

УДК 535.39, 535.51, 535.321, 535.341

*Коструба А. М.,
д.ф-м.н., проф., професор кафедри природничих наук і захисту навколишнього середовища,
Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів*

*Стецишин Ю. Б.,
к.х.н., доц., доцент кафедри органічної хімії, Національний університет “Львівська
політехніка”, м. Львів*

*Маєвська С. М.,
к.б.н., доц., доцент кафедри анатомії та фізіології, Львівський державний університет
фізичної культури, м. Львів*

ПРО ДЕЯКІ МОЖЛИВОСТІ КІЛЬКІСНОГО ЕЛІПСОМЕТРИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ДВОМІРНИХ (2D) НАНОМАТЕРІАЛІВ

***Анотація.** Запропоновано алгоритм розрахунку похибок для нового еліпсометричного методу незалежного вимірювання параметрів ультратонких плівок двомірних (2D) наноматеріалів. Отримано залежності похибок показника заломлення і товщини ультратонких плівок від умов експерименту, що визначаються шорсткістю поверхні підкладки і величиною оптичного контрасту на поверхні “плівка-підкладка”. Встановлено, що автоматизація процесу і збільшення числа вимірювань до 25 або 100 дозволить звузити довірчий інтервал у 2 або 4 рази відповідно. Це дозволить пропорційно збільшити точність визначення кута падіння φ_0 , при якому виконується умова $\delta\Psi = 0$, і зменшити, відповідно, похибки основних параметрів прозорої плівки Δn_1 , Δd_1 .*

Ключові слова: еліпсометрія, наноматеріали, оптичний контраст, ультратонка плівка.

*Kostruba A. M.,
Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of Natural Sciences and
Environmental Protection, Lviv University of Trade and Economics, Lviv*

*Stetsyshyn Yu. B.,
Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Organic Chemistry, “Lviv
Polytechnic” National University, Lviv*

*Maevska S. M.,
Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Anatomy and Physiology, Lviv
State University of Physical Culture, Lviv*

ABOUT SOME POSSIBILITIES OF A QUANTITATIVE ELLIPSOMETRIC EXPERIMENT FOR THE INVESTIGATION OF TWO-DIMENSIONAL (2D) NANOMATERIALS STRUCTURE

***Abstract.** An algorithm for calculation of errors for a new ellipsometric method of independent measurement of parameters of ultrathin films of two-dimensional (2D) nanomaterials is proposed. The dependences of the refractive index and thickness of ultrathin films on the experimental conditions determined by the roughness of the lining surface and the magnitude of the optical contrast on the “film-lining” surface are obtained. It has been established that the automation of the process and the increase in the number of measurements up to 25 or 100 will reduce the confidence interval in 2 or 4 times, respectively. This will allow a proportional increase in the accuracy of the determination of the angle φ_0 at which the condition $\delta\Psi = 0$ is fulfilled, and to reduce, accordingly, the errors of the basic parameters of the transparent film, Δn_1 , Δd_1 .*

Keywords: ellipsometry, nanomaterials, optical contrast, ultrathin film.

Постановка проблеми. Незважаючи на надзвичайно високу чутливість методу еліпсометрії, інтерпретація експериментальних даних для дуже тонких шарів ($d < 10$ нм) аж до моно- і суб-моношарового режиму залишається актуальною задачею на даний час, оскільки у галузі нанотехнологій в останні роки значна увага приділяється так званім двомірним (2D) наноматеріалам через їхнє важливе теоретичне значення та широкі перспективи застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моно- та малошарові наноматеріали володіють новими комбінаціями оптичних та електронних властивостей, що можуть внаслідок впливу квантових розмірних ефектів суттєво відрізнитися від властивостей цих матеріалів у об'ємі [1-4]. Це представляє унікальні можливості в дослідженні структури речовин у конденсованих станах, а також може забезпечити стрімкі зміни у напівпровідникових технологіях – створення гнучких та надтонких електронних [4, 5] та оптоелектронних пристроїв [6], джерел відновлюваної енергії у фотоелектричних сонячних батареях, 2D- фотокаталізаторах для розщеплення молекул води на основі таких двомірних матеріалів, як BiOI , C_3N_4 та ін. Надзвичайно інтенсивно досліджуються властивості 2D-наноматеріалів із сімейства диалкогенідів перехідних металів: MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 і WSe_2 [7].

Інтенсивні дослідження, спрямовані на покращення властивостей 2D-матеріалів, ведуться з використанням таких стратегій, як структурне проектування матеріалів [8, 9], декорування їх за допомогою благородних металів [10], використання легуючих елементних домішок [11], конструювання гетероструктур [12]. Крім того, передбачено [13], що деякі оптичні параметри цих плівок можуть також залежати від товщини шару. Тому актуальним завданням є, на нашу думку, отримання експериментальних даних, якими можна було б надійно підтвердити передбачені теоретично розмірні ефекти та оцінити їх вплив на макроскопічні оптичні параметри.

Відомо, що найбільш чутливим методом характеристики ефективних оптичних параметрів ультратонких плівок структур є еліпсометрія. Однак системні труднощі методу в області товщин, менших 10 нм, пов'язані з тим, що шлях проходження світла у такій структурі є значно меншим від довжини хвилі [14, 15]. В цьому випадку завдання розділення товщини і показника заломлення плівки є дуже складним.

При переході до ультратонких плівок розв'язок оберненої задачі стає надзвичайно нестійким по відношенню до експериментальних похибок еліпсометричних параметрів Δ і Ψ . Навіть незначні похибки порядку однієї кутової мінути при визначенні амплітудного параметра Ψ за традиційного підходу до розв'язку оберненої задачі можуть призводити до отримання абсолютно нереальних значень параметрів плівки [16].

Г. Мотшман зі співавторами в ряді робіт [17-18] приходять до висновку, що наявність плівок органічного походження з показником заломлення 1,3-1,6 і товщиною, меншою 5 нм, на кремнієвій підкладці призводить до надзвичайно малих змін у відбиваючій здатності поверхні у всьому кутовому діапазоні. Як наслідок, зміни амплітудного параметра Ψ у цьому випадку стають меншими від чутливості приладу.

В деяких роботах досліджувався вплив підкладки на можливість розділення параметрів ультратонкої прозорої плівки. Було показано [19], що у видимій області спектра використання скляних підкладок забезпечує вищу чутливість фазового еліпсометричного параметра Δ до зміни показника заломлення ультратонкої плівки, ніж у випадку кремнієвої підкладки.

Спробу оцінити вплив параметрів підкладки на точність отриманого результату щодо показника заломлення ультратонкої плівки при фіксованому значенні її товщини було здійснено в [20]. У випадку використання кремнієвої підкладки дуже важко відчути різницю між оптичними відгуками плівок такої товщини з різними показниками заломлення аж до енергій 3 еВ. Ситуація суттєво покращується у цьому спектральному діапазоні при використанні прозорої підкладки з показником заломлення 1,5.

Постановка завдання. Запропонована в наших попередніх роботах [21] еліпсометрична методика дозволила суттєво підвищити точність вимірювань при одночасному визначенні товщини і показника заломлення ультратонких прозорих плівок в області низького оптичного контрасту. Застосування цієї методики для дослідження ультратонких плівок структур із суттєво відмінними оптичними параметрами вимагає проведення попередніх розрахунків з метою визначення оптимальних умов еліпсометричного експерименту, при яких забезпечується максимальна точність результату.

Необхідним етапом на шляху впровадження даного методу є оцінка похибок, які виникають при розрахунку оптичних параметрів і товщини ультратонкого шару, в залежності від умов експерименту. Найважливішим параметром, який впливає на точність методу, є оптичний контраст – співвідношення між показниками заломлення підкладки і плівки. Метою цієї роботи є визначення впливу оптичного контрасту на поверхні “плівка-підкладка” на точність результату незалежного вимірювання параметрів ультратонкого шару з товщиною, меншою 10 нм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Похибки у визначенні показника заломлення прозорої плівки згідно із запропонованою методикою визначаються наступним співвідношенням:

$$\Delta n_1 = \frac{dn_1}{d\varphi} \Delta\varphi, \quad (1)$$

де $\frac{dn_1}{d\varphi}$ – похідна, що визначається нахилом майже лінійної залежності $n_1(\varphi)$. Середнє значення цієї похідної становить 0,04 град⁻¹.

$\Delta\varphi = \frac{d\varphi}{d(\delta\Psi)} \Delta(\delta\Psi)$ – похибка у визначенні кута

падіння, при якому виконується умова $\delta\Psi = 0$,

$\frac{d\varphi}{d(\delta\Psi)}$ – похідна, що визначається нахилом

залежності $\delta\Psi(\varphi)$ в околі точки $\delta\Psi = 0$, $\Delta(\delta\Psi)$ – похибка у визначенні різниці $\Psi_0 - \Psi$, яка

визначається чутливістю приладу у визначених умовах експерименту.

Як відомо із [22], мінімальна зміна кута Ψ , що може бути зареєстрована еліпсометром в робочому діапазоні кутів падіння, обмежується лише його апаратною чутливістю і становить $\pm 0,01$ градуса. Тому для величини похибки $\Delta(\delta\Psi)$ було прийняте значення 0,02 град.

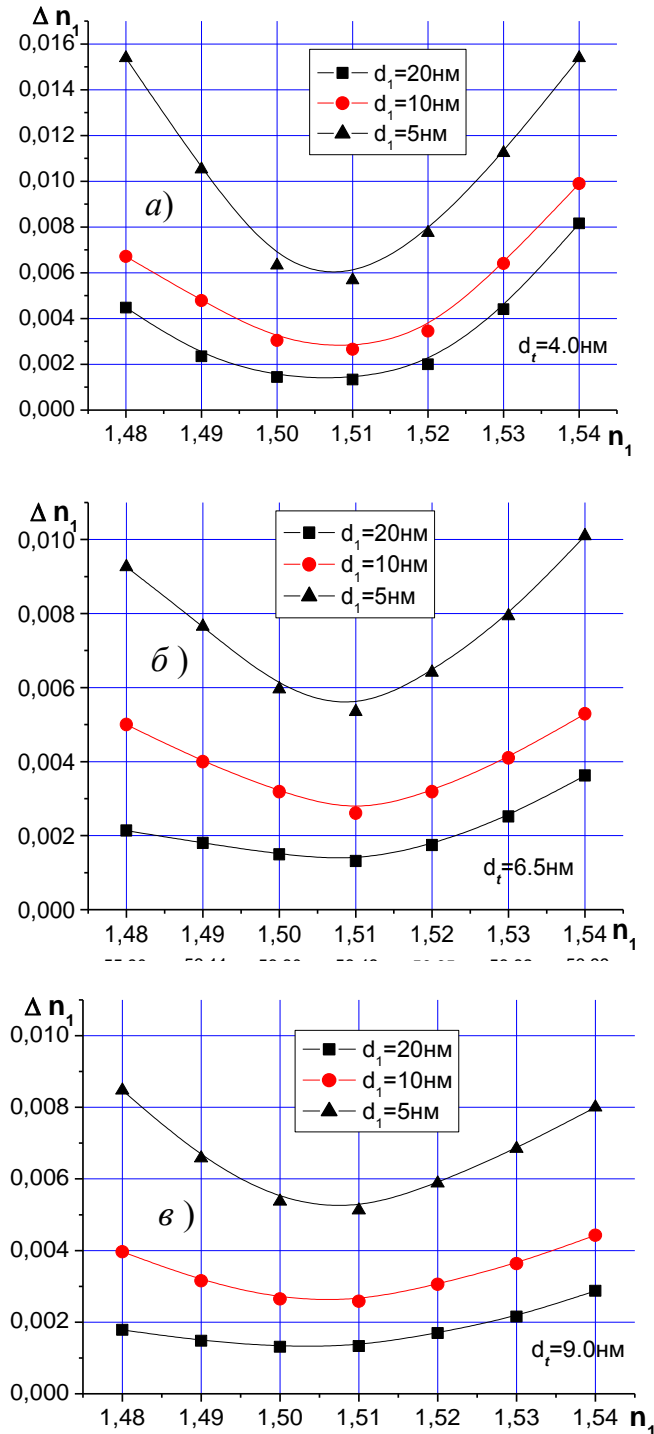


Рис. 1. Залежності похибок у визначенні показника заломлення прозорої плівки від умов експерименту, показника заломлення n_1 і товщини d_1 прозорої плівки для різних моделей підкладки, що відрізняються товщиною перехідного шару: а) $d_t = 4,0$ нм; б) $d_t = 6,5$ нм; в) $d_t = 9,0$ нм.

Величини $\frac{dn_1}{d\varphi}$ і $\Delta(\delta\Psi)$ не залежать від умов експерименту і товщини плівки d_1 . Отже, залежність похибки показника заломлення Δn_1 від товщини плівки d_1 і умов експерименту визначається в основному залежністю похідної $\frac{d\varphi}{d(\delta\Psi)}$ від цих параметрів. Нами було проведено

розрахунки величини похибки Δn_1 в залежності від умов експерименту (оптичного контрасту) і товщини прозорої плівки згідно із співвідношенням (1) для трьох зразків підкладки, що суттєво відрізняються товщиною перехідного шару. Результати представлено на рис. 1. Умови експерименту визначаються кутом падіння світлового випромінювання, котрий за дотримання запропонованої методики однозначно пов'язаний із показником заломлення прозорої плівки співвідношенням [21]:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \sqrt{\frac{(n_0^2 + k_0^2)(n_1^2 - 1)}{n_1^2 - 2(n_0^2 - k_0^2) + (n_0^2 + k_0^2)^2}} \quad (2)$$

Очевидно, що величина похибки Δn_1 суттєво зростає при зменшенні товщини прозорої плівки d_1 а також при збільшенні різниці між показниками заломлення плівки і підкладки $(n_1 - n_0)$. Це пояснюється особливістю кутових залежностей $\delta\Psi(\varphi)$ в околі точки $\delta\Psi = 0$, що мають максимальний нахил за умови $n_1 = n_0$:

$$d(\delta\Psi)/d\varphi|_{n_1=n_0} \rightarrow \max.$$

Товщина перехідного шару d_t , змінюючись у тих межах, що є характерними для стандартних скляних підкладок (4,0÷9,0 нм), чинить дуже помірний вплив на похибку Δn_1 .

Однак величина похибки у визначенні показника заломлення прозорої плівки згідно із запропонованою методикою залишається приблизно на

порядок меншою, ніж у випадку використання прямих оптимізаційних методів. Особливо відчутною є перевага в області низького оптичного контрасту між плівкою і підкладкою.

Похибки у визначенні товщини прозорої плівки для запропонованої методики визначаються не лише точністю визначення кута падіння φ_0 , що відповідає умові незмінності параметра Ψ , але і чутливістю приладу до зміни фазового параметра Δ , яка згідно із результатами, отриманими у [22], суттєво змінюється в області головного кута падіння.

У роботі [21] нами було отримане лінійне співвідношення між зміною фазового еліпсометричного параметра Δ і товщиною плівки d_1 , що має місце за умови використання запропонованої методики вимірювань:

$$\Delta - \Delta_0 = S d_1, \quad (3)$$

де коефіцієнт S характеризує чутливість еліпсометричного кута Δ до зміни товщини плівки і також залежить у першу чергу від умов експерименту.

Отже, враховуючи співвідношення (3), похибка у визначенні товщини плівки повинна визначатись як похибка непрямих вимірювань:

$$\Delta d_1 = \sqrt{\left(\frac{d(d_1)}{dS} \Delta S\right)^2 + \left(\frac{d(d_1)}{d(\delta\Delta)} \Delta(\delta\Delta)\right)^2}, \quad (4)$$

де ΔS і $\Delta(\delta\Delta)$ – похибки у визначенні коефіцієнта чутливості S і зміни фазового параметра $\delta\Delta = \Delta - \Delta_0$ відповідно. Похибка ΔS пропорційна похибці у визначенні кута падіння φ_0 . Коефіцієнт пропорційності визначається нахилом залежності $S(\varphi_0)$. Похибка $\Delta(\delta\Delta)$ визначається чутливістю приладу до зміни фазового параметра Δ , яка згідно із висновками роботи [22] досягає максимуму в області головного кута падіння. Похідні $\frac{d(d_1)}{dS} = \frac{\delta\Delta}{S^2}$, $\frac{d(d_1)}{d(\delta\Delta)} = \frac{1}{S}$ визначаються із рівняння (2).

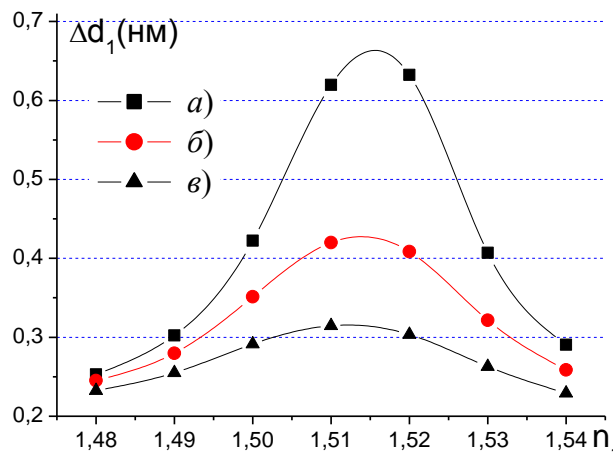


Рис. 2. Залежності похибок у визначенні товщини прозорої плівки від умов експерименту $n_1(\varphi)$ і товщини перехідного шару d_t для різних моделей підкладки, що відрізняються товщиною перехідного шару: а) $d_t = 4,0$ нм; б) $d_t = 6,5$ нм; в) $d_t = 9,0$ нм.

Перший доданок у (4) не залежить від товщини прозорої плівки, оскільки похідна $\frac{d(d_1)}{dS}$ прямо

пропорційна, а похибка ΔS обернено пропорційна до d_1 . Другий доданок за визначенням є інваріантом по відношенню до товщини прозорої плівки. Тому на рис. 2 представлено результати розрахунку похибки Δd_1 лише для товщини прозорої плівки $d_1 = 10 \text{ нм}$ і в залежності від двох параметрів, а саме: умов експерименту $n_1(\varphi_0)$ і властивостей перехідного шару d_t .

Зростання похибки у визначенні товщини плівки в області низького оптичного контрасту ($n_1 \approx n_0$) визначається в основному ростом похибки $\Delta(\delta\Delta)$, що залежить від чутливості вихідного сигналу приладу до зміни фазового параметра Δ , яка згідно із [22] є мінімальною в області головного кута падіння. Ця чутливість зменшується також при покращенні якості поверхні внаслідок прямування до нуля амплітудного коефіцієнта відбивання R_p в області головного кута. Цим пояснюється зростання похибки Δd_1 при зменшенні товщини перехідного шару.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Представлені результати були отримані для довірчих інтервалів $\Delta(\delta\Psi)$ і $\Delta(\delta\Delta)$, розрахованих для окремого акту вимірювання згідно із (3.4). Однак, як відомо, межі довірчого інтервалу звужуються зі збільшенням кількості вимірювань згідно з законом:

$$\varepsilon = t\sigma/\sqrt{n},$$

де t – коефіцієнт довіри за розподілом Стюдента, який зменшується з ростом числа вимірювань n , σ – середньоквадратичне відхилення окремого вимірювання, що характеризує концентрацію результатів відносно центру розподілу. Отже, автоматизація процесу і збільшення числа вимірювань до 25 або 100 дозволить звужити довірчий інтервал у 2 або 4 рази відповідно. Це дозволить пропорційно збільшити точність визначення кута падіння φ_0 , при якому виконується умова $\delta\Psi = 0$, і зменшити, відповідно, похибки основних параметрів прозорої плівки Δn_1 , Δd_1 .

Запропонована методика пройшла неодноразово апробацію при дослідженнях процесів модифікації поверхні скла різноманітними покриттями [23-26].

ЛІТЕРАТУРА

1. Neto A. H. C. The electronic properties of graphene / A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – 81. – P. 109-162.
2. Splendiani A. Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂ / A. Splendiani, et al. // *Nano Lett.* – 2010. – 10. – P. 1271-1275.
3. Mak K. F. Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor / K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and T. F. Heinz // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – 105. – P. 136805.

4. Radisavljevic B. Single-layer MoS₂ transistors / A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, and A. Kis // *Nature Nanotech.* – 2011. – 6. – P. 147-150.

5. Wang H. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides / H. Wang et al. // *Nature Nanotech.* – 2012. – 7. – P. 699-712.

6. Sundaram R. S. Electroluminescence in Single Layer MoS₂ / R. S. Sundaram, et al. // *Nano Lett.* – 2013. – 13. – P. 1416-1421.

7. Kravets V.G. Ellipsometry and optical spectroscopy of low-dimensional family TMDs / V.G. Kravets et al. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* // 2017. – 20. – N 3. – P. 284-296.

8. Lei Y. Room temperature, template-free synthesis of BiOI hierarchical structures: visible-light photocatalytic and electrochemical hydrogen storage properties / Y. Lei et al. // *Dalton Trans.* – 2010. – 39. – P. 3273-3278.

9. Liu Q.-C. Various Bismuth Oxyiodide Hierarchical Architectures: Alcohothermal-Controlled Synthesis, Photocatalytic Activities, and Adsorption Capabilities for Phosphate in Water / Q.-C. Liu et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2013. – 5. – P. 11927-11934.

10. Cheng H. One-step synthesis of the nanostructured AgI/BiOI composites with highly enhanced visible-light photocatalytic performances / Cheng H. et al. // *Langmuir* 2010. – 26. – P. 6618-6624.

11. Zhang X. Electronic and band structure tuning of ternary semiconductor photocatalysts by self doping: the case of BiOI / X. Zhang et al. // *J. Phys. Chem. C.* – 2010. – 114. – P. 18198-18206.

12. Jiang J. ZnO/BiOI heterostructures: photo-induced charge-transfer property and enhanced visible-light photocatalytic activity / J. Jiang et al. // *J. Phys. Chem. C.* – 2011. – 115. – P. 20555-20564.

13. Zhang, X. The stabilities and electronic structures of single-layer bismuth oxyhalides for photocatalytic water splitting / Zhang, X. et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2014. – 16. – P. 25854-25861.

14. Azzam R. M. A. Ellipsometry and polarized light / R. M. A. Azzam, and N. M. Bashara. – Amsterdam: North-Holland, 1987. – 539 p.

15. Aspnes D. E. Spectroscopic ellipsometry of solids / D. E. Aspnes // in *Optical Properties of Solids: New Developments*, edited by B. O. Seraphin. – Amsterdam: North-Holland, 1976. – P. 801-846.

16. Бобро В. В. О характере математической некорректности обратной задачи эллипсометрии для сверхтонких поверхностных пленок / В. В. Бобро, А. И. Семенов // *Научное приборостроение.* – 2000. – Т. 10, № 4. – С. 31-37.

17. Teppner R. On the analysis of ellipsometric measurements of adsorption layers at fluid interfaces / R. Teppner, S. Bae, K. Haage, H. Motschmann // *Langmuir.* – 1999. – Vol. 15. – P. 7002-7007.

18. Reiter R. Ellipsometric microscopy. Imaging monomolecular surfactant layers at the air-water interface / R. Reiter, H. Motschmann, H. Orendi, A. Nemetz, W. Knoll, // *Langmuir.* – 1992. – Vol. 8. – P. 1784-1788.

19. Ellipsometry of Functional Organic Surfaces and Films / ed-s: K. Hinrichs, K. J. Eichhorn. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 362 p.

20. Johs B. Overview of variable angle spectroscopic ellipsometry (VASE). Part II: advanced applications / B. Johs, J.A. Woollam, C.M. Herzinger, J. Hilfiker, R. Synowicky, C.L. Bungay // *Crit. Rev. Opt. Sci. Technol.* – 1999. – Vol. CR72. – P. 29-58.

21. Kostruba A. Method for determination of the parameters of transparent ultrathin films deposited on transparent substrates under conditions of low optical contrast/ A. Kostruba, Yu. Stetsyshyn, and R. Vlokh // *Applied Optics.* – Vol. 54. – 2015. – P. 6208-6216.

22. О точности и чувствительности метода эллипсометрии. I точность метода / К. К. Свиташев, А. И. Семененко, Л. В. Семененко, Е. С. Филатова // *Опт. и Спектр.* – 1972. – Т. 33. – С. 742-747.

23. Kostruba A. Surface modification by grafted sensitive polymer brushes: An ellipsometric study of their properties / A. Kostruba, M. Ohar, B. Kulyk, O. Zolobko, Y. Stetsyshyn // *Applied Surface Science.* – 2013. – Vol. 276. – P. 340-346.

24. Stetsyshyn Yu. Temperature and pH dual-responsive POEGMA-based coatings for protein adsorption / Yu. Stetsyshyn et al. // *Journ. Coll. Interf. Sci.* – 2013. – Vol. 411. – P. 247-256.

25. Kostruba A. Ex-situ ellipsometric study of the nanolayers of dihydroanthracene oligoperoxide adsorbed on glass surface / A. Kostruba et al. // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2010. – Vol. 11. – № 4. – P. 269-276.

26. Stetsyshyn Y. Formation, structure and wettability of fluorescent nanolayers of oligoperoxide europium complexes adsorbed to glass surface / Yu. Stetsyshyn et al. // *Thin Solid Films.* – 2010. – Vol. 518, № 15. – P. 4318-4321.

REFERENCES

1. Neto A. H. C. et al. (2009), The electronic properties of grapheme, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 81, pp. 109-162.

2. Splendiani A. et al. (2010) Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂, *Nano Lett.*, vol. 10, pp. 1271-1275.

3. Mak, K. F. et al. (2010), Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, p. 136805.

4. Radisavljevic B. et al. (2011), Single-layer MoS₂ transistors, *Nature Nanotech.*, vol. 6, pp. 147-150.

5. Wang H. et al. (2012), Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, *Nature Nanotech.*, vol 7, pp. 699-712.

6. Sundaram, R. S. et al. (2013), Electroluminescence in Single Layer MoS₂, *Nano Lett.*, vol. 13, pp. 1416-1421.

7. Kravets, V. G. et al. (2017), Ellipsometry and optical spectroscopy of low-dimensional family TMDs, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 20, pp. 284-296.

8. Lei Y. et al. (2010), Room temperature, template-free synthesis of BiOI hierarchical structures: visible-light photocatalytic and electrochemical hydrogen storage properties, *Dalton Trans.*, vol. 39, pp. 3273-3278.

9. Liu Q.-C. et al. (2013), Various Bismuth Oxyiodide Hierarchical Architectures: Alcohothermal-Controlled Synthesis, Photocatalytic Activities, and Adsorption Capabilities for Phosphate in Water, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, pp. 11927-11934.

10. Cheng H. et al. (2010), One-step synthesis of the nanostructured AgI/BiOI composites with highly enhanced visible-light photocatalytic performances, *Langmuir*, vol. 26, pp. 6618-6624.

11. Zhang X. et al. (2010), Electronic and band structure tuning of ternary semiconductor photocatalysts by self doping: the case of BiOI, *J. Phys. Chem. C.*, vol. 114, pp. 18198-18206.

12. Jiang J. et al. (2011), ZnO/BiOI heterostructures: photoinduced charge-transfer property and enhanced visible-light photocatalytic activity, *J. Phys. Chem. C.*, vol. 115, pp. 20555-20564.

13. Zhang, X. et al. (2014), The stabilities and electronic structures of single-layer bismuth oxyhalides for photocatalytic water splitting, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 16, pp. 25854-25861.

14. Azzam R. M. A. and Bashara, N. M. (1987), *Ellipsometry and polarized light*, North-Holland, Amsterdam, 539 p.

15. Aspnes, D. E. (1976), Spectroscopic ellipsometry of solids, in *Optical Properties of Solids: New Developments*, edited by B. O. Seraphin, North-Holland, Amsterdam, pp. 801-846.

16. Bobro, V. V. (2000), O kharaktere matematicheskoj nekorektnosti obratnoj zadachy ellypsometrii dlia sverkh-tonkikh poverkhnostnykh plenok, *Nauchnoe Pryborostroenie*, vol. 10, pp. 31-37.

17. Teppner R. et al. (1999), On the analysis of ellipsometric measurements of adsorption layers at fluid interfaces, *Langmuir*, vol. 15, pp. 7002-7007.

18. Reiter R. et al. (1992), Ellipsometric microscopy. Imaging monomolecular surfactant layers at the air-water interface, *Langmuir*, vol. 8, pp. 1784-1788.

19. *Ellipsometry of Functional Organic Surfaces and Films*, editors: K. Hinrichs, K. J. Eichhorn (2014), Springer-Verlag, Berlin, 362 p.

20. Johs B. et al. (1999), Overview of variable angle spectroscopic ellipsometry (VASE). Part II: advanced applications, *Crit. Rev. Opt. Sci. Technol.*, vol. CR72, pp. 29-58.

21. Kostruba A., Stetsyshyn Yu. and Vlokh R. (2015), Method for determination of the parameters of transparent ultrathin films deposited on transparent substrates under conditions of low optical contrast, *Applied Optics*, vol. 54, pp. 6208-6216.

22. Svytashev, K. K. et al. (1972), O tochnosti i chuvstvitel'nosti metoda ellypsometrii. I tochnost' metoda, *Optika i Spektroskopija*, vol. 33, pp. 742-747.

23. Kostruba A. et al. (2013), Surface modification by grafted sensitive polymer brushes: An ellipsometric study of their properties, *Applied Surface Science*, vol. 276, pp. 340-346.

24. Stetsyshyn Yu. et al. (2013), Temperature and pH dual-responsive POEGMA-based coatings for protein adsorption, *Journ. Coll. Interf. Sci.*, vol. 411, pp. 247-256.

25. Kostruba A. et al. (2010), Ex-situ ellipsometric study of the nanolayers of dihydroanthracene oligoperoxide adsorbed on glass surface, *Ukr. J. Phys. Opt.*, vol. 11, pp. 269-276.

26. Stetsyshyn Y. et al. (2010), Formation, structure and wettability of fluorescent nanolayers of oligoperoxide europium complexes adsorbed to glass surface, *Thin Solid Films*, vol. 518, pp. 4318-4321.