

Селективність до гексану по відношенню до ізопропанолу та ацетону для сенсора зростає майже вдвічі з 3,1 без додаткового шару до 5,6 з додатковим шаром ZnO оптимальної товщини. Отримані результати підтверджують доцільність використання плівок ZnO для оптимізації чутливості ППР-сенсорів. Результати досліджень можуть бути застосовані для контролю n-гексану в повітрі.

*Ключові слова:* оксид цинку, сенсор, поверхневий плазмонний резонанс, гексан.

#### **Література**

- [9] Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 14. Washington (DC): National Academies Press (US); 2013 Apr 26. 3, n-Hexane: Acute Exposure Guideline Levels. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK201488/>.
- [10] F. Brugnone, G. Maranelli, L. Romeo, et al. “Ubiquitous pollution by n-hexane and reference biological levels in the general population”, *Int. Arch Occup Environ Health*, 63, 1991, p. 157–160.
- [11] Cyclohexane and n-hexane adsorption studies on novel hex-stannantimonene nanosheets – A first-principles outlook, *Inorganic Chemistry Communications*, Volume 144, 2022, 109823, ISSN 1387-7003.
- [12] Q. Tan, L. Tang, M. Yang, et al. “Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology”, *Optics and Lasers in Engineering*, 74, 2015, p. 103-108.
- [13] P. Rybarczyk, B. Szulczynski, J. Gębicki, “Simultaneous Removal of Hexane and Ethanol from Air in a Biotrickling Filter—Process Performance and Monitoring Using Electronic Nose”, *Sustainability*, 12, 2020, p. 387.
- [14] A. Fedorenko, N. Kachur, O. Sulima, V. Maslov, “Protective properties of ZnO nanofilm against wear and mechanical damage of sensitive SPR sensor element”, *Functional materials*, №2, 2024.

УДК 621.372

### **МОДУЛЯТОР ПОДВІЙНОГО ПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОЇ ПЛАСТИНИ ТА ТЕРМООПТИЧНОГО ЕФЕКТУ**

*Самойлов А. В., Романчук В. В., Дорожсинський Г. В.*

*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна*

*E-mail: [gvdorozinsky@ukr.net](mailto:gvdorozinsky@ukr.net)*

Хвильові пластини широко використовуються для зміни стану поляризації електромагнітного випромінювання [1]. Чвертьхвильові пластини ( $\lambda/4$ ) перетворюють лінійно поляризоване світло на кругове поляризоване світло і навпаки. Напівхвильові пластини ( $\lambda/2$ ) обертають площину поляризації на певний кут. Такі хвильові пластини мають широкий діапазон застосування в пристроях, де використовується поляризоване лазерне випромінювання. При проведенні спектрополяриметричних досліджень, використовуються ахроматичні та суперахроматичні хвильові пластини, які зберігають свої поляризаційні властивості в широкому діапазоні довжин хвиль [2].

Найбільш перспективним матеріалом для виготовлення таких пластин є поліметилметакрилат (ПММА) [3]. Виготовлення включає етап контрольованого витягу полімерного матеріалу до необхідного значення фазового зсуву, що, як правило, виключає етап механічної обробки пластин [4]. Розтягування призводить до орієнтованого стану полімеру (вираженої орієнтації полімерних ланцюгів) і до загальної анізотропії фізичних та оптичних властивостей. Анізотропія оптичних властивостей ПММА проявляється в тому, що він має різні показники заломлення для світла, поляризованого паралельно напрямку витяжки (орієнтації) та в перпендикулярному напрямку (подвійне променезаломлення) [5].

Перевагою ахроматичних та суперахроматичних хвильових пластин від монохроматичних є не тільки ширший робочий діапазон довжин хвиль, але й значно менша залежність фазового зсуву від зміни температури навколишнього середовища. Це ускладнює використання полімерних монохроматичних хвильових пластин в пристроях із фіксованою довжиною хвилі. Так в діапазоні температур 30...40 °С питома зміна фазового зсуву для чвертьхвильової суперахроматичної пластини АПСАВ-5 становить  $7 \cdot 10^{-5}$  град/°С [5], а для монохроматичної на довжині хвилі 516 нм становить 1,6 град/°С. Велике значення термоіндукованої питомої зміни фазового зсуву для монохроматичних пластин є недоліком при побудові прецизійних оптичних систем. Проте для деяких наукових задач наявність температурної залежності фазового зсуву є корисним термооптичним ефектом, який дозволяє модулювати величину подвійного променезаломлення матеріалу хвильової пластини.

В роботі [6] показана можливість створення модулятора величини подвійного променезаломлення для регулювання фазового зсуву між ТЕ та ТМ компонентами поляризованого світла на основі оптичного полімерного хвилевода. Автори стверджують, що для фазового зсуву на величину  $\pi$  вони змінювали температуру полімерного матеріалу з подвійним променезаломленням (серцевини хвилевода) на величину 17,7 °С, що відповідає питомій зміні фазового зсуву 10,2 град/°С. Заявлена авторами конструкція модулятора є багатокомпонентною (серцевина, обгортка, підкладка та плівковий нагрівач) та складною для виготовлення (серцевина хвилевода розміром 5×6 мкм, обгортка товщиною 10 мкм, плівковий нагрівач 5мм×50 мкм), а значна величина питомої зміни фазового зсуву не дозволяє виконувати прецизійну фазову корекцію ступеня поляризації випромінювання. Крім того, для виробництва заявленого модулятора використовуються коштовні та складні технологічні процеси, як фотолітографія та травлення у плазмі кисню.

Тому нами було створено фазовий модулятор на основі монохроматичної хвильової пластини з доступних матеріалів простої конструкції та із застосуванням відносно простих технологічних процесів. Конструкція модулятора складалась з трьох основних складових: 1) Оптично прозорої

підкладки зі скла марки К8 ( $n_D=1,5163$ ) розмірами 20×20 мм та товщиною 1 мм; 2) Плівкового нагрівача з золотими електродами; 3) напівхвильової монохроматичної пластини з ПММА ( $n_D=1,4927$ ) розмірами 15×20 мм та товщиною 0,9 мм; Плівковий нагрівач з суміші оксидів олова та індію товщиною 66 нм ( $n_{650}=1,7653+j0,0034$ ) [7], а також золоті електроди були осаджені магнетронним методом та термічним осадженням, відповідно. Чвертьхвильова пластина була виготовлена за технологією, яка описана в [5] та оптично з'єднана зі скляною підкладкою фотополімерним клеєм Permabond UV 620. Напругу на плівковий нагрівач подавали від регульованого джерела постійного струму в діапазоні від +3 до +9 В. Для вимірювання температури застосовували датчик LM35DZ з коефіцієнтом перетворення +10 мВ/°С, робочим діапазоном вимірювання температури від +2°С до +100°С та абсолютною похибкою вимірювання  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Датчик температури мав безпосередній контакт з хвильовою пластинною через фотополімерний клей Permabond UV 620 в зоні поза світлового поля. Фазовий зсув вимірювали за методикою з [5] на  $\lambda=516$  нм із застосуванням компенсатора Сенармона.

Виміряна залежність фазового зсуву від зміни температури хвильової пластини викликаного нагрівом плівкового нагрівача наведена на рисунку 1. Анізотропія оптичних властивостей матеріалу хвильової пластинки в напрямку перпендикулярному напрямку витяжки забезпечувало подвійне променезаломлення, величину якого було оцінено по різниці показників заломлення  $\Delta n$  для звичайного  $n_o$  і незвичайного  $n_e$  променів, яка була розрахована за відомою формулою [5, с.4] для різних значень фазового зсуву та змінювалась в межах від 0,0043 до 0,0082 при нагріві пластини на  $\Delta T=27^\circ\text{C}$ .

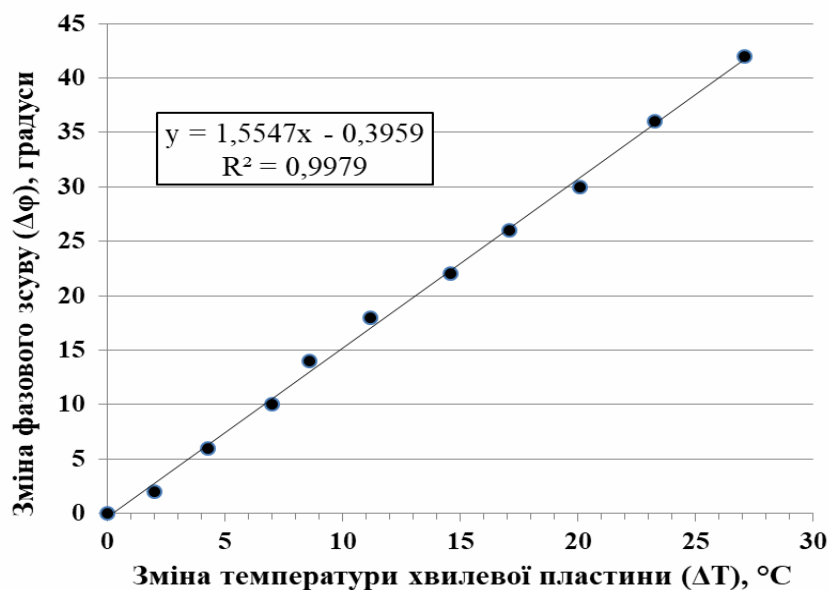


Рис. 1. Графік залежності зміни фазового зсуву від варіації температури напівхвильової монохроматичної пластини для довжини хвилі 516 нм

Розраховане значення питомої зміни фазового зсуву становило 1,55 град/°C. Параметр керування становив 0,119 В/град., що майже в шість разів більше за величину 0,02 В/град., яка визначена по даним з джерела [6], що дозволяє робити більш прецизійне керування фазовим зсувом. Створений модулятор може бути використаний для створення електронних поляриметрів.

*Ключові слова:* хвильова пластинка, поліметилметакрилат, термооптичний ефект, подвійне променезаломлення.

#### **Література**

- [1] C. M. McIntyre and S. E. Harris, "Achromatic wave plates for the visible spectrum", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 58, pp. 1575–1580, 1968. DOI: 10.1364/JOSA.58.001575.
- [2] A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. P. Vidmachenko, and A. V. Perekhod, "Achromatic and super-achromatic zero-order wave plates", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 88, no. 3–4, pp. 319–325, 2004. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.034.
- [3] J. Ahn, J. Suh, and J. Shin, "Thermally induced birefringence in polymethyl methacrylate waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 2, pp. 322–326, 1993. DOI: 10.1364/AO.32.000322.
- [4] A. V. Samoylov, V. S. Samoylov, A. S. Klimov, and E. A. Oberemok, "Properties of multicomponent achromatic and superachromatic zero-order wave plates", *J. Opt. Technol.*, vol. 76, pp. 312–315, 2009. DOI: 10.1364/JOT.76.000312.
- [5] В. С. Самойлов та А. В. Самойлов, *Волновые пластинки*, Київ, Україна: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 2015, 76 с.
- [6] S.-H. Park, J.-W. Kim, M.-C. Oh, Y.-O. Noh, and H.-J. Lee, "Polymer waveguide birefringence modulators", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 845–847, May 15, 2012. DOI: 10.1109/OECC.2012.6276375.
- [7] Г. В. Дорожинська, А. В. Федоренко, Г. В. Дорожинський та В. П. Маслов, "Властивості сенсорів поверхневого плазмонного резонансу з підшаром ІТО", *Таврійський науковий вісник*, № 3, с. 38–48, 2022. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.3.4.

УДК 53.082.539

### **НЕЧІТКА МОДЕЛЬ СЕНСОРА НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ, ВКРИТОГО НАНОПЛІВКОЮ ZnO**

<sup>1)</sup>Божко К. М., <sup>2)</sup>Качур Н. В., <sup>2)</sup>Маслов В. П.

<sup>1)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2)</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. С. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

E-mail: [bozhkonew@ukr.net](mailto:bozhkonew@ukr.net)

Розглянемо нечітку модель ефективності наноплівки оксиду цинку для сенсору на основі поверхневого плазмонного резонансу [1].

При створенні нечіткої моделі наноплівки ZnO визначаємо три вхідні нечіткі функції:

- Ftr (Transparency Factor) – коефіцієнт прозорості;
- Limsr (Level of internal mechanical stresses reduction) – рівень розвантаження внутрішніх механічних напружень;
- Lst (Level of Stability) – рівень стійкості сенсора.