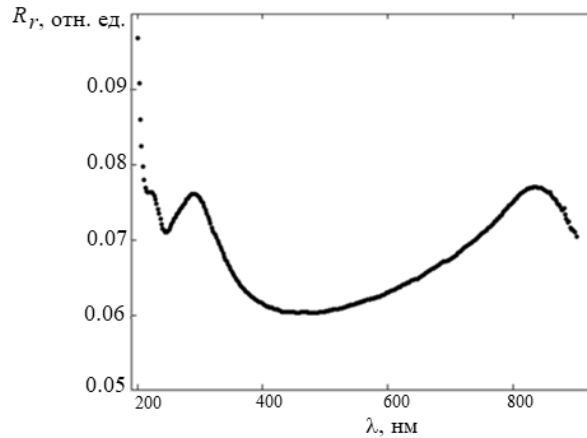


Рис. 1. Спектральная зависимость относительного коэффициента отражения пластины SiO_2

Fig. 1. Spectral dependence of the relative reflection coefficient of SiO_2 plate

отраженный от прозрачной кварцевой пластины, дают заметный вклад многократные переотражения от ее плоскопараллельных граней. Для используемой ширины щели $\Delta\lambda = 5$ нм длина когерентности падающего светового излучения, определяемая как $l_c = \lambda^2 / \Delta\lambda$ [12], во всём исследуемом диапазоне удовлетворяет неравенству $l_c \ll d_s$. В этом случае, в пренебрежении эффектами интерференции, коэффициент отражения от плоскопараллельной пластины, зависящий от ее толщины d_s и показателя поглощения $\alpha(\lambda)$, может быть представлен в виде

$$R_s(\lambda) = |r(\lambda)|^2 + \frac{(1 - |r(\lambda)|^2)^2 |r(\lambda)|^2 \exp[-2\alpha(\lambda)d_s]}{1 - |r(\lambda)|^4 \exp[-2\alpha(\lambda)d_s]}, \quad (2)$$

где амплитудный коэффициент отражения световой волны от границы раздела кварцевого стекла с воздухом $r(\lambda)$ определяется формулами Френеля [15]. Их анализ показывает, что при используемом в спектрофотометре угле падения $\theta_s = 5^\circ$, когда

$$r(\lambda) = \frac{\cos \theta_s - n(\lambda) \cos \theta_t}{\cos \theta_s + n(\lambda) \cos \theta_t}, \quad (3)$$

где $n(\lambda)$ и θ_t – показатель преломления кварцевой пластины и угол преломления, соответственно значения $|r(\lambda)|^2$ отличаются от расчетных для случая нормального падения ($\theta_s = 0$), при котором

$$|r(\lambda)|^2 = \left| \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right|^2, \quad (4)$$

не более чем на 1,1 %.

Как следует из (2), для расчета коэффициента отражения от используемой плоскопараллельной пластины $R_s(\lambda)$ необходимы данные по спектральной зависимости показателя поглощения $\alpha(\lambda)$ ее материала. Для экспериментального нахождения $\alpha(\lambda)$ можно воспользоваться данными по спектральной зависимости коэффициента пропускания $T(\lambda)$ данной пластины, который определяется известным соотношением [17]:

$$T(\lambda) = \frac{\left(1 - |r(\lambda)|^2\right)^2 \exp(-\alpha(\lambda)d)}{1 - |r(\lambda)|^4 \exp(-2\alpha(\lambda)d)}. \quad (5)$$

Результаты экспериментального определения зависимости $T(\lambda)$ по стандартной для спектрофотометра Shimadzu UV-2700 методике, проведенного также с шагом 1 нм в диапазоне от 185 до 900 нм при ширине щели $\Delta\lambda = 5$ нм, усредненные по пяти измерениям, представлены на рис. 2.

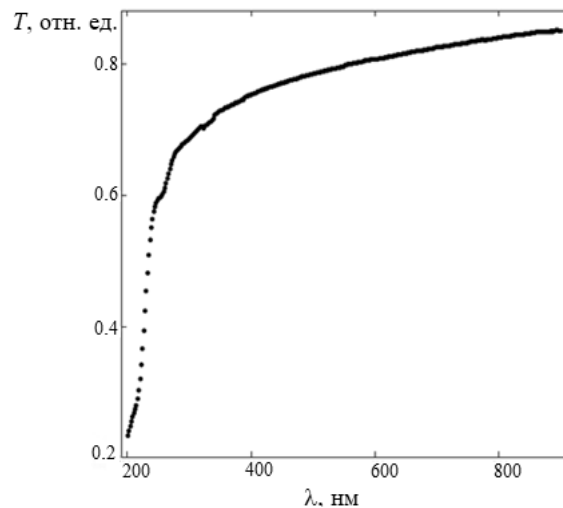


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента оптического пропускания для пластины SiO_2

Fig. 2. Spectral dependence of the transmission coefficient of SiO_2 plate

Полученные данные для спектральной зависимости коэффициента пропускания $T(\lambda)$ были использованы для расчета показателя поглощения материала кварцевой пластины $\alpha(\lambda)$.

2. РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ КОМПЛЕКТНОГО АЛЮМИНИЕВОГО ЗЕРКАЛА

Для расчета показателя поглощения кварцевой пластины $\alpha(\lambda)$ воспользуемся следующим соотношением, которое может быть найдено из (5):

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln \left[\sqrt{\frac{1}{|r(\lambda)|^4} + \frac{(|r(\lambda)|^2 - 1)^4}{4T^2(\lambda)|r(\lambda)|^8}} - \frac{(|r(\lambda)|^2 - 1)^2}{2T(\lambda)|r(\lambda)|^4} \right]. \quad (6)$$

Спектральная зависимость $r(\lambda)$ здесь определяется формулой (4) и дисперсией показателя преломления $n(\lambda)$ оптического кварцевого стекла. В расчетах $r(\lambda)$ и $\alpha(\lambda)$ будем использовать формулу Зельмейера из [16], которая с высокой точностью описывает экспериментальные данные в диапазоне длин волн от 210 до 3710 нм при температуре 20 °С:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.897479\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}}, \quad (7)$$

где длина волны выражается в микронметрах.

Следует отметить, что в приведенной формуле (7) большое число значащих цифр в используемых параметрах обусловлено указанным выше широким спектральным диапазоном ее применимости. Проведенные расчеты показали, что для диапазона длин волн от 185 до 900 нм достаточно сохранения трех значащих цифр в этих параметрах.

Использование соотношений (6), (4) и (7) и экспериментальных данных для коэффициента пропускания $T(\lambda)$, показанного на рис. 2, позволило рассчитать спектральную зависимость показателя поглощения SiO_2 для исследуемой плоскопараллельной пластины, представленную на рис. 3.

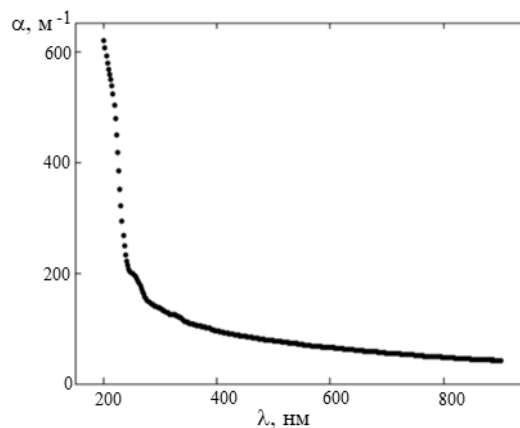


Рис. 3. Спектральная зависимость показателя поглощения пластины SiO_2

Fig. 3. Spectral dependence of absorption coefficient of SiO_2 plate

Таким образом, абсолютное значение $R_s(\lambda)$ для пластины из кварцевого стекла может быть рассчитано из (2) с применением: а) соотношения (4) для $|r(\lambda)|^2$, в котором показатель преломления $n(\lambda)$ вычисляется по формуле (7); б) выражения (6), в которое необходимо подставить как расчетные значения $|r(\lambda)|^2$, так и экспериментально измеренные данные для $T(\lambda)$, представленные на рис. 2.

В соответствии с формулой (1) спектральная зависимость коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала может быть рассчитана из найденных по данной методике абсолютных значений $R_s(\lambda)$ для пластины из кварцевого стекла и экспериментально измеренных для нее с данным зеркалом относительных значений $R_r(\lambda)$ (см. рис. 3) как

$$R_e(\lambda) = \frac{R_s(\lambda)}{R_r(\lambda)}. \quad (8)$$

Рассчитанная по данной методике с использованием математического пакета Mathcad спектральная зависимость коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала спектрофотометра Shimadzu UV-2700 с заводским номером A11675500992 показана на рис. 4.

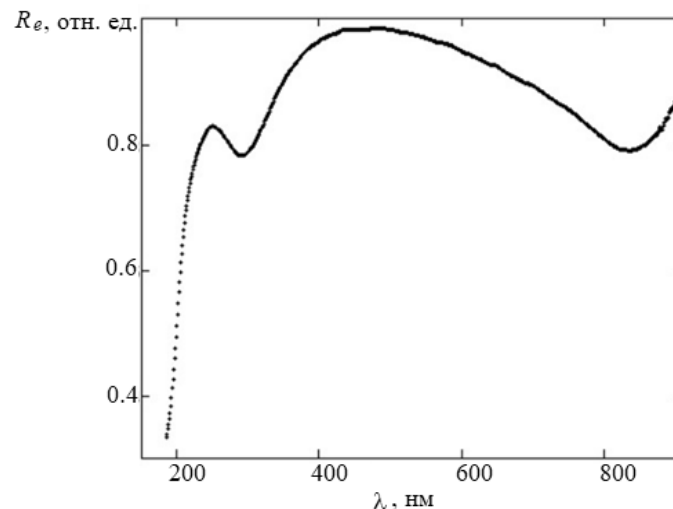


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала

Fig. 4. Spectral dependence of reflection index of the complete aluminum mirror

Как видно из рис. 4, спектральная зависимость коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала демонстрирует немонотонный характер. При этом только в спектральном диапазоне от 350 до 670 нм отклонения его коэффициента отражения от идеального значения $R_e(\lambda) = 1$ не превосходят 10 %. Это делает необходимым учет влияния полученной спектральной

зависимости коэффициента отражения комплектного зеркала при выполнении количественных измерений коэффициентов отражения исследуемых образцов на спектрофотометре Shimadzu UV-2700.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была получена спектральная зависимость коэффициента отражения алюминиевого зеркала $R_e(\lambda)$, входящего в комплект приставки для исследования спектров отражения образцов на спектрофотометре Shimadzu UV-2700, в рабочем диапазоне от 185 до 900 нм. Для ее измерения использовалось сравнение со спектром отражения $R_s(\lambda)$ плоскопараллельной пластины из кварцевого стекла SiO_2 с толщиной 2,2 мм. Спектральная зависимость показателя поглощения данной пластины определялась из спектра оптического пропускания и данных по дисперсии показателя преломления SiO_2 . Это позволило рассчитать абсолютные значения $R_s(\lambda)$ и из измеренных на спектрофотометре относительных значений $R_r(\lambda)$ определить значения коэффициента отражения от алюминиевого зеркала, $R_e(\lambda) \neq 1$. Его спектральная зависимость имеет немонотонный характер, и только в спектральном диапазоне от 350 до 670 нм он принимает значения $R_e(\lambda) > 0,9$, приемлемые для измерений, не требующих высокой точности определения абсолютных коэффициентов отражения исследуемых образцов. Для количественных измерений во всем рабочем диапазоне спектрофотометра Shimadzu UV-2700, от 185 до 900 нм, учет полученной спектральной зависимости коэффициента отражения комплектного зеркала $R_e(\lambda)$ является необходимым.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки и высшего образования Российской Федерации в рамках Госзадания FEWM-2023-012 на 2023–2025 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спектры отражения кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20 \pm \delta}$ ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Ga}, \text{Fe}, [\text{Ga}, \text{P}], [\text{Fe}, \text{P}], [\text{Zn}, \text{V}]$) со структурой силленита / А.В. Егорышева, В.И. Бурков, Ю.Ф. Каргин, В.Н. Махов // Журнал неорганической химии. – 2005. – Т. 50, № 7. – С. 1132–1137.
2. Оптическая характеристика синтетических опалов / А.В. Барышев, А.В. Анкудинов, А.А. Каплянский, В.А. Кособукин, М.Ф. Лимонов, К.Б. Самусев, Д.Е. Усвят // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44, № 9. – С. 1573–1581.
3. Surface plasmon resonance spectroscopy of single bowtie nano-antennas using a differential reflectivity method / M. Kaniber, K. Schraml, A. Regler, J. Bartl, G. Glashagen, F. Flassig, J. Wierzbowski, J.J. Finley // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – Art. 23203.
4. Optical properties and interparticle coupling of plasmonic bowtie nanoantennas on a semiconducting substrate / K. Schraml, M. Spiegl, M. Kammerlocher, G. Bracher, J. Bartl, T. Campbell, J.J. Finley, M. Kaniber // Physical Review B. – 2014. – Vol. 90. – P. 035435.
5. Spectroscopy of single metallic nanoparticles using total internal reflection microscopy / C. Sönnichsen, S. Geier, N.E. Hecker, G. von Plessen, J. Feldmann, H. Ditlbacher, B. Lamprecht, J.R. Krenn, F.R. Aussenegg, V.Z.-H. Chan // Applied Physics Letters. – 2000. – Vol. 77 (19). – P. 2949–2951.

6. Оптические свойства пленок GaN/Al₂O₃, легированных кремнием / Н.С. Заяц, П.А. Генцарь, В.Г. Бойко, О.С. Литвин, Н.В. Вуйчик, А.В. Стронский, И.Б. Янчук // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С. 617–620.
7. Особенности роста и структурно-спектроскопические исследования нанопрофилированных пленок AlN, выращенных на разориентированных подложках GaAs / П.В. Середин, Д.А. Голощапов, А.С. Леньшин, А.Н. Лукин, А.В. Федюкин, И.Н. Арсентьев, А.Д. Бондарев, Я.В. Лубянский, И.С. Тарасов // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 9. – С. 1283–1294.
8. Применение двухслойных пленок ИТО в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов / Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Д.А. Закгейм, С.И. Павлов // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 12. – С. 1713–1718.
9. Оптические и волноводные свойства эпитаксиальных структур GaN/InGaN, выращенных на сапфировой подложке / М.Г. Кистенева, А.С. Акрестина, Е.С. Худякова, В.В. Щербина, М.В. Бородин, В.М. Шандаров, С.М. Шандаров, В.М. Лисицын, С.А. Степанов // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8-3. – С. 24–27.
10. Оптические свойства тонкой пленки CdTe, полученной методом высокочастотного магнетронного распыления / А.И. Кашуба, Б.В. Андриевский, Г.А. Ильчук, М. Пясецкий, И.В. Семкив, Р.Ю. Петрусь // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – № 2. – С. 88–95. – На англ.
11. Оптические и структурные эффекты при многоимпульсной интерференционной фемтосекундной лазерной фабрикации метаповерхностей на тонкой пленке аморфного кремния / С.И. Кудряшов, П.А. Данилов, А.П. Порфирьев, А.А. Руденко, Н.Н. Мельник, А.А. Кучмижак, О.Б. Витрик, А.А. Ионин // Письма в ЖЭТФ. – 2019. – Т. 110, № 11. – С. 759–764.
12. Shimadzu UV-2600/2700. Руководство по эксплуатации спектрофотометра УФ-видимой области фирмы «Шимадзу». – Shimadzu, 2014. – 162 с.
13. Каленский А.В., Звеков А.А., Адуев Б.П. Влияние температуры на спектральные зависимости оптических свойств алюминия // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, вып. 4 – С. 484–491.
14. Palic E.D. Handbook of optical constants of solids. Vol. 1. – San Diego: Academic Press, 1985. – 804 p.
15. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
16. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // Journal of the Optical Society of America. – 1965. – Vol. 55, iss. 10. – P. 1205–1209.
17. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.

Михайленко Анастасия Валерьевна, магистрант кафедры электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – спектроскопия, моделирование в фотонике и оптоинформатике, оптоэлектроника. Имеет 8 печатных работ. E-mail: nastyamih1999@mail.ru

Аксёнов Константин Геннадьевич, магистрант филиала МГУ в городе Сарове. Основное направление научных исследований – нелинейная оптика, лазерная техника, твердотельные и волоконные лазерные системы. Имеет 4 публикации в сборниках отечественных и международных конференций. E-mail: avmhno@gmail.ru

Кистенева Марина Григорьевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – оптические свойства фоторефрактивных материалов. Имеет более 100 печатных работ, в том числе учебные пособия. E-mail: m-kisteneva@mail.ru

Акрестина Анна Сергеевна, доцент кафедры электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направле-

ние научных исследований – оптические свойства фоторефрактивных материалов. Имеет 90 печатных работ, в том числе учебные пособия. E-mail: aka_83@mail.ru

Шандаров Станислав Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электронных приборов Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – когерентная и нелинейная оптика, интегральная оптика, динамическая голография, фоторефрактивные эффекты, материалы и приборы, лазерная интерферометрия. Имеет более 500 печатных работ и учебных пособий. E-mail: stanislavshandarov@gmail.com

Mikhailenko Anastasia V., MSc student, Department of Electronic Devices, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Her research interests are currently focused on spectroscopy, modeling in photonics and optoinformatics, and optoelectronics. She has 8 publications. E-mail: nastyamih1999@mail.ru

Aksenov Konstantin G., MSc student at the MSU branch in the Sarov city. His research interests are nonlinear optics, laser technology, and solid and fiber laser systems. He has 4 publications in collections of domestic and international conferences. E-mail: avmhno@gmail.ru

Kisteneva Marina G., associate professor, Department of Electronic Devices, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Her research interests are currently focused on optical properties of photorefractive materials. She has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: m-kisteneva@mail.ru

Akrestina Anna S., associate professor, Department of Electronic Devices, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Her research interests are currently focused on optical properties of photorefractive materials. She has 90 publications and teaching manuals. E-mail: aka_83@mail.ru

Shandarov Stanislav M., professor, Department of Electronic Devices, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on coherent and nonlinear optics, integrated optics, dynamic holography, photorefractive effects, materials and devices, and laser interferometry. He has more than 500 publications and teaching manuals. E-mail: stanislavshandarov@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-89-100

Investigation of the spectral dependence of the reflection coefficient of the factory-assembled aluminum mirror for Shimadzu UV-2700 spectrophotometer*

*A.V. MIKHAILENKO^a, K.G. AKSENOV^b, M.G. KISTENEVA^c,
A.S. AKRESTINA^d, S.M. SHANDAROV^e*

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Prospekt Tomsk, 634040, Russian Federation

^a nastyamih1999@mail.ru ^b avmhno@gmail.com ^c m-kisteneva@mail.ru

^d aka_83@mail.ru ^e stanislavshandarov@gmail.com

Abstract

In this paper, we present the results of experimental investigation of the spectral dependence of the aluminum mirror reflection coefficient in the operating range of 185...900 nm. The aluminum mirror is a part of the Specular Reflectance Measurement Attachment to the Shimadzu UV-2700 spectrophotometer. We used experimental data obtained on the same spectro-

* Received 16 March 2023.

The research was carried out with the support of the Ministry of Education and Science and Higher Education of the Russian Federation within the State Assignment FEWM-2023-012 for 2023-2025.

photometer for a standard incidence angle of 5° for the reflection coefficient of a fused silicon dioxide plate as a reference sample. This is because the spectral characteristics of the optical parameters of fused silicon dioxide determined by the Sellmeier formula are well known. We used a standard quartz glass plate with a thickness of 2,2 mm and a spectrophotometer slit of 5 nm in our experiment. In this case it is possible to neglect interference effects due to multiple reflection. We found from our experimental data the spectrum of the absorption coefficient required for determining the calculated spectral dependence of its reflection coefficient in the spectrophotometer operating range. On the basis of this absorption spectrum the absolute values of the reflection coefficient of the quartz plate were calculated. This calculation was made for the normal incidence approximation and taking into account multiple reflections and dispersion of the refractive coefficient of fused quartz in accordance with the Sellmeier formula. The comparison of the spectra of calculated absolute and relative values of the reflection coefficient of the quartz plate measured on a spectrophotometer with experimental data for the reflectance of aluminum mirror made it possible to obtain the spectral dependence for the aluminum mirror for the entire operating range from 185 to 900 nm. It was found that spectral dependence of the reflection coefficient of a complete aluminum mirror was nonmonotonic. In case under consideration the deviations of its reflection coefficient from an ideal unit value do not exceed 10 % only in the spectral range from 350 to 670 nm. Thus, it is necessary to take into account the obtained spectral dependence of the reflection coefficient of the complete aluminum mirror for quantitative measurements in the entire operative range of the Shimadzu UV-2700 spectrophotometer from 185 to 900 nm.

Keywords: spectrophotometer, optical reflection and transmission, aluminum mirror, quartz glass, spectral dependence, refraction coefficient, absorption coefficient, Sellmeier equation, Shimadzu UV-2700

REFERENCES

1. Egorysheva A.V., Burkov V.I., Kargin Yu.F., Makhov V.N. [Reflection spectra of $\text{Bi}_{12}\text{M}_x\text{O}_{20+\delta}$ ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Ga}, \text{Fe}, [\text{Ga}, \text{P}], [\text{Fe}, \text{P}], [\text{Zn}, \text{V}]$) sillenite crystals]. *Zhurnal ne-organicheskoi khimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2005, vol. 50 (7), pp. 1132–1137. (In Russian).
2. Baryshev A.V., Ankudinov A.V., Kaplyanskiy A.A., Kosobukin V.A., Limonov M.F., Samusev K.B., Usyat D.E. Opticheskaya kharakterizatsiya sinteticheskikh opalov [Optical characterization of synthetic opals]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2002, vol. 44 (9), pp. 1573–1581.
3. Kaniber M., Schraml K., Regler A., Bartl J., Glashagen G., Flassig F., Wierzbowski J., Finley J.J. Surface plasmon resonance spectroscopy of single bowtie nano-antennas using a differential reflectivity method. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. 23203.
4. Schraml K., Spiegl M., Kammerlocher M., Bracher G., Bartl J., Campbell T., Finley J.J., Kaniber M. Optical properties and interparticle coupling of plasmonic bowtie nanoantennas on a semiconducting substrate. *Physical Review B*, 2014, vol. 90. – P. 035435.
5. Sönnichsen C., Geier S., Hecker N.E., von Plessen G., Feldmann J., Dittlbacher H., Lamprecht B., Krenn J.R., Aussenegg F.R., Chan V.Z.-H. Spectroscopy of single metallic nanoparticles using total internal reflection microscopy. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77 (19), pp. 2949–2951.
6. Zayats N.S., Gentsar P.A., Boiko V.G., Litvin O.S., Vuychik N.V., Stronski A.V., Yan-chuk I.B. Opticheskie svoystva plenok $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$, legirovannykh kremniem [Optical properties of $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ films doped with silicon]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2009, vol. 43 (5), pp. 617–620. (In Russian).
7. Seredin P.V., Goloshapov D.A., Lenshin A.S., Lukin A.N., Fedyukin A.V., Arsentyev I.N., Bondarev A.D., Lubyanskiy Ya.V., Tarasov I.S. Osobennosti rosta i strukturno-spektrroskopicheskie issledovaniya nanoprofilirovannykh plenok AlN , vyrashchennykh na razorientirovannykh podlozhkakh GaAs [Growth peculiarities and structural-spectroscopic studies of nanoprofiled AlN films prepared on misoriented GaAs substrates]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2016, vol. 50 (9), pp. 1283–1294. (In Russian).

8. Markov L.K., Smirnova I.P., Pavluchenko A.S., Kukushkin M.V., Zakheim D.A., Pavlov S.I. Primenenie dvukhsloinykh plenok ITO v sostave otrazhayushchikh kontaktov svetodiodov sinego i blizhnego ul'trafiol'tovogo diapazonov [Application of two-layers ITO films in the composition of reflective contacts in the blue and near ultraviolet LEDs]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2014, vol. 48 (12), pp. 1713–1718. (In Russian).
9. Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Khudyakova E.S., Shcherbina V.V., Borodin M.V., Shandarov V.M., Shandarov S.M., Lisitsyn V.M., Stepanov S.A. Opticheskie i volnovodnye svoystva epitaksial'nykh struktur GaN/InGa_N, vyrashchennykh na sapfirovoi podlozhke [The optical and waveguide characteristics of the epitaxial structures GaN/InGa_N grown on sapphire substrate]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58 (8-3), pp. 24–27.
10. Kashuba A.I., Andriyevsky B.V., Ilchuk H.A., Piasecki M., Semkiv I.V., Petrus R.Yu. Optical properties of CdTe thin film obtained by high-frequency magnetron sputtering method. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2021, no. 2, pp. 88–95.
11. Kudryashov S.I., Danilov P.A., Porfirev A.P., Rudenko A.A., Melnik N.N., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B., Ionin A.A. Opticheskie i strukturnye efekty pri mnogoimpul'snoi interferentsionnoi femtosekundnoi lazernoi fabrikatsii metapoverkhnostei na tonkoi plenke amorfnoho kremniya [Optical and structural phenomena at multipulse interference femtosecond laser fabrication of metasurfaces on a thin film of amorphous silicon]. *Pis'ma v Zhurnal teoreticheskoi i eksperimental'noi fiziki = JETP Letters*, 2019, vol. 110 (11), pp. 759–764. (In Russian).
12. *Shimadzu UV-2600/2700*. Shimadzu, 2014. 162 p.
13. Kalenskii A.V., Zvekov A.A., Aduv B.P. Vliyanie temperatury na spektral'nye zavisimosti opticheskikh svoystv alyuminiya [The influence of temperature on the spectral dependence of aluminum's optical properties]. *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124 (4), pp. 484–491.
14. Palic E.D. *Handbook of optical constants of solids*. Vol. 1. San Diego, Academic Press, 1985. 804 p.
15. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of optics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 855 p. (In Russian).
16. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, vol. 55 (10), pp. 1205–1209.
17. Ukhanov Yu.I. *Opticheskie svoystva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 366 p.

Для цитирования:

Измерения спектральной зависимости коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала спектрофотометра Shimadzu UV-2700 / А.В. Михайленко, К.Г. Аксенов, М.Г. Кистенева, А.С. Акрестина, С.М. Шандаров // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 2 (90). – С. 89–100. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-89-100.

For citation:

Mikhailenko A.V., Aksenov K.G., Kisteneva M.G., Akrestina A.S., Shandarov S.M. Izmereniya spektral'noi zavisimosti koeffitsienta otrazheniya komplektnogo alyuminiyevogo zerkala spektrofotometra Shimadzu UV-2700 [Investigation of the spectral dependence of the reflection coefficient of the factory-assembled aluminum mirror for Shimadzu UV-2700 spectrophotometer]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 2 (90), pp. 89–100. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-2-89-100.