www.volsu.ru

DOI: https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2025.1.6

УДК 535.417.24
ББК 22.341.95

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ GaAs МЕЖДУ ГЕЛИЕВОЙ И ВОЗДУШНЫМИ СРЕДАМИ В ДИАПАЗОНЕ, СОДЕРЖАЩЕМ РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ

Петр Сергеевич Иванов

Аспирант, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
FNa-241_846589@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Валерий Васильевич Яцышен

Доктор технических наук, профессор,
кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
yatsyshen.valeriy@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В исследовании представлены результаты теоретического расчета первого и второго эллипсометрических параметров ρ и Δ для тонкой пленки арсенида галлия толщиной 2 мкм, заключенной между воздушной и гелиевой средами. Определен характер поведения углового спектра отражения для S- и P- поляризованных волн вблизи фононного резонанса, с параметрами среды Ω_{TO} = 269 см$^{-1}$; Ω_{LO} = 292 см$^{-1}$. По полученным кривым угловых спектров R(θ) удалось определить количество пиков отражения вблизи частоты Ω_{TO} – 2 пика для GaAs при S поляризаци, 3 при P поляризаци, и вблизи Ω_{LO} – 3 пика, при S поляризаци, 5 при P поляризаци. Проанализировав графики угловых и частотных спектров видно скачкообразное поведение Δ. По частотному спектру можно увидеть изменение поведения параметров эллипсометрии в запрещенной области частот, а также заметить ускорение их изменения при приближении к резонансным частотам.

Ключевые слова: резонансные частоты, эллипсометрические параметры, фононный резонанс, угловой спектр отражения, объемные поляритоны.

© Иванов П.С., Яцышен В.В., 2025

Введение

В последнее время наблюдается значительный рост исследований в области применения поляритонов и плазмонов для целей микро- и нано-электроники [5; 7; 8]. Причина заключается в возможности эффективного управления параметрами этих носителей [9]. В данной работе будет продемонстрировано влияние характера поляризации на оптичес-

кие свойства среды, в которой возбуждаются поляритоны.

Эллипсометрия наиболее точный неразрушающий метод определения оптических параметров поверхностей и границ раздела для различных сред. Повысить точность данного метода можно за счет учета поглощения рассматриваемых сред. Тогда показатель преломления будет иметь комплексный вид, а формулы Френеля станут комплексными величинами [10].

Главной особенностью эллипсометрии является то, что она практически не влияет на исследуемую систему при правильном выборе длины волны и интенсивности светового луча, а также ее высокая чувствительность к маловыраженным эффектам на границе раздела сред, таким как образование молекулярного монослоя.

При косом падении света на объекты исследования эллипсометры измеряют амплитудно-фазовые параметров эллипса ψ и Δ деполяризации света после взаимодействия его с материалом вещества исследуемой среды.

По этим параметрам судят о толщинах слоев и о компонентах комплексного показателя преломления.

Постановка задачи и решение

Получить эллипсометрические параметры можно по угловым спектрам отражения и пропускания для S и P поляризации согласно основному уравнению эллипсометрии [1; 6].

$$\rho * \exp(i\Delta) = \frac{R_p}{R_s}. \quad (1)$$

Для тонкой диэлектрической пленки из GaAs, получить коэффициенты отражения можно методом характеристических матриц. Для этого рассмотрим следующую систему полубесконечных сред (рис. 1).

Энергетический коэффициент отражения, полученный методом характеристических матриц имеет вид [2]:

$$R = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23}\cos(2\beta)}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23}\cos(2\beta)}, \quad (2)$$

где:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 h \cos(\theta_2). \quad (3)$$

Следовательно, для однородного слоя диэлектрика с учетом формулы основное уравнение эллипсометрии запишется в виде:

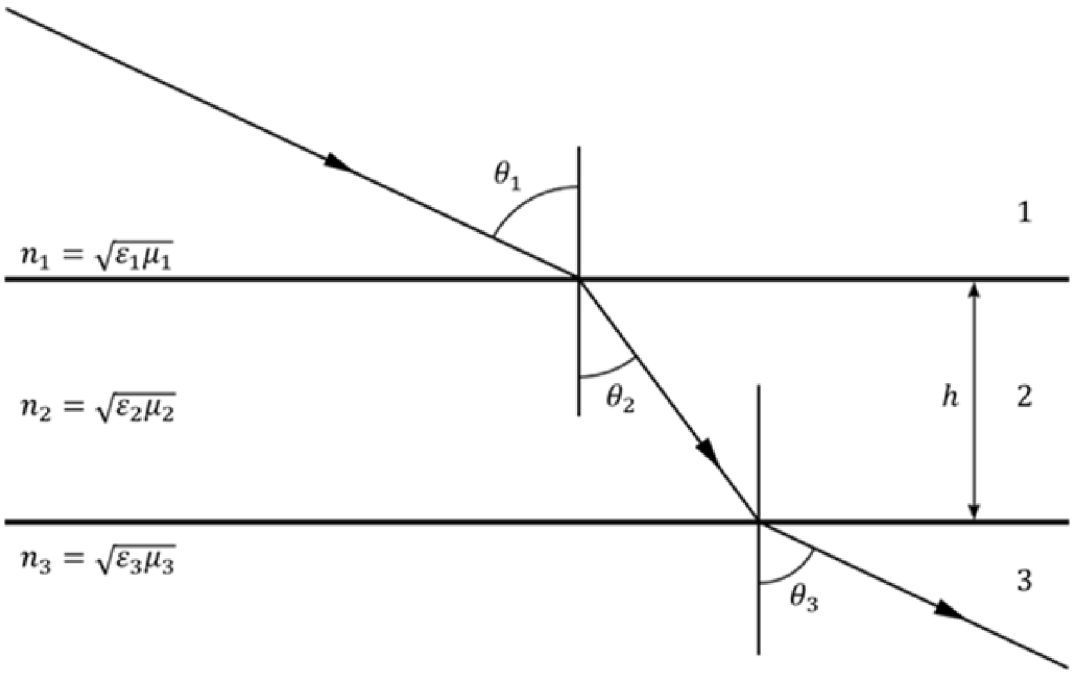


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны через однородную пленку с толщиной *h*, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$

$$\rho * e^{i\Delta} = \frac{r_{12_p} + r_{23_p} e^{2i\beta}}{1 + r_{12_p} r_{23_p} e^{2i\beta}} \cdot \frac{1 + r_{12_s} r_{23_s} e^{2i\beta}}{r_{12_s} + r_{23_s} e^{2i\beta}}. \quad (4)$$

Функция диэлектрической проницаемости, учитывающая релаксационные потери, имеет вид [3; 4]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{{\Omega_{TO}}^2}{{\Omega_{TO}}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}. \quad (5)$$

Результаты исследования

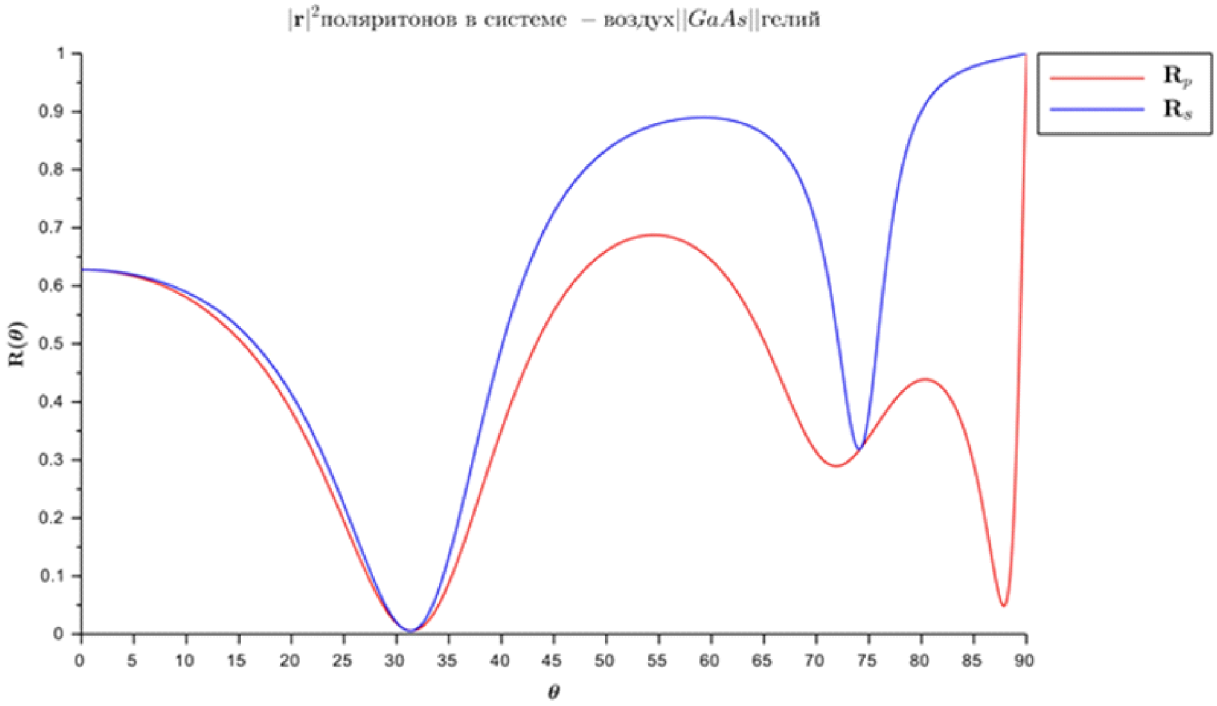


Рис. 2. Угловой спектр энергетических коэффициентов отражения от тонкого слоя GaAs для S- и P-поляризации

Примечание. Частота падающего излучения $\frac{\omega}{\Omega_{TO}} = 0.5$; n(воздух) = 1.00059, n(гелий) = 1.00007; $\varepsilon_\infty = 15.68, \varepsilon_0 = 17.88$; $\Omega_{TO} = 269$ см$^{-1}$; $\Omega_{LO} = 292$ см$^{-1}$.

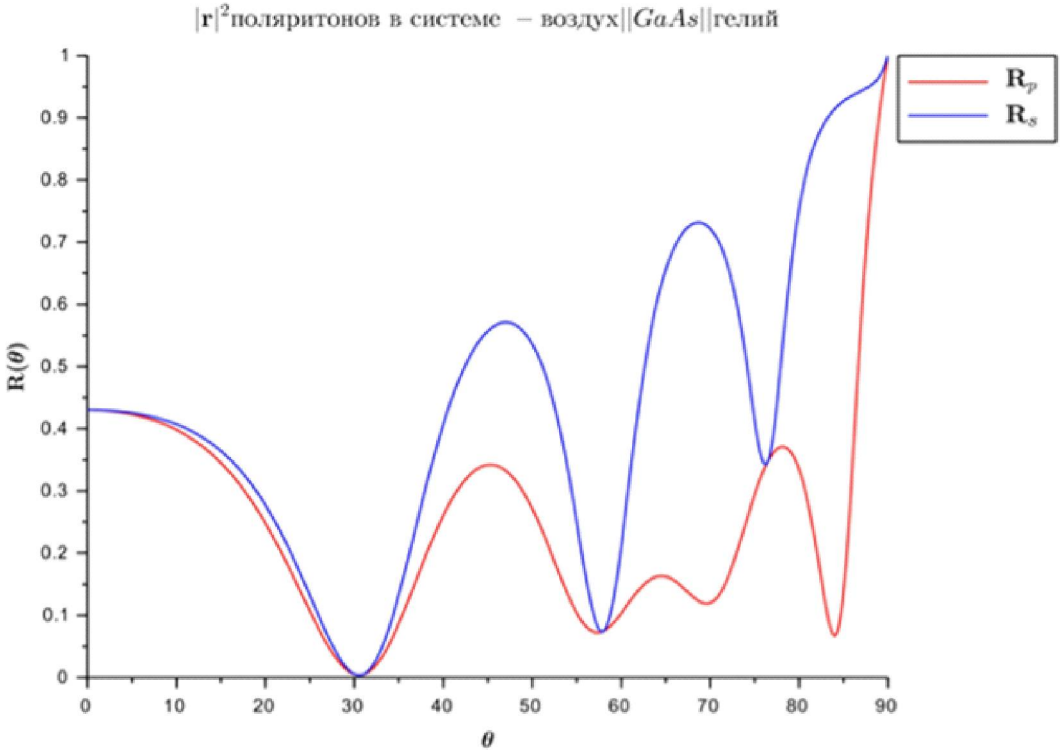


Рис. 3. Угловой спектр энергетических коэффициентов отражения от тонкого слоя GaAs для S- и P-поляризации

Примечание. Частота падающего излучения $\frac{\omega}{\Omega_{TO}} = 1.1$; *n*(воздух) = 1.00059, *n*(гелий) = 1.00007; $\varepsilon_\infty = 15.68, \varepsilon_0 = 17.88$; $\Omega_{TO} = 269$ см$^{-1}$; $\Omega_{LO} = 292$ см$^{-1}$.

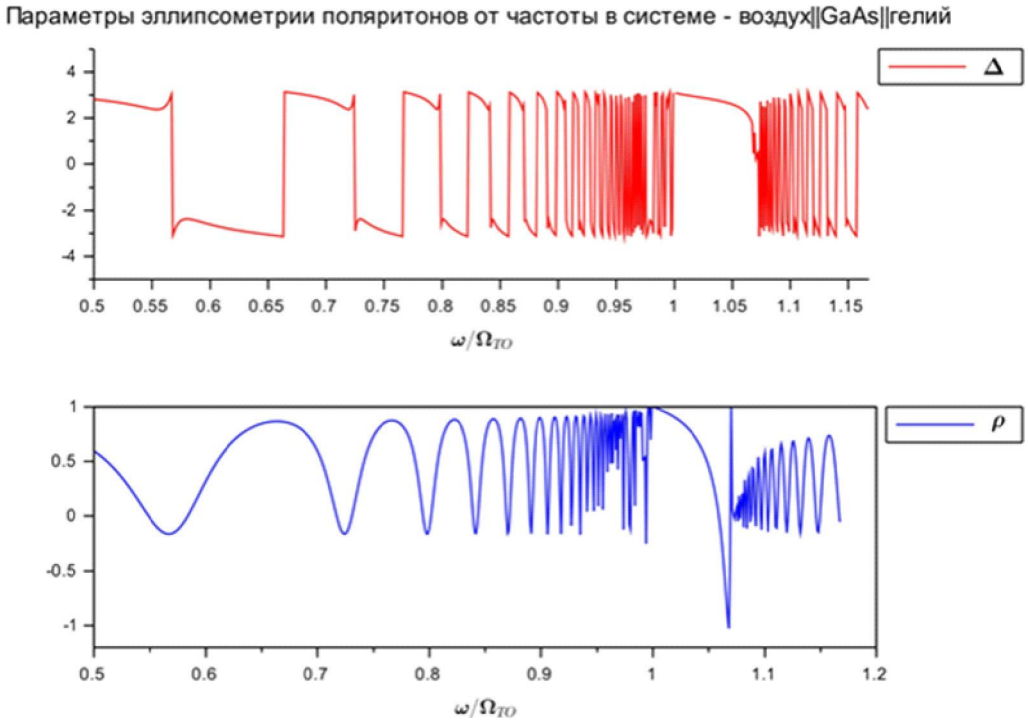


Рис. 4. Частотный спектр параметров эллипсометрии для пленки GaAs

Примечание. Толщина *h* = 2 мкм при угле падающего излучения θ = 45 °; *n*(воздух) = 1.00059, *n*(гелий) = = 1.00007; $\varepsilon_\infty = 15.68, \varepsilon_0 = 17.88$; $\Omega_{TO} = 269$ см$^{-1}$.

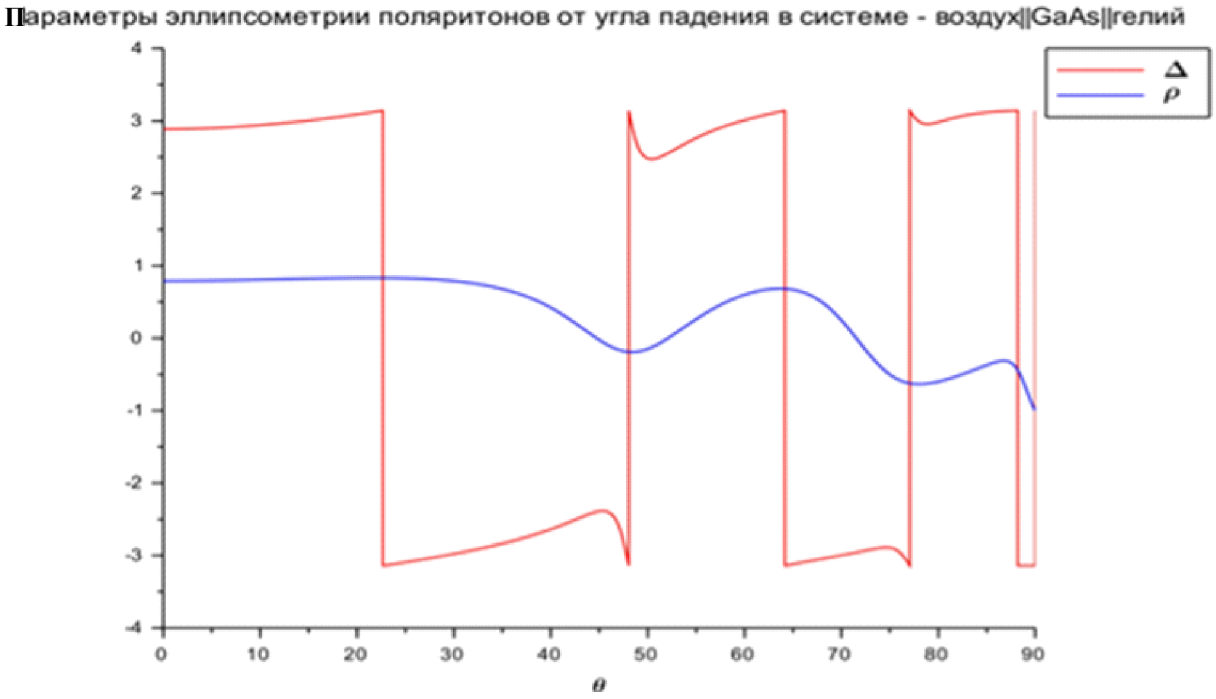


Рис. 5. Угловой спектр параметров эллипсометрии для пленки GaAs с толщиной $h = 2$ мкм, при частоте падающего излучения

Анализ результатов

По полученным графикам для отражения S- и P-поляризованных волн света от тонкого слоя диэлектрика – порядка 2 мкм, состоящего из GaAs (см. рис. 2, 3), было установлено, что количество возникающих пиков отражения увеличивается при приближении к резонансным частотам продольных и поперечных фононов, а также был определен общий вид отражения для исследуемых материалов в зависимости от угла падения на частотах $\omega < \Omega_{TO}$ и $\omega > \Omega_{LO}$.

Установив отражение для S- и P- поляризации, получилось определить параметры эллипсометрии ρ и Δ для тонкой пленки из GaAs. На частотном спектре (см. рис. 4) видна область, равная области запрещенной зоны для соответствующих материалов, где характер поведения эллипсометрических параметров изменяется. Параметры ρ и Δ начинают сильнее меняться при приближении к резонансным частотам и замедляют свое изменение при отдалении от них.

Угловой спектр (рис. 5) для параметров эллипсометрии имеет подобное поведение с частотным спектром. Параметр Δ совершает скачки величиной от π до –π.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аззам, Р. М. А. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. М. А. Аззам ; пер. с англ., под ред. [и предисл.] А. В. Ржанова, К. К. Свитащева. – М. : Мир, 1981. – 583 с.

2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреус, А. И. Головашкин, А. А. Шубин ; ред. Г. П. Мотулевич. – 2-е изд., испр. – М. : Наука : Глав. ред. физ.-мат. лит., 1973. – 720 с.

3. Головнев, Ю. Ф. Фононные поляритоны в EuO / Ю. Ф. Головнев, Д. А. Нургулеев, Я. В. Власова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. – № 2 (221). – С. 47–50.

4. Горелик, В. С. Поляритонные кривые в аморфном кварце, легированном ионами эрбия Er^{3+} / В. С. Горелик, М. Г. Бурданова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 2 (53). – С. 90–100.

5. Горелик, В. С. Унитарные поляритоны в однородных средах и фотонных кристаллах / В. С. Горелик, В. В. Филатов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 8 (20). – С. 49.

6. Горшков, М. М. Эллипсометрия / М. М. Горшков. – М. : Совет. радио, 1974. – 200 с.

7. Достижения в разработке плазмонных волноводных датчиков для измерения показателя преломления / Н. Л. Казанский [и др.] // Компьютерная

оптика. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 295–318. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743

8. Дышлюк, А. В. Сверхчувствительный плазмон-поляритонный рефрактометр на основе нерегулярного металл-диэлектрического световода / А. В. Дышлюк, О. Б. Витрик, Ю. Н. Кульчин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 1 (35). – С. 84–89.

9. Плазмон-поляритоны, управляемые электрическим полем / В. П. Драчев [и др.] // Фотон-экспресс. – 2021. – № 6 (174). – С. 305. – DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-305

10. Tompkins, H. G. Handbook of Ellipsometry / H. G. Tompkins, E. A. Irene. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005. – 886 с. – DOI: 10.1007/3-540-27488-X

REFERENCES

1. Azzam R.M.A. *Ellipsometrija i poljarizovannyj svet* [Ellipsometry and Polarised Light]. Moscow, Mir Publ., 1981. 583 p.

2. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Fundamentals of Optics]. Moscow, Nauka Publ., Glav. red. fiz.-mat. lit., 1973. 720 p.

3. Golovnev Yu.F., Nurguleev D.A., Vlasova Ya.V. Fononnye poljaritony v EuO [Phonon Polaritons in EuO]. *Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 4. Estestvenno-matematicheskie i tehnicheskie nauki* [Natural-Mathematical and Technical Sciences], 2018, vol. 2 (221), pp. 47-50.

4. Gorelik V.S., Burdanova M.G. Poljaritonnye krivye v amorfnom kvarce, legirovannom ionami erbija Er^{3+} [Polariton Curves in Amorphous Quartz Doped with Er^{3+} Erbium Ions]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Serija Estestvennye nauki* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2014, vol. 2 (53), pp. 90-100.

5. Gorelik V.S., Filatov V.V. Unitarnye poljaritony v odnorodnyh sredah i fotonnyh kristallah [Unitary Polaritons in Homogeneous Media and Photonic Crystals]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering Journal: Science and Innovations], 2013, vol. 8 (20), p. 49.

6. Gorshkov M.M. *Ellipsometrija* [Ellipsometry]. Moscow, Sovet. radio Publ., 1974. 200 p.

7. Kazansky N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. Dostizhenija v razrabotke plazmonnyh volnovodnyh datchikov dlja izmerenija pokazatelja prelomlenija [Achievements in the Development of Plasmonic Waveguide Sensors for Refractive Index Measurement]. *Kompjuternaja optika* [Computer Optics], 2020, vol. 44, no. 3, pp. 295-318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743

8. Dyshlyuk A.V., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. Sverhchuvstvitelnyj plazmon-poljaritonnyj refraktometr na osnove nereguljarnogo metall-dijelektricheskogo svetovoda [Supersensitive Plasmon-Polariton Refractometer Based on an Irregular Metal-Dielectric Light Guide]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2015, vol. 1 (35), pp. 84-89.

9. Drachev V.P., Nazarikov G., Roccapriore K., et al. Plazmon-poljaritony, upravljaemye elektricheskim polem [Plasmon-Polaritons Controlled by Electric Field]. *Foton-ekspress* [Photon Express], 2021, vol. 6 (174), p. 305. DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-305

10. Tompkins H.G., Irene E.A. *Handbook of Ellipsometry*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2005. 886 p. DOI: 10.1007/3-540-27488-X

DETERMINATION OF ELLIPSOMETRIC PARAMETERS OF A THIN DIELECTRIC GaAs FILM BETWEEN HELIUM AND AIR ENVIRONMENTS IN THE RANGE CONTAINING RESONANT FREQUENCIES

Petr S. Ivanov

Postgraduate Student,
Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
FNa-241_846589@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation,

Valery V. Yatsyshen

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
yatsyshen.valeriy@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The study presents the results of theoretical calculation of the first and second ellipsometric parameters ρ and Δ for a 2 μm thick GaAs thin film enclosed between air and helium environments. The behavior of the angular reflection spectrum for S- and P-polarized waves near the phonon resonance was determined with the medium parameters Ω_{TO} = 269 см$^{-1}$; Ω_{LO} = 292 см$^{-1}$. The obtained curves of angular spectra R(θ) allowed us to determine the number of reflection peaks near the frequency Ω_{TO} – 2 peaks for GaAs at S polarization, 3 at P polarization, and near Ω_{LO} – 3 peaks at S polarization, 5 at P polarization. Having analyzed the graphs of angular and frequency spectra, we can see the jump-like behavior of Δ. Ellipsometry is the most accurate non-destructive method for determining the optical parameters of surfaces and interfaces for different media. The accuracy of this method can be improved by taking into account the absorption of the media under consideration. Then the refractive index will have a complex form, and the Fresnel formulas will become complex values. The frequency spectrum allows us to see the change in the behavior of the ellipsometry parameters in the forbidden frequency region and also to notice the acceleration of their change when approaching the resonance frequencies.

Key words: resonance frequencies, ellipsometric parameters, phonon resonance, angular reflection spectrum, bulk polaritons.