

УДК 539.394, 539.233

Г.В. ДОРОЖИНСЬКИЙ¹, Г.В. ДОРОЖИНСЬКА², В.П. МАСЛОВ¹

ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ПОЛІМЕРИЗАЦІЇ ОПТИЧНИХ КЛЕЇВ

¹*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
проспект Науки, 45, Київ, 03028*

²*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, e-mail: annakushnir30@ukr.net*

Анотація. Оптичні клеї широко застосовуються в оптичному виробництві, при цьому оптична якість з'єднання залежить від узгодження показників заломлення клею та матеріалу деталей, а технологічність процесу з'єднання – від оптимальної швидкості полімеризації. Запропоновано метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу для контролю у реальному часі процесу полімеризації оптичних клеїв, що показано на прикладі фотополімерних клеїв марок Akrol-3-360 і UV630. По розрахованим швидкостям та тривалості фотополімеризації визначено, що клей марки UV630 має на 25% більшу швидкість полімеризації та майже у два рази менший термін полімеризації, ніж клей марки Akrol-3-360.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, показник заломлення, клей, полімеризація, ультрафіолетове випромінювання.

Аннотация. Оптические клеи широко применяются в оптическом производстве, при этом оптическое качество соединения зависит от согласования показателей преломления клея и материала деталей, а технологичность процесса соединения – от оптимальной скорости полимеризации. Предложен метод на основе явления поверхностного плазмонного резонанса для контроля в реальном времени процесса полимеризации оптических фотополімерных клеев, показано на примере клеев марок Akrol-3-360 и UV630. По рассчитанным скоростям и продолжительности фотополімеризации определено, что клей марки UV630 имеет на 25% большую скорость полимеризации и почти в два раза меньший срок полимеризации, чем клей марки Akrol-3-360.

Ключевые слова: поверхностный плазмонный резонанс, показатель преломления, клей, полимеризация, ультрафиолетовое излучение.

Abstract. Optical adhesives are widely used in optical production, with the optical quality of the connection depends on the matching of the refractive indices of the glue and the material of the parts, and the technological process of the connection - from the optimal rate of polymerization. A method based on the phenomenon of surface plasmon resonance for real-time control of the polymerization process of optical adhesives is proposed, as demonstrated by the example of the Akrol-3-360 and UV630 photopolymer adhesives. According to the calculated speed and duration of photopolymerization, the UV630 grade adhesive has a 25% higher polymerization rate and almost twice the polymerization time than the Akrol-3-360 grade adhesive.

Key words: surface plasmon resonance, refractive index, glue, polymerization, ultraviolet radiation.

DOI: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-65-72

ВСТУП

Клеї використовуються в різних областях науки і техніки: електроніка, зв'язок, мікромеханіка, медицина, біологія, інформаційна та лазерна техніка, хімія, приладобудування. Розвиток систем і технологій для створення полімерних елементів стимулюється в даний час не тільки в науковій практиці, а й потребами передових галузей промисловості, оскільки склеювання є одним з найбільш економічних і ефективних способів збирання деталей. Клейові сполуки мають високу довготривалу міцність, вібро- і тріщиностійкість, стійкість до впливу численних експлуатаційних факторів. Різноманітність клеїв дає можливість при розробці нових виробів вибрати з усього асортименту клеючих матеріалів ті, які повністю відповідають різним технічним вимогам до клейових з'єднань. Клейові сполуки використовуються і при формуванні деталей методом 3-D друку, для якого надзвичайно важливо збільшувати швидкість полімеризації клею [1]. Технології формування деталей методом склеювання шарів матеріалу широко застосовуються при виготовленні моделей різних деталей в зв'язку з відносною

простотою і невисокою вартістю. Так, наприклад, в радіоелектроніці, склеювання окремих шарів в монолітну структуру є найбільш відповідальним моментом в процесі виготовлення багатошарових друкованих плат, при цьому в процесі полімеризації деталі витримуються при заданій температурі, а час витримки залежить від швидкості полімеризації клею [2]. В точному машинобудуванні застосовується спосіб з'єднання скляних та склокерамічних деталей за допомогою фотополімерних клейових композицій (ФКК) [3]. Полімеризація ФКК протікає під дією УФ-випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 250 до 405 нм. Переважна кількість ФКК має пік поглинання в діапазоні 360-370 нм. Такий спосіб має ряд переваг в порівнянні з іншими способами з'єднання оптичних деталей, а саме дає можливість на десятки годин скоротити витрати часу на операцію складання; усунути температурний вплив на деталі, що з'єднуються; юстувати оптичні деталі безпосередньо перед склеюванням. Додавання до складу ФКК низькодисперсних наповнювачів зменшує усадку клею після полімеризації, знижує внутрішні напруження в зоні з'єднання оптичних деталей і підвищує надійність з'єднання. Крім того, нанорозмірні наповнювачі підвищують швидкість процесу полімеризації, що вигідно з точки зору технологічності і економічності виробництва оптичного устаткування. При виробництві прецизійної оптики необхідно контролювати оптичні параметри не тільки деталей, а й клейового з'єднання. Одним з найважливіших таких параметрів є показник заломлення, значення якого у ФКК і у оптичних деталей мають бути однакові для забезпечення відсутності спотворень оптичного сигналу, котрий проходить через них. Тому актуальним завданням є визначення показника заломлення ФКК і швидкості їх полімеризації в процесі розробки і випробування нових ФКК для потреб промисловості.

Дослідження кінетики полімеризації, моніторинг фазових переходів і зміни показника заломлення необхідні для поліпшення якості продукції та підвищення ефективності технологічного процесу. Найбільш поширені серед існуючих методів визначення показника заломлення полімерних клейових композицій і дослідження процесів полімеризації: рефрактометричний метод і метод інфрачервоної спектроскопії. Рефрактометричний метод заснований на визначенні показника заломлення по куту повного внутрішнього відбиття (ПВВ) і реалізується за допомогою оптичних рефрактометрів, які можуть вимірювати рідкі та тверді речовини (після полімеризації). Проте оптичні рефрактометри (наприклад, Reichert AR600) мають відносно невисоку точність вимірювання показника заломлення (абсолютна похибка $\pm 0,00002$) і вимагають значного об'єму досліджуваної речовини (мінімум 300 мкл). Крім того вони не призначені для дослідження процесів полімеризації в реальному часі, так як досліджуваний зразок приклеюється до вимірювальної призми, що приводить рефрактометр в неробочий стан. Інфрачервона спектроскопія широко використовується для отримання інформації про механізм і кінетику полімеризації, а також визначення відношень реакційних здатностей і енергій активації [4]. Даний метод дозволяє постійно відслідковувати ключові елементи полімеризації (мономери і полімери) і надає безперервну інформацію про кінетику реакцій полімеризації. Інфрачервона спектроскопія зазвичай використовується як незалежне джерело даних, що доповнюють автономні аналітичні методи (високоєфективна рідинна хроматографія і ядерний магнітний резонанс). Однак ці методи коштовні, вимагають додаткових реактивів, а також спеціального оснащення (прозорі в ІЧ області оптики і системи осушення повітря).

Альтернативним методом для визначення показника заломлення ФКК і процесів полімеризації може бути аналітичний метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Оптичні вимірювання, засновані на явищі ППР, широко застосовуються в хіміко-біологічному аналізі при реєстрації молекулярної адсорбції в різних середовищах від газів до рідин [5-9] та твердих речовин (наприклад, неорганічних твердих частинок [10] та органічних плівок Ленгмюр-Блоджетт [11]). Аналітичні прилади на основі явища ППР мають високу точність вимірювання (досяжна абсолютна похибка $\pm 3 \cdot 10^{-8}$ в приладі Biosoge T200) і малий об'єм досліджуваної речовини: 0,1...10 мкл. Діагностичні ППР-прилади мають високу чутливість до низьких концентрацій досліджуваних речовин, що дозволяє використовувати їх у якості точних аналітичних приладів в лабораторних дослідженнях, котрі проводяться в харчовій, хімічній та фармацевтичній промисловостях, сільському господарстві, медицині та екології [12-15].

Метою роботи було дослідження можливості методу ППР для визначення показників заломлення оптичних фотополімерних клеїв і кінетики полімеризації.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Об'єктами дослідження були показники заломлення і полімеризаційні характеристики двох марок фотополімерних клеїв UV630 (Permabond, USA) і Akrol-3-360 (Milli, Ukraine). Ці марки фотополімерних клеїв є представниками двох класів фотоадгезивів: фотополімерні клеї для з'єднання прецизійних оптичних деталей в точному машинобудуванні (UV630) і фотополімерні клеї для з'єднання конструкційних деталей (Akrol-3-360).

Визначення показника заломлення здійснювали за допомогою рефрактометра ППР "Плазмон-71", по величині кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття (кривої ППР) та/або кутового положення критичного кута при повному внутрішньому відображенні (ПВВ). Цей прилад побудовано на оптичній геометрії Кречмана [16] та розроблено в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України. Прилади серії "Плазмон" забезпечують вимірювання кута падіння в діапазоні від 54 до 74 градусів та визначення показника заломлення в діапазоні від 1,331 (вода) до 1,485 (моторне мастило) [12] з точністю $\pm 25 \times 10^{-6}$ RIU (refractive index unit).

Досліджуваний зразок клею поміщали в відкриту вимірювальну комірку ППР-рефрактометра об'ємом 100 мкл і товщиною 1 мм. Кювету заповнювали клеєм об'ємом 50 ± 5 мкл, тому товщина шару клею складала близько 0,5 мм. Оскільки ППР рефрактометр двоканальний, другий канал використовували як референтний для компенсації впливу зміни температури навколишнього середовища на результат вимірювання кутових значень ПВВ і мінімуму ППР [17]. У референтному каналі поміщали 85% розчин гліцерину в дистильованій воді (Arterium, Ukraine) з показником заломлення $n_D = 1,4680 \pm 0,0002$, значення якого близьке до значень показників заломлення неполімеризованих фотополімерних клеїв [18]. Полімеризація клею проводилася під випромінюванням УФ світлодіода GNL3014UVC (GNOR ElectronicsCo., LTD, China), що має згідно з паспортними даними максимум при 405 нм (напівширина спектра випромінювання ~ 30 нм) і силу світла не менше 150 мКд при прямому струмі 20 мА. Час експозиції складав 10 хвилин. Світлодіод розташовували на відстані 10 мм від поверхні досліджуваного зразка фотополімерного оптичного клею для забезпечення рівномірного опромінення всієї площі його поверхні. Процес фотополімеризації контролювався по зміні значень критичного кута при ПВВ і мінімуму характеристики відбиття для зразків досліджуваних клеїв.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вимірні характеристики відбиття для ПВВ в процесі полімеризації досліджуваних клеїв наведені на рисунку 1.

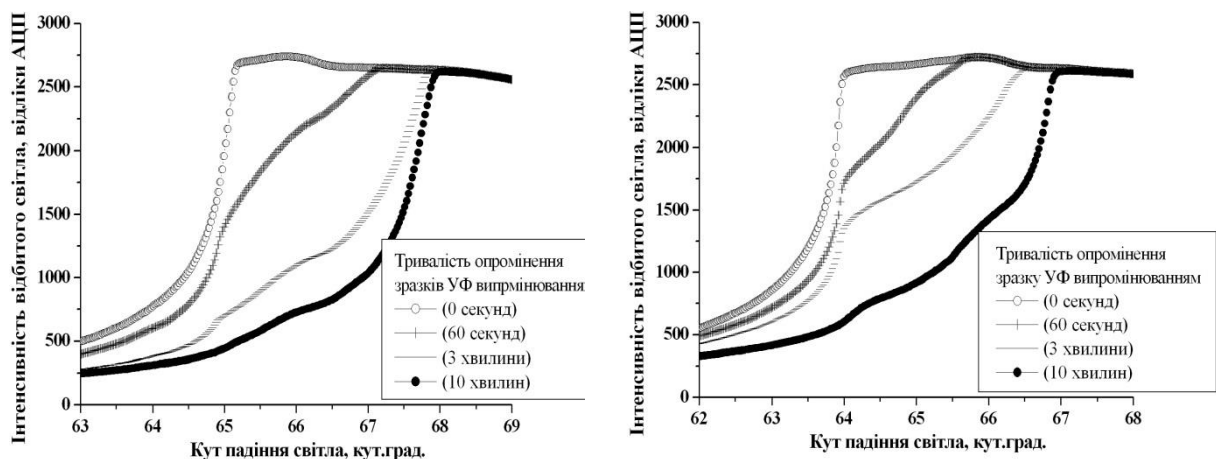


Рис. 1. Вимірні характеристики відбиття фотополімерних клеїв UV630 (а) та Akrol-3-360 (б) в процесі УФ-полімеризації в різні моменти часу: без експозиції (0 секунд), через хвилину, через 3 і через 10 хвилин експозиції (повна полімеризація).

Вимірювання проводилося в режимі періодичного кутового сканування та одночасним записом характеристик відбиття на кожному кроці кінетики. Як видно з рисунків в процесі полімеризації змінювався не тільки критичний кут, зміщуючись в бік більших кутів, але і форма характеристики відбиття, що характеризувало неоднорідність перебігу процесу полімеризації в усьому об'ємі зразку досліджуваного оптичного клею. Для обох марок клею критичний кут в процесі полімеризації змістився приблизно на 3 градуси. Показник заломлення досліджуваних клеїв в процесі полімеризації визначали за формулою Снелліуса [19], використавши значення вимірних критичних кутів і відомого показника заломлення скляних підкладок (скло марки Ф1, $n_D=1,61280$, Ізюмський приладобудівний завод, Україна). Кінетики показника заломлення зображені на рисунку 2.

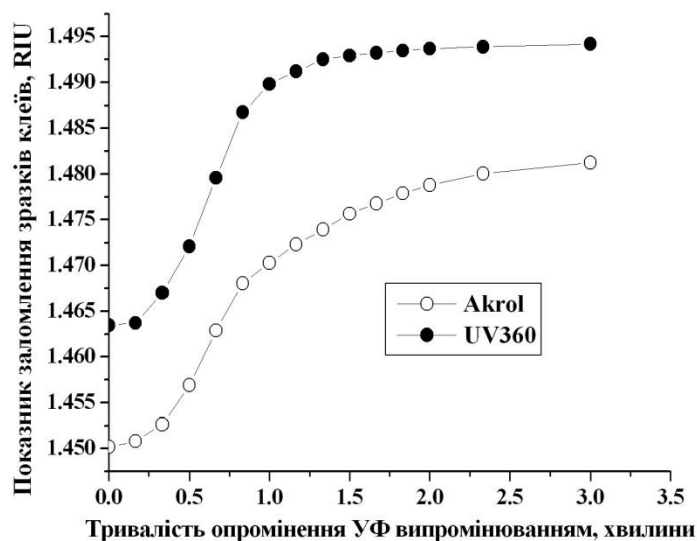


Рис. 2. Розраховані залежності показника заломлення фотополімерних клеїв Akrol-3-360 і UV630 від часу їх експозиції УФ випромінюванням.

Як видно з рисунка 2 фотополімерний клей UV630 полімеризувався швидше і мав більший показник заломлення в рідкому ($n_D=1,46347 \pm 0,00002$) і твердому ($n_D=1,49589 \pm 0,00002$) стані, ніж клей Akrol-3-360 у якого розраховані показники заломлення становили $n_D=1,45019 \pm 0,00002$ і $n_D=1,48404 \pm 0,00002$, відповідно.

Виміряні характеристики відбиття при ППР для фотополімерних клеїв Akrol-3-360 і UV630 до полімеризації наведені на рисунку 3. У клею марки UV630 кутове значення мінімуму характеристики відбиття було більше, ніж у клею марки Akrol-3-360, що корелює з попередніми результатами.

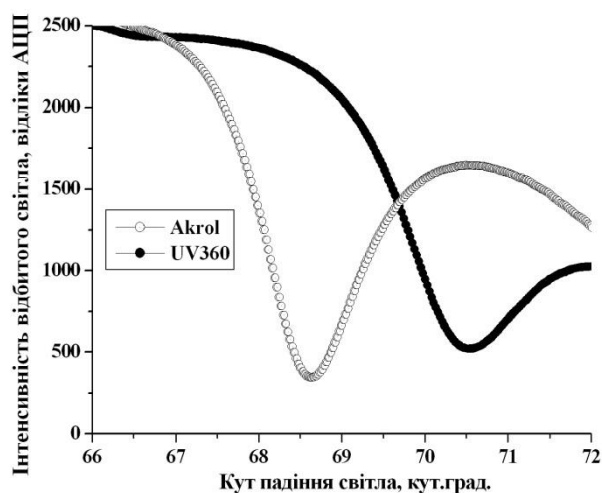


Рис. 3. Виміряні характеристики відбиття неполімерізованих клеїв Akrol-3-360 і UV630 при ППР.

Виміряні характеристики відбиття при ППР в процесі полімеризації для клею Akrol-3-360 наведені на рисунку 4. Особливістю методу ППР є можливість одночасного контролю станів як рідкої, так і твердої фази досліджуваного зразка в процесі полімеризації, що забезпечується кутовим розділенням: мінімуми ППР для рідкої фази і для твердої фази рознесені в кутовому просторі. Так для клею Akrol-3-360 після першої хвилини експозиції УФ-випромінюванням починалось одразу утворення твердої фази, а після 7-ї хвилини експозиції рідка фаза в зоні чутливості поверхневого плазмона (0,3 мкм) вже була відсутня.

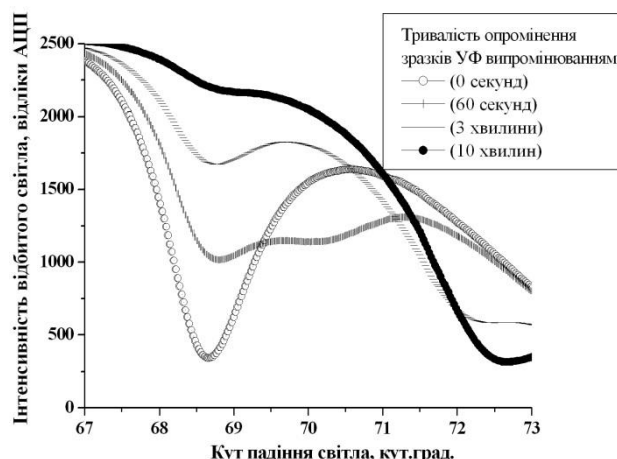


Рис. 4. Виміряні характеристики відбиття фотополімерного клею Akrol-3-360 в процесі УФ-полімеризації в різні моменти часу: без експозиції (0 секунд), через хвилину, через 3 і через 10 хвилин експозиції (повна полімеризація).

У таблиці 1 наведені розраховані значення показників заломлення фотополімерних клеїв UV630 і Akrol-3-360 на основі результатів вимірювання методами ПВВ і ППР. Абсолютна похибка становить $\pm 0,00002$.

Таблиця 1. Розраховані значення показників заломлення оптичних клеїв

Марка клею	До полімеризації		Після полімеризації	
	Метод ПВВ	Метод ППР	Метод ПВВ	Метод ППР
UV630	1,46347	1,46035	1,49589	Немає даних
Akrol-3-360	1,45019	1,44710	1,48404	1,48212

Різниця в розрахованих значеннях для методів ПВВ і ППР пов'язана з дисперсією показників заломлення, так як для методу ПВВ показник заломлення розраховувався для довжини хвилі 589,3 нм, а для методу ППР для 850 нм. При цьому для клею марки Akrol-3-360 різниця в показниках заломлення до полімеризації і після для двох методів вимірювання ППР і ПВВ становить $0,03502 \pm 0,00002$ і $0,03385 \pm 0,00002$ відповідно. Для клею марки UV630 різниця в показниках заломлення до полімеризації і після для методу вимірювання ПВВ становить $0,03242 \pm 0,00002$. Додатково була розрахована залежність швидкості процесу полімеризації від часу експозиції зразків фотополімерних оптичних клеїв (рис.5).

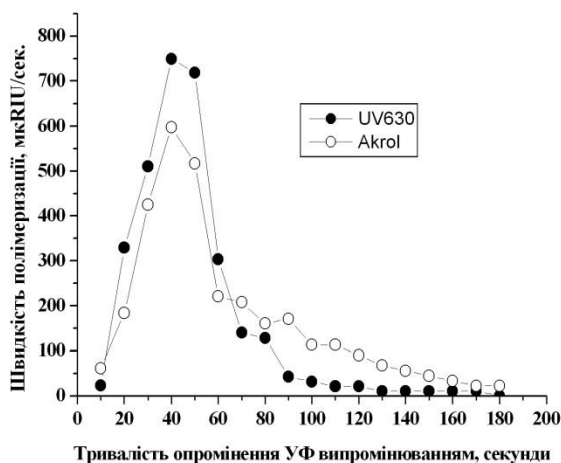


Рис. 5. Залежність швидкості полімеризації від тривалості експозиції ультрафіолетом для двох марок фотополімерних клеїв Akrol-3-360 та UV630.

Швидкість полімеризації для обох клеїв зростає і досягає максимуму при тривалості експозиції 40 секунд. При цьому клей марки UV630 мав на 25% більшу швидкість полімеризації, ніж клей марки Akrol-3-360. При межі вимірювання 50×10^{-6} RIU (50 μ RIU) тривалість процесу полімеризації для досліджуваних зразків оптичних клеїв становила: 87 секунд для клей марки UV630 та 150 секунд для клею марки Akrol-3-360.

ВИСНОВКИ

Вперше показана можливість застосування методу ППР для визначення показника заломлення фотополімерних клеїв і контролю в реальному часі процесу їх полімеризації. Експериментально доведено, що метод ППР дозволяє одночасного контролювати стан як рідкої, так і твердої фази досліджуваного зразка в процесі фотополімеризації, що забезпечується кутовим розділенням: мінімуми ППР для рідкої фази і для твердої фази рознесені в кутовому просторі. Проведено розрахунки швидкості та тривалості фотополімеризації по яким визначено, що клей марки UV630 має на 25% більшу швидкість полімеризації та майже у два рази менший термін полімеризації, ніж клей марки Akrol-3-360. При цьому в результаті полімеризації показники заломлення в обох клеях зростають майже на однакові величини ($0,03242 \pm 0,00002$ і $0,03385 \pm 0,00002$) та досягають значень $1,49589 \pm 0,00002$ та $1,48404 \pm 0,00002$, відповідно. Результати дослідження можуть бути корисні при розробці нових фотополімерних клейових композицій та для оптимізації технологічних процесів з'єднання прецизійних оптичних деталей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Н.И. Баурова, В.А. Зорин (2016). Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин. М.: МАДИ.
2. Д. А. Шутов, Д. В. Ситанов. (2006). Процессы микро- и нанотехнологий: Лабораторный практикум. Том 1. Иван. гос. хим. технол. ун-т. Иваново.
3. Маслов В. П. (2012) Фізико-технологічні проблеми з'єднання прецизійних деталей оптико-електронних приладів: моногр. К.: НТУУ «КПІ».
4. B. Liedberg, C. Nylander, I. Lundstrom (1983). Surface Plasmon Resonance For Gas Detection and Biosensing. *Sensors and Actuators*, 4, 299–304.
5. S. Roberge, M. A. Dube (2016). Infrared process monitoring of conjugated linoleic acid/styrene/butyl acrylate bulk and emulsion terpolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*. 4 (1), 264–272.
6. A.V. Samoylov, V. M. Mirsky, Q. Hao, C. Swart, Y. M. Shirshov, O. S. Wolfbeis (2005). Nanometer-thick SPR sensor for gaseous HCl. *Sensors and Actuators B Chem*, 106, 369-372.
7. G. Dorozinsky, M. Lobanov, V. Maslov (2015). Detection of methanol vapor by surface plasmon resonance method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5), 4-7.
8. K. Matsubara, S. Kawata, S. Minami (1988). Optical Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Measurement. *Applied Optics*, 27, 1160–1163.
9. N. Gridina, G. Dorozinsky, R. Khristosenko, V. Maslov, A. Samoylov, Yu. Ushenin, Yu. Shirshov (2013). Surface plasmon resonance biosensor. *Sensors & Transducers Journal*, 149, 2, 60-68.
10. H. Xu, M. Kall (2003). Modeling the optical response of nanoparticle-based surface plasmon resonance sensors. *Sensors and Actuators*, 87 (2), 244-249.
11. R. Rella, P. Siciliano, F. Quaranta, T. Primo, L. Valli et al. (2000). Gas Sensing Measurements and Analysis of the Optical Properties of Poly [3-(butylthio)thiophene] Langmuir-Blodgett films. *Sensors and Actuators B*, 68, 203-209.
12. G. Dorozinsky, A. Liptuga, V. Gordienko, V. Maslov, V. Pidgorny (2015). Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 3, 372-374.
13. M. Minunni, M. Mascini (1993). Detection of pesticide in drinking water using real-time biospecific interaction analysis. *Anal.Lett*, 26, 1441-1460.
14. G. Dharmalingam, N.A. Joy, B. Grisafe, M.A. Carpenter (2012). Plasmonics-based detection of H₂ and CO: discrimination between reducing gases facilitated by material control. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 3, 712-721.
15. Y. Yanase, T. Hiragun, K. Ishii, T. Kawaguchi and other (2014). Surface Plasmon Resonance for Cell-Based Clinical Diagnosis. *Sensors*, 14, 4948-4959.
16. E. Kretschmann, H. Reather (1986). Radiative decay of nonradiative surface plasmon excited by light. *Z. Naturf. A*, 23, 2135-2136.

17. Yu.V. Ushenin, V.P. Maslov, T.A. Turu, N.V. Kachur (2016). Application of temperature sensors for improving the device based on the phenomenon of surface plasmon. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 1, 33-40.
18. Dorozinsky G. (2013). Surface plasmon resonance as a tool for research in nanotechnology and industry. "Machines.Technologies.Materials" Journal, 9, 51-54.
19. R. M. A. Azzam, N. M. Bashara (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam.

REFERENCES

1. N.I. Baurova, V.A. Zorin (2016). *Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin*. M.: MADI.
2. D. A. Shutov, D. V. Sitanov (2006). *Protsessyi mikro- i nanotekhnologii: Laboratorniy praktikum*. Ivan. gos. him. – tehnol. un-t. – Ivanovo, (Tom 1).
3. Maslov V. P. (2012). *Fizyko-tekhnologichni problemy ziednannia pretsyziinykh detalei optyko-elektronnykh prykladiv: monohr.* K.: NTUU «KPI».
4. B. Liedberg, C. Nylander, I. Lundstrom (1983). Surface Plasmon Resonance For Gas Detection and Biosensing. *Sensors and Actuators*, 4, 299–304.
5. S. Roberge, M. A. Dube (2016). Infrared process monitoring of conjugated linoleic acid/styrene/butyl acrylate bulk and emulsion terpolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*. 4 (1), 264–272.
6. A.V. Samoylov, V. M. Mirsky, Q. Hao, C. Swart, Y. M. Shirshov, O. S. Wolfbeis (2005). Nanometer-thick SPR sensor for gaseous HCl. *Sensors and Actuators B Chem*, 106, 369-372.
7. G. Dorozinsky, M. Lobanov, V. Maslov (2015). Detection of methanol vapor by surface plasmon resonance method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5), 4-7.
8. K. Matsubara, S. Kawata, S. Minami (1988). Optical Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Measurement. *Applied Optics*, 27, 1160–1163.
9. N. Gridina, G. Dorozinsky, R. Khristosenko, V. Maslov, A. Samoylov, Yu. Ushenin, Yu. Shirshov (2013). Surface plasmon resonance biosensor. *Sensors & Transducers Journal*, 149, 2, 60-68.
10. H. Xu, M. Kall (2003). Modeling the optical response of nanoparticle-based surface plasmon resonance sensors. *Sensors and Actuators*, 87 (2), 244-249.
11. R. Rella, P. Siciliano, F. Quaranta, T. Primo, L. Valli et al. (2000). Gas Sensing Measurements and Analysis of the Optical Properties of Poly [3-(butylthio)thiophene] Langmuir-Blodgett films. *Sensors and Actuators B*, 68, 203-209.
12. G. Dorozinsky, A. Liptuga, V. Gordienko, V. Maslov, V. Pidgorny (2015). Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 3, 372-374.
13. M. Minunni, M. Mascini (1993). Detection of pesticide in drinking water using real-time biospecific interaction analysis. *Anal.Lett*, 26, 1441-1460.
14. G. Dharmalingam, N.A. Joy, B. Grisafe, M.A. Carpenter (2012). Plasmonics-based detection of H₂ and CO: discrimination between reducing gases facilitated by material control. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 3, 712-721.
15. Y. Yanase, T. Hiragun, K. Ishii, T. Kawaguchi and other (2014). Surface Plasmon Resonance for Cell-Based Clinical Diagnosis. *Sensors*, 14, 4948-4959.
16. E. Kretschmann, H. Reather (1986). Radiative decay of nonradiative surface plasmon excited by light. *Z. Naturf. A*, 23, 2135-2136.
17. Yu.V. Ushenin, V.P. Maslov, T.A. Turu, N.V. Kachur (2016). Application of temperature sensors for improving the device based on the phenomenon of surface plasmon. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 1, 33-40.
18. Dorozinsky G. (2013). Surface plasmon resonance as a tool for research in nanotechnology and industry. "Machines.Technologies.Materials" Journal, 9, 51-54.
19. R. M. A. Azzam, N. M. Bashara (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam.

Надійшла до редакції 05.02.2018

ГЛІБ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ДОРОЖИНСЬКИЙ – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

ВОЛОДИМИР ПЕТРОВИЧ МАСЛОВ – доктор технічних наук, професор, завідуючий відділом “Сенсорного матеріалознавства” Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

ГАННА ВАСИЛІВНА ДОРОЖИНСЬКА – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»