

## ФАЗОВІ ПЛАСТИНКИ – ЗАТРИМУВАЧІ ФАЗИ

*Малиш М.І.*, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, [M\\_Malysh@ukr.net](mailto:M_Malysh@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-4532-0764](https://orcid.org/0000-0003-4532-0764)

*Куліш М.Р.*, доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова, НАН України, Київ, Україна, [n\\_kulish@yahoo.com](mailto:n_kulish@yahoo.com), [orcid.org/0000-0002-4365-8174](https://orcid.org/0000-0002-4365-8174)

## PHASE PLATES – RETAINING PHASES

*Malysh M.I.*, PhD in Physical and Mathematical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, [M\\_Malysh@ukr.net](mailto:M_Malysh@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-4532-0764](https://orcid.org/0000-0003-4532-0764)

*Kulish N.R.*, Doctor of Physics and Mathematics, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [n\\_kulish@yahoo.com](mailto:n_kulish@yahoo.com), [orcid.org/0000-0002-4365-8174](https://orcid.org/0000-0002-4365-8174)

**Вступ.** Фазова (хвильова) пластинка – оптичний елемент, що змінює поляризацію електромагнітної хвилі. Найбільшу популярність мають півхвильова пластинка, що змінює орієнтацію лінійної поляризації та чвертьхвильова пластинка, яка змінює лінійну поляризацію на кругову або навпаки. Точний контроль поляризації надзвичайно важливий у таких галузях як сонячна поляриметрия, оптичний зв'язок, візуалізація біомедичних зображень, ідентифікація військових мішеней, хімічний аналіз, фільтрація довжин хвиль [1]. Такий контроль можна здійснювати за допомогою чвертьхвильових та півхвильових фазових пластинок. Зазвичай фазові пластинки використовують для аналізу чи керування поляризацією світла у відносно вузькій спектральній області. Наприклад, чвертьхвильові фазові пластинки використовуються в оптичних ізоляторах, електрооптичних модуляторах, інтерферометрах, еліпсометрах, в системах обробки зображень [2]. Дуже тонкі фазові пластинки використовуються в системах оптичної телекомунікації для зчитування та запису інформації на цифрові відеодиски. Вони є ідеальними для використання як компоненти в системах мультиплексування по довжині хвилі, як змінні аттенюатори, циркулятори, аналізатори [2] та як компоненти контролерів поляризації [3].

**Мета роботи.** Виробники випускають велике розмаїття фазових пластин. Для полегшення вибору конкретного типу пристрою для керування поляризацією світла потрібно знати не лише теорію його роботи, а й експлуатаційні характеристики (ширину спектральної області роботи, робочу температуру, кут падіння світла, поле зору та інші) і їх залежність від вибору матеріалу та допусків при їх виготовленні. Нижче розглянуто принципи роботи фазових пластинок, виконано порівняння їх властивостей, коротко обговорено можливості їх використання в різних галузях науки та техніки.

**Матеріали та методи.** Фазові пластинки виготовляються з оптично досконалих полімерних плівок (3МРР2500<sup>TM</sup> поліестеру [4], поліетелентетрафталату [4], поліметилметакрилату [5]) та одновісних кристалів (найчастіше з кварцу, фториду магнію, сірчаного кадмію). Полімерні фазові пластинки рекомендується використовувати для керування поляризацією світла в діапазоні від 360 нм до 1400 нм [5,6]. Густина енергії імпульсів світла тривалістю 10 нс видимого діапазону повинна бути <300 мДж/см<sup>2</sup>, а близького інфрачервоного діапазону менша за 500 мДж/см<sup>2</sup> [7]. Діаметр полімерних фазових пластинок може змінюватися від 5,0 мм до 380 мм [8]. З кристалічного кварцу виготовляються фазові пластинки на діапазон спектру (193-2500) нм; з фториду магнію (MgF<sub>2</sub>) – на діапазон (400-6000) нм; з сірчаного кадмію – на діапазон (500-14000) нм. Технічно фазові пластинки виготовляють у вигляді одиночних пластин нульового та високого порядку та ахроматичних пластин.

**Результати та обговорення.** **Фазові пластинки.** Фазовою або хвильовою називається плоско паралельна пластинка, вирізана з одновісного кристала таким чином, щоб його оптична вісь лежала в площині її вхідної поверхні. Якщо на пластинку падає лінійно поляризований потік світла з напруженістю електричного поля  $E_o$  і якщо азимут поляризації (кут між вектором  $E_o$  та оптичною віссю кристала  $C$ ) цього потоку світла  $\varphi \neq m\pi/2$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ), то в кристалі розповсюджуються дві взаємно перпендикулярні плоскополяризовані хвилі (звичайна та незвичайна). Напруженість ( $E_{\perp}$ ,  $E_{\parallel}$ ) електричного поля в цих компонентах така:

$$E_{\perp} = E_o \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad E_{\square} = E_o \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta), \quad (1)$$

де  $\omega$  – циклічна частота,  $t$  – час. Різниця фаз  $\delta$  між компонентами виникає із-за різної швидкості їх розповсюдження. Для фазової пластинки товщини  $d$

$$\delta = \frac{2\pi(n_e - n_o)d}{\lambda}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $n_o$ ,  $n_e$  – показники заломлення звичайного та незвичайного променів. Якщо при проходженні лінійно поляризованого світла крізь фазову пластинку  $\delta = \pi/2$ , то така пластинка називається чвертьхвильовою. Напруженість електричного поля в компонентах світла, що виходить з неї, така

$$E_{\perp} = E_o \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad E_{\square} = E_o \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (3)$$

де  $\omega$  – циклічна частота,  $t$  – час.

Формула (3) є рівнянням еліпса у параметричній формі. Згідно формули (3), ступінь еліптичності визначається лише азимутом поляризації  $\varphi$ . Його можна змінювати шляхом обертання чвертьхвильової пластинки. При цьому відбувається поступовий перехід світла від лінійно поляризованого до поляризованого по колу або навпаки (рис. 1).

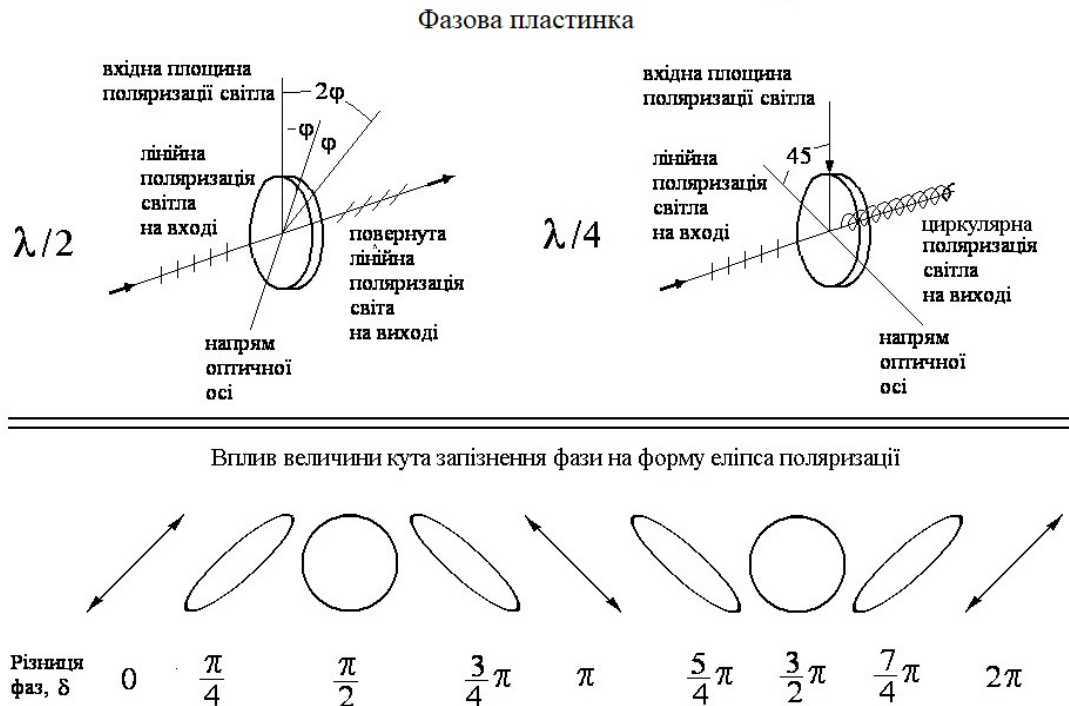


Рисунок 1 – Ілюстрація впливу фазових пластинок на стан поляризації світла  
Figure 1 – Illustration of the influence of phase plates on the state of light polarization

Фазова пластинка, в якій реалізується значення  $\delta = \pi$ , називається півхвильовою пластинкою. Для неї напруженості компонент поблизу вихідної поверхні будуть рівними

$$E_{\perp} = E_o \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad E_{\square} = E_o \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (4)$$

Згідно формули (4), півхвильова пластинка не змінює амплітуди світла. Якщо на її вході азимут поляризації рівний  $-\varphi$ , то на виході з неї вектор  $E$  повернеться на кут  $+\varphi$ . Отже, обертання півхвильової пластинки на кут  $\varphi$  приводить до повороту площини поляризації лінійно поляризованого світла на кут  $2\varphi$  (рис. 1).

**Фазові пластинки нульового порядку.** Товщина  $d$  чверть- ( $\delta = \pi/2$ ) та півхвильової ( $\delta = \pi$ ) фазової пластинки нульового порядку відповідно дорівнює

$$d = \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)}, \quad d = \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)}. \quad (5)$$

Для  $\lambda = 500$  нм товщина чверть- та півхвильової кварцової пластинки відповідно дорівнює  $d = 13,7$  мкм та  $d = 27,4$  мкм. Пластинки такої товщини надзвичайно крихкі і їх дуже важко виготовляти. Ці недоліки відсутні у фазових пластинках, в яких на скляну пластинку товщиною в кілька міліметрів наклеєна або посаджена на оптичний контакт пластинка з одновісного кристала, товщина якої розрахована за формулою (5). Ще одним типом фазових пластинок нульового порядку є набір з двох пластинок товщиною приблизно рівною 2 мм, вирізаних з одновісного кристалу. Вони збираються таким чином, щоб їх оптичні осі перехрещувалися. У результаті цього дія першої пластинки анулюється дією другої за винятком залишкової дії різниці товщини між ними. Ця різниця така, що дозволяє здійснити запізнення фази на  $\pi/2$  або  $\pi$ . Розрізняють фазові пластинки, складові частини яких склеєні, посаджені на оптичний контакт або між ними існує повітряний прошарок. Склеєні фазові пластинки пошкоджуються світлом лазера неперервної дії, інтенсивність якого дорівнює  $1 \text{ Вт/см}^2$  [9]. Пластинки з оптичним контактом між складовими частинами мають поріг пошкодження рівний  $(100-200) \text{ МВт/см}^2$  [7, 9], а пластинки з повітряним прошарком –  $500 \text{ МВт/см}^2$  [7] при опроміненні їх світлом лазера, що генерує імпульси тривалістю 20 нс. Технічні параметри фазових пластинок нульового порядку наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Типові параметри чверть- та півхвильових фазових пластинок  
Table 1 – Typical parameters of quarter- and half-wave phase plates

| Тип пластинки                                                  | Високого порядку                                   | Нульового порядку                                   | Ахроматична                                                    |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Матеріал                                                       | Кристалічний кварц [9]                             | Кристалічний кварц мм [10]                          | Кристалічний кварц та $\text{MgF}_2$ [10]                      |
| Товщина                                                        | >1 мм [9]                                          | 0,2–0,5 мм [10]                                     | >1 мм [9]                                                      |
| Допуск на розмір                                               | +0,0; -0,25 мм [9]                                 | +0,0; -0,25 мм [10]                                 | +0,0; -0,2 мм [10]                                             |
| Паралельність                                                  | <1 кутової секунди [9]                             | <1 кутової секунди [10]                             | до 10 кутових секунд [10]                                      |
| Допуск на запізнення фази                                      | $\lambda/600 - \lambda/200$ при $20^\circ\text{C}$ | $\lambda/500$ (типова)                              | впритул до $\lambda/100$ на заданій довжині хвилі              |
| Якість поверхні                                                | 20-10 подряпин та виколок [10]                     | 20-10 подряпин та виколок [10]                      | 20-10 подряпин та виколок [10]                                 |
| Антивідбиваюче покриття                                        | $R \leq 0,2\%$ на центральній довжині хвилі [10]   | $R \leq 0,2\%$ на центральній довжині хвилі [10]    | $R \leq 0,5\%$ по всій області довжин хвил [11]                |
| Спектральний діапазон роботи                                   | 250-1550 нм [9]                                    | 240-2100 нм [10]                                    | ВИД: 465nm-610nm*х<br>БІЧ: 700nm~1000nm*<br>ІЧ: 1200nm~1650nm* |
| Ширина смуги пропускання                                       | <2nm на $\lambda = 632$ нм [7]                     | 16 нм на $\lambda = 800$ нм [7]                     | 300 нм на $\lambda = 850$ нм [10]                              |
| Хвильова дисторсія                                             | $\lambda/8$ на $\lambda = 632,8$ нм [10]           | $\lambda/8$ на $\lambda = 632,8$ нм [10]            | $\lambda/4$ на $\lambda = 632,8$ нм [10]                       |
| Похибка визначення кута запізнення фази при $20^\circ\text{C}$ | $\lambda/300$ [9]                                  | $\lambda/600 \sim \lambda/200$ [10]                 | до $\lambda/300$ на визначеній довжині хвилі [10]              |
| Поріг пошкодження                                              | > 200 МВт/см <sup>2</sup> [9]                      | 10 Дж/см <sup>2</sup> ; 20 нс; 20 Гц на 1064 нм [7] | > 200 МВт/см <sup>2</sup> [9]                                  |

\* ВИД, БІЧ, ІЧ – видимий, близький інфрачервоний, інфрачервоний діапазон спектру відповідно.

**Фазові пластинки високого порядку.** Пластинки, в яких різниця фази  $\delta$  між звичайним та незвичайним променями дорівнює  $(2N+1/2)\pi$  або  $(2N+1)\pi$  ( $N=1, 2, 3, \dots$ ) називаються відповідно чвертьхвильовими та півхвильовими фазовими пластинами високого порядку. Зокрема, товщина  $d$  чверть- та півхвильових пластинок оцінюється за формулами

$$d = \frac{(4N+1)\lambda}{4(n_e - n_o)}, \quad d = \frac{(2N+1)\lambda}{2(n_e - n_o)}. \quad (6)$$

Для  $\lambda = 500$  нм товщина чвертьхвильової кварцевої пластинки двадцятого порядку дорівнює 1,1 мм. Поріг пошкодження таких пластинок перевищує 500 МВт/см<sup>2</sup> [7]. Їх технічні параметри наведені в таблиці 1.

**Ахроматичні фазові пластинки.** Ахроматичні фазові пластинки виготовляються з двох різних одновісних кристалів (наприклад, одна пластинка виготовляється з кристалічного кварцу, а інша – з фториду магнію). Дисперсія показників заломлення цих матеріалів різна. Це дозволяє зменшити чутливість кута запізнення фази до зміни довжини хвилі. Складові частини ахроматичних хвильових пластин склеюються, саджаються на оптичний контакт або між ними існує повітряний прошарок. Типові параметри ахроматичних фазових пластин наведені в таблиці 1.

**Систематичні похибки фазових пластинок.** При виборі конкретного типу фазових пластинок перевагу потрібно віддати тим, у яких сума випадкових та систематичних похибок визначення кута запізнення фази мінімальна. Величину випадкових похибок можна мінімізувати шляхом оптимального вибору конструкції тримачів фазових пластинок та відповідної системи реєстрації інтенсивності світла. Поява систематичних похибок викликана впливом зовнішніх факторів та умов розповсюдження світла у фазових пластинках на параметри ( $n_o$ ,  $n_e$ ,  $d$ ,  $\lambda$ ), що визначають значення кута запізнення фази (формула (1)). У кожному конкретному випадку систематичні похибки потрібно мінімувати, змінюючи умови проведення експерименту.

**Довжина хвилі.** Згідно формули (2), зміну кута запізнення фази, викликану зміною довжини хвилі, в одиночних фазових пластинках нульового порядку можна оцінити за допомогою формули [12]

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \delta \left( \frac{1}{(n_e - n_o)} \frac{d(n_e - n_o)}{d\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right), \quad (7)$$

а складених (скло плюс одновісний кристал) пластинках та в ахроматичних – за допомогою формули [12]

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \delta_1 \left( \frac{1}{(n_{e1} - n_{o1})} \frac{d(n_{e1} - n_{o1})}{d\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) - \delta_2 \left( \frac{1}{(n_{e2} - n_{o2})} \frac{d(n_{e2} - n_{o2})}{d\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right). \quad (8)$$

У формулі (8) індексом 1 позначені величина затримки фази та показник заломлення першої пластинки, а індексом 2 – величина затримки фази та показник заломлення другої пластинки.

**Кут падіння.** Існує дві причини відхилення напрямку розповсюдження світла від точної перпендикулярності до оптичної осі С, а саме: 1) оптична вісь не точно паралельна до робочих поверхонь фазової пластинки; 2) кут падіння світла на вхідну поверхню х фазової пластинки дещо відрізняється від 90°. В обох цих випадках вектор Е в звичайній компоненті залишається перпендикулярним до осі С і його показник заломлення дорівнює  $n_o$ . Однак, в незвичайній компоненті потік світла характеризується ефективним показником заломлення [12]

$$n_{\text{ef}} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2(\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta)}}, \quad (9)$$

де  $\theta$  – кут між оптичною віссю С та напрямком розповсюдження потоку світла в одновісному кристалі. Для оцінки величини кута запізнення фази у цьому випадку можна користуватись формулою (2,) якщо в неї замість  $n_e$  підставити ефективне значення показника заломлення, тобто  $n_{\text{ef}}$ .

**Термічні ефекти.** Значення параметрів  $n_e$ ,  $n_o$  та  $d$  залежить від температури. Це означає, що величина кута запізнення фази (формула (2)) залежить від температури. Зокрема, при зміні температури чвертьхвильової кварцевої пластинки нульового порядку на один градус кут запізнення фази змінюється приблизно на 0,00011% [13], а для такої ж полімерної пластинки – на (0,02-0,03)%. Типова температурна залежність кута запізнення фази кварцевих фазових пластин високого по порядку величини дорівнює 0,0015λ°/С [13].

**Інші ефекти.** Наявність неоднорідностей показника заломлення в об'ємі матеріалу пластинок та скінчена гладкість поверхні викликають деяку деполяризацію світла та деформацію фронту хвилі, що виходить з фазової пластинки. Ці ефекти мінімізуються шляхом відбору оптично однорідного матеріалу та високою якістю полірування поверхонь пластинок. Фазова пластинка має дві паралельні поверхні, тобто є еталоном Фабрі-Перо. Вплив інтерференційних ефектів на кут запізнення фази в такому інтерферометрі мінімізується просвітленням робочих поверхонь фазових пластинок. Типові ахроматичні пластинки з повітряним прошарком і антивідбиваючими покриттями пропускають понад 98 % світла у видимому діапазоні спектра.

**Висновки.** Виконано аналіз роботи, технічних параметрів фазових пластинок. Здійснено порівняння їх характеристик. Фазові пластинки використовуються для аналізу чи керування поляризацією світла у відносно вузькій спектральній області. У системах, в яких основну роль грають малі габарити та вага, потрібно віддавати перевагу хвильовим пластинкам. До таких систем перш за все потрібно віднести оптичну телекомунікацію.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. S. Guimond, D. Elmore Polarizing views // OE magazine, May 2004.
2. E. Kubacki Waveplates offer precise control of polarization // OLE • March 2006 • optics.org/ole. Pp 27-29.
3. W. Rong, L. Dupont, Y. Defosse, P. Gautier Driving algorithms for an endless polarization controller using two wave-plates // Optics Communications, Volume 267, Issue 2, 15 November 2006, Pages 335-340.
4. I. Savukov, D. Budker Waveplate retarders based on overhead transparencies // arXiv:physics/0702225v2 [physics.optics] 28 Feb 2007.
5. A.V. Samoylov, V.S. Samoylov, A.P. Vidmachenko, A.V. Perekhod Achromatic and super-achromatic zero-order waveplates // Journal of Quantitative Spectroscopy&Radiative Transfer 88(2004) 319-325.
6. Astropribor 31, Akad. Zabolotnoho St., 02680, Kiev.
7. CVI Melles Griot Optics Group 55 Science Parkway Rochester, New York 14620.
8. High Plains Optics, Inc. Suite M, 105 South Sunset Street, Longmont, Co 80501.
9. ООО "ЭЛАН+" 190103 Санкт-Петербург, Девятский пер., д.3.
10. CASIX, Inc. P.O. Box 1103 Fuzhou, Fujian 350014, China.
11. ALTECHNA Co.Ltd. Konstitucijos ave. 23C-604, LT-08105, Vilnius, Lithuania, European Union.
12. Meadowlark Optics, Inc. 5964 Iris Parkway Frederick, CO 80530 optics.
13. Netport Corporation 150 Long Beach Blvd Stratford, CT 06615 USA.

#### REFERENCES

1. S. Guimond, D. Elmore Polarizing views // OE magazine, May 2004.
2. E. Kubacki Waveplates offer precise control of polarization // OLE • March 2006 • optics.org/ole. Pp 27-29.
3. W. Rong, L. Dupont, Y. Defosse, P. Gautier Driving algorithms for an endless polarization controller using two wave-plates // Optics Communications, Volume 267, Issue 2, 15 November 2006, Pages 335-340.
4. I. Savukov, D. Budker Waveplate retarders based on overhead transparencies // arXiv:physics/0702225v2 [physics.optics] 28 Feb 2007.
5. A.V. Samoylov, V.S. Samoylov, A.P. Vidmachenko, A.V. Perekhod Achromatic and super-achromatic zero-order waveplates // Journal of Quantitative Spectroscopy&Radiative Transfer 88(2004) 319-325.
6. Astropribor 31, Akad. Zabolotnoho St., 02680, Kiev.
7. CVI Melles Griot Optics Group 55 Science Parkway Rochester, New York 14620.
8. High Plains Optics, Inc. Suite M, 105 South Sunset Street, Longmont, Co 80501.
9. LLC "ELAN+" 190103 Sankt-Peterburg Derptsky, per., d.3.
10. CASIX, Inc. P.O. Box 1103 Fuzhou, Fujian 350014, China.
11. ALTECHNA Co. Ltd. Konstitucijos ave. 23C-604, LT-08105, Vilnius, Lithuania, European Union.
12. Meadowlark Optics, Inc. 5964 Iris Parkway Frederick, CO 80530 optics.
13. Netport Corporation 150 Long Beach Blvd Stratford, CT 06615 USA.

## РЕФЕРАТ

Малиш М.І. Фазові пластинки – затримувачі фази / М. І. Малиш, М.Р. Куліш // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2023. – Вип. 1 (51).

Розглянуто принципи роботи, технічні характеристики фазових пластинок. Здійснено порівняння їх властивостей. Обговорено основні області їх застосування.

Мета досліджень: проаналізувати принцип роботи фазових пластинок, порівняти їх технічні характеристики.

Метод дослідження – теоретичний.

Встановлено, що фазові пластинки використовуються для аналізу чи керування поляризацією світла у відносно вузькій спектральній області. У системах, в яких основну роль грають малі габарити та вага, наприклад в оптичній телекомунікації, потрібно віддавати перевагу фазовим пластинкам.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ФАЗОВА ПЛАСТИНКА, СПЕКТРАЛЬНА ОБЛАСТЬ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ЗАТРИМУВАЧ ФАЗИ.

## ABSTRACT

Malysh M.I., Kulish M.R. Phase plates – phase retarders. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2023. – Issue 1 (55).

The principles of operation, technical characteristics of phase plates are considered. A comparison of their properties was made. The main areas of their application are discussed.

The purpose of research: to analyze the principle of operation of phase plates, to compare their technical characteristics.

The research method is theoretical.

It has been established that phase plates are used to analyze or control the polarization of light in a relatively narrow spectral region. In systems in which small dimensions and weight play the main role, for example in optical telecommunications, phase plates should be preferred.

**KEY WORDS:** PHASE PLATE, SPECTRAL FIELD, POLARIZATION, PHASE RETAINER.

## АВТОРИ:

Малиш Микола Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, тел. +380442846709, +380508257165, Україна, 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42, к. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Куліш Микола Радіонович, доктор фізико-математичних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАН України, провідний науковий співробітник, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, tel. +380445256024, +380730422661, Україна, 03028, м. Київ, Велика Китаївська 10, к. 10, orcid.org/0000-0002-4365-8174.

## AUTHORS:

Malysh Mykola. I., PhD in Physical and Mathematical Science associate professor, National Transport University, associate professor of the department of information analysis and information security, e-mail: M\_Malysh@ukr.net, tel. +380442846709, +380508257165, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk str., 42, of. 410, orcid.org/0000-0003-4532-0764.

Kulich Nikolay R., doctor of physical-mathematical sciences, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Leading Researcher, e-mail: n\_kulich@yahoo.com, tel. +380445256024, +380730422661, Ukraine, 03028, Kyiv, Bolshay Kitaevskay str. 10, of. 10, orcid.org/0000-0002-4365-8174.

## РЕЦЕНЗЕНТИ:

Данчук В.Д., доктор фізико-математичних наук, професор, декан факультету Транспортних та інформаційних технологій, Київ, Україна.

Стрельчук В.В., доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач лабораторії, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарева НАН України, Київ, Україна.

## REVIEWER:

Danchuk V.D., doctor of sciences, professor, dean of the Faculty of Transport and Information Technologies, Kyiv, Ukraine.

Strelchuk V.V., doctor of sciences, professor, head department of general physics, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.