

РОМБИ ФРЕНЕЛЯ – ЗАТРИМУВАЧІ ФАЗИ

Малиш М.І., кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, M_Malysh@ukr.net, 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, orcid.org/0000-0002-4365-8174

Клочан А.С., PhD, Національний транспортний університет, Київ, Україна, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

FRESNEL RHOMBIE – RETAINING PHASES

Malysh M.I., PhD in Physical and Mathematical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, M_Malysh@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4532-0764

Kulish M.R., Doctor of Physics and Mathematics, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, orcid.org/0000-0002-4365-8174

Klochak A.Ye., PhD, National Transport University, Kyiv, Ukraine, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

Klochak A.Ye., PhD, National Transport University, Kyiv, Ukraine, varsenchuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4225-9382

Вступ. Поляризоване світло широко застосовують у наукових дослідженнях і в техніці. Контроль поляризації світла важливий у таких галузях як сонячна поляриметрия, оптичний зв'язок, машинобудівна техніка, геологія, візуалізація біомедичних зображень, ідентифікація військових мішеней, хімічний аналіз, фільтрація довжин хвиль. Крім фазових пластинок для керування поляризацією світла використовуються ромби Френеля. Вони застосовуються у системах, в яких аналіз та керування поляризацією здійснюються у широкому спектральному діапазоні, зокрема, у системах, призначених для дослідження магнетизму та атмосфери зірок [1], для пошуку наявності планет поблизу зірок [2], при дослідженні впливу поляризації світла на нелінійне поглинання [3].

Виробники виготовляють велике розмаїття ромбів Френеля. Для полегшення вибору конкретного типу пристрою для керування поляризацією світла потрібно знати не лише принцип його роботи, а й експлуатаційні характеристики (ширина спектральної області застосування, робоча температура, кут падіння світла, поле зору та інші) і їх залежність від вибору матеріалів та допусків при їх виготовленні. Нижче розглянуто принципи роботи ромбів Френеля, виконано порівняння їх властивостей із властивостями фазових пластинок [4], коротко обговорено можливості їх використання у різних галузях науки та техніки.

Ромб Френеля. Властивості ромбів Френеля ґрунтуються на законах повного внутрішнього відбивання. Якщо кут падіння θ (рис.1) лінійно поляризованого потоку світла перевищує кут повного внутрішнього відбивання, то у відбитому потоці в одному і тому ж напрямку розповсюджуються дві хвилі із взаємно перпендикулярною орієнтацією векторів \mathbf{E} (\mathbf{s} та \mathbf{p} компоненти світлового потоку). Різницю фаз δ між цими хвилями можна оцінити за допомогою формули [5]

$$\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}}{\sin^2 \theta}, \quad (1)$$

де n_{21} – відносний показник заломлення більш густого середовища відносно менш густого.

Максимальний зсув фази δ_{\max} залежить лише від n_{21}

$$\operatorname{tg} \frac{\delta_{\max}}{2} = \frac{1 - n_{21}^2}{2n_{21}}. \quad (2)$$

У більшості матеріалів значення кута запізнення фази рівне $\pi/2$ реалізується лише після двох повних внутрішніх відбивань. Власне цим і обумовлена ромбовидна форма пристрою (ромб Френеля) для керування поляризацією світла.

Якщо на вхідну грань ромба падає потік лінійно поляризованого світла, то при $\delta_{\max} = \pi/2$ з нього виходить світло поляризоване по колу (рис. 1) і навпаки. Тобто ромб працює як чвертьхвильова фазова пластинка. Це дозволяє змінювати ступінь еліптичності світла від нуля (лінійно поляризоване світло) до одиниці (циркулярно поляризоване світло) (рис. 1).

Два послідовно розміщені ромби (рис. 1) діють як півхвильова фазова пластинка. Дійсно перший ромб перетворює лінійно поляризоване світло в еліптично поляризоване, а другий перетворює еліптично поляризоване світло в лінійно поляризоване. Це дозволяє шляхом повороту подвійного ромба навколо осі розповсюдження світла здійснювати поворот площини поляризації світла на 360° .

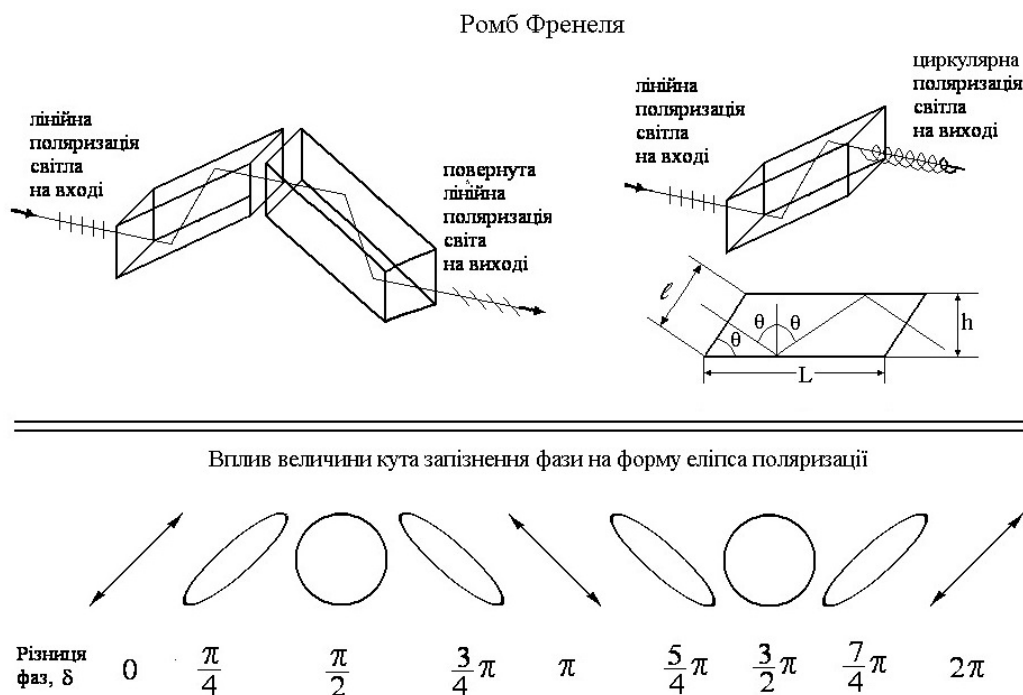


Рисунок 1 – Ілюстрація впливу ромбів Френеля на стан поляризації світла
Figure 1 – Illustration of the influence of Fresnel rhombuses on the state of light polarization

Оптичний матеріал для ромбів. Ромби виготовляють з оптично досконалих ізотропних матеріалів великого об'єму з відомою дисперсією показника заломлення. Лінійне поглинання та розсіяння світла в області прозорості цих матеріалів повинно бути мінімальним. Найчастіше ромби виготовляють з плавненого кварцу (робочий діапазон 190-2500 нм) [6], зі скла BK7 [6] та K8 (робочий діапазон 90-2500 нм). Для інфрачервоної області найчастіше ромби виготовляються із селеніду цинку (ZnSe) на діапазон (6-14) мкм; телуриду кадмію (CdTe) та КРС (KRS-5) на діапазон (6-18) мкм [2]. Технологія синтезу ZnSe великого об'єму освоєна. Придатність монокристалів CdTe для виготовлення ромбів більш обмежена із-за проблем якісного полірування. Низька дисперсія показника заломлення КРС в інфрачервоній області робить цей матеріал ідеальним для ромбів Френеля. Недоліками цього матеріалу є токсичність, хрупкість, труднощі у поліруванні.

Технічні параметри ромбів Френеля. Особливості розрахунку технічних параметрів ромба проілюструємо на прикладі скла K8. Скориставшись відомою табличною залежністю показника заломлення від довжини хвилі (рис. 2, точки) [7], виконаємо апроксимацію цієї залежності поліномом шостого степеня (рис. 2, суцільна лінія). Середня квадратична похибка $3,6 \cdot 10^{-4}$. Далі за допомогою формули (1) знаходимо залежність δ_{\max} від λ (рис.3).

Довжина хвилі, при перевищенні якої δ_{\max} стає меншим за 45° , обмежує спектральний діапазон роботи ромба як чвертьхвильової пластинки з боку великих довжин хвиль (таблиця 1). Спектральний діапазон роботи подвійного ромба як півхвильової пластинки з боку великих довжин хвиль

обмежується наявністю коливальних смуг поглинання (таблиця 1). Край фундаментальної смуги поглинання обмежує спектральний діапазон роботи ромбів з боку малих довжин хвиль.

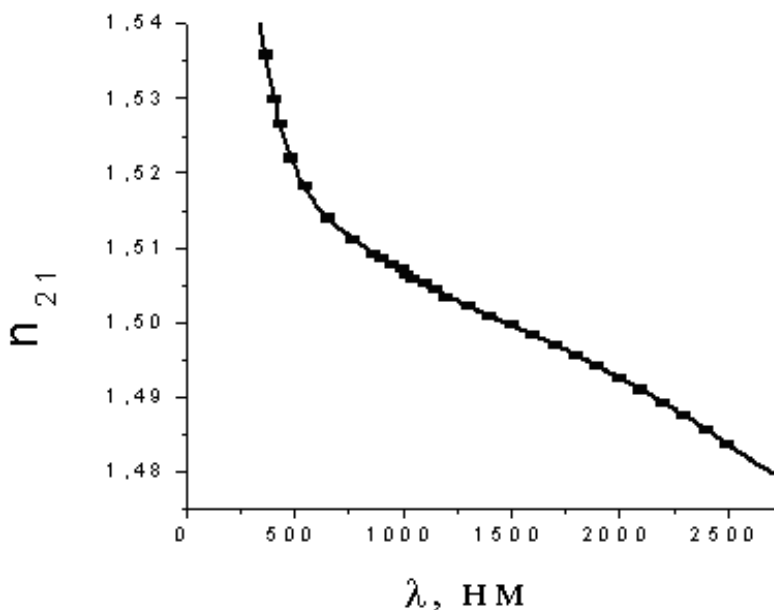


Рисунок 2 – Дисперсія показника заломлення скла К8 [7] (точки).
Суцільна лінія апроксимація поліномом шостою степеня.
Figure 2 – Dispersion of the index of refraction of K8 glass [7] (points).
The solid line is the approximation by a polynomial of the sixth degree.

Зафіксуємо певну довжину хвилі, наприклад, приймемо, що $\lambda = 1,25$ мкм. Скориставшись даними рис. 2, знаходимо n_{21} для цієї довжини хвилі. Підставивши знайдене значення n_{21} та $\delta = \pi/2$ в формулу (1), знаходимо θ . Воно приймає два значення $\theta = 53^\circ 50'$ та $\theta = 49^\circ 46'$. Виходячи з того, що кут падіння повинен перевищувати кут повного внутрішнього відбивання, вибираємо більше значення θ .

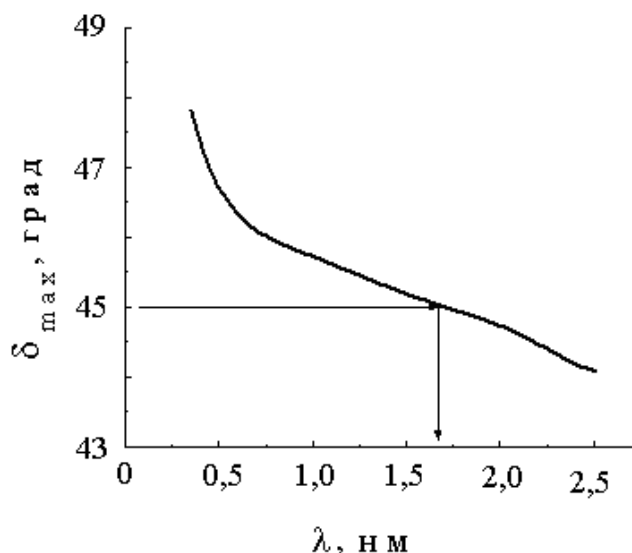


Рисунок 3 – Залежність δ_{\max} від довжини хвилі для скла К8. Стрілкою показана довгохвильова границя роботи чверть хвильових ромбів Френеля, виготовлених із скла К8.
Figure 3 – Wavelength dependence for K8 glass. The arrow shows the long-wavelength limit of operation of quarter-wave Fresnel rhombuses made of K8 glass.

У більшості лазерних джерел розподіл інтенсивності I світла вздовж поперечного перерізу має гаусів характер, тобто

$$I = I_m \exp\left[-(r/r_o)^2 \ln 2\right], \quad (3)$$

де I_m – максимальне значення інтенсивності, r – відстань від центру потоку світла, r_o – радіус на рівні $I = I_m / 2$. При спектроскопічних дослідженнях зазвичай нехтується вкладом інтенсивності $I = I_m / e^4$ у загальний потік світла. Значення $I = I_m / e^4$ реалізується на відстані від центру потоку. $r_e = 2r_o / \sqrt{\ln 2}$. Це означає, що за мінімальний розмір кожної сторони квадратної вхідної

Таблиця 1 – Параметри ромбів Френеля
Table 1 – Fresnel rhombic parameters

Параметр	Матеріал		
	Плавлений кварц	Скло BK7	Скло K8
Область довжин хвиль	(210-400) нм [6]	(400-2000) нм [6]	(365-2500) нм для $\lambda/2$ (365-1660) нм для $\lambda/4$
Кут при основі ромба		54,6° [8]	53°50'
Допуск на кут		3 кутові хвилини [8]	1 кутова хвилина
Допуск на розмір	+0,0; -0,2 мм [9]	+0,0; -0,2 мм [9]	+0,0; -0,2 мм
Плоскостність	$\lambda/10$ на $\lambda=632,8$ нм [9]	$\lambda/10$ на $\lambda=632,8$ нм [9]	$\lambda/10$ на $\lambda=632,8$ нм
Допуск на кут запізнення фази	$\pm 2^\circ$ [18]	$\pm 2^\circ$ [18]	+3°; -1°
Антивідбиваюче покриття	R \leq 0,2% на центральній довжині хвилі [9]	R \leq 0,2% на центральній довжині хвилі [9]	R \leq 0,5% на $\lambda=632,8$ нм
Якість поверхні	20-10 подряпин та виколок [9]	20-10 подряпин та виколок [9]	<20 подряпин та виколок
Допуск на паралельність	<2" [10]	<2" [10]	<2"
Девіація	$\pm 0.5^\circ$ [10]	$\pm 0.5^\circ$ [10]	$\pm 0.3^\circ$ на $\lambda=632,8$ нм
Максимальна пікова інтенсивність	200 МВт/см ² [11]	200 МВт/см ² [11]	200 МВт/см ²
Максимальна неперервна інтенсивність	100 Вт/см ² [11]	100 Вт/см ² [11]	
Діаметр чистої апертури аж до	10 мм [10,12]	10 мм [10,12]	15 мм

грані можна прийняти значення $l = 2r_e = 2r_o / \sqrt{\ln 2}$. Із рис.1 випливає, що висота ромба $h = l \sin \theta$, а довжина основи ромба $L = 2h \cdot \operatorname{tg} \theta$. Одержані співвідношення дозволяють

Таблиця 2 – Габаритні розміри ромба Френеля, виготовленого із скла K8
Table 2 – Overall dimensions of a Fresnel rhombus made of K8 glass

$D_o = 2r_o$, мм*	l , мм	h , мм	L , мм
3	7,2	5,8	15,3
10	24,0	19,4	51,2
15	36,0	29,1	76,8

* D_o – діаметр потоку лазерного випромінювання на рівні $I = I_m / 2$.

розрахувати габаритні розміри ромбів Френеля, виготовлених із скла K8 (таблиця 2) та

проілюструвати їх залежність від поперечного перерізу потоку лазерного випромінювання. Інші технічні параметри ромбів Френеля, які виготовлені зі скла К8, наведені в таблиці 1. Контроль значення кута при основі ромба та паралельність граней здійснювався гоніометром Г-1.

Асортимент ромбів Френеля надзвичайно широкий. Типові значення параметрів ромбів, які пропонуються виробниками, наведено в таблиці 1. Видно, що спектральна область кожного конкретного ромба, в межах якої можна керувати поляризацією, значно перевищує спектральну область роботи фазових пластин нульового та високого порядку і співвимірні з областю роботи ахроматичних фазових пластин (порівняй таблиці 1 та 1 [4]). Зазвичай виробники пропонують ромби на спектральну область, для якої величина запізнення фази дорівнює $90^\circ \pm 2^\circ$. З цієї причини робоча область ромбів значно вужча спектральної області прозорості матеріалу, з якого виготовлено ромб. Крім типових розмірів на вимогу замовника виробники можуть виготовити ромби з бажаним розміром вхідної грані ромба.

Джерела похибок в ромбах Френеля. При виборі конкретного типу конструкції ромба перевагу потрібно віддати тим, у яких сума випадкових та систематичних похибок встановлення кута запізнення фази мінімальна. Величину випадкових похибок можна мінімувати шляхом оптимального вибору конструкції ромба та його тримача, а також системи реєстрації інтенсивності світла. Систематичні похибки обумовлені невизначеністю в значенні кута падіння потоку світла на відбиваючу грань (див. формулу (1)), залежністю показника заломлення, а значить і кута запізнення фази, від температури та від довжини хвилі, наявністю відбивання від вхідної та вихідної граней ромба; скручування ромбів.

Кут падіння. Згідно з формулою (1), зміна кута падіння θ викликає зміну кута запізнення фази. Результатом цього є висока чутливість одиночних ромбів Френеля до зміни кута падіння (на рівні кутових хвилин) [2]. Це потрібно враховувати при використанні одиночних ромбів Френеля для керування ступенем еліптичності реальних джерел світла, потоки яких завжди дещо розходяться. Подвійні ромби не чутливі до варіації кута падіння. Оскільки, двоє відбивань у двох ромбах взаємно доповнюють одне одного (рис. 1 та рис. 2). Збільшення кута падіння із-за двох повних внутрішніх відбивань у першому ромбі компенсується зменшення його із-за двох повних внутрішніх відбивань в другому ромбі. В результаті цього зміна затримки фази анулюється. Таким чином, допускається широка область варіації відхилення кутів падіння від нормального аж до кількох градусів.

При монтажі подвійних ромбів завжди існує ймовірність появи деякого кута між площинами падіння ромбів, що повинно впливати на величину кута запізнення фази. В роботі [12] показано, що при типових допусках на кут при основі ромба (кут θ) та на монтаж ромбів, кут між вихідною гранню першого ромба та вхідною гранню другого ромба може лежати у діапазоні від $0,2^\circ$ до $0,8^\circ$. Ця різниця в положенні площин падіння вносить похибку визначення кута запізнення фази, яка менша за $0,002^\circ$.

Відбивання від вхідних та вихідних граней. Кожен ромб можна розглядати як еталон Фабрі-Перо, якщо вхідна та вихідна його грані строго паралельні. Допуски на паралельність граней та на кути при основі такі (таблиця 1), що інтерференційними ефектами в ромбах можна знехтувати. Сприяє цьому напилення антивідбиваючих покриттів на вхідній та вихідній гранях ромбів.

Спектральний діапазон роботи. Дисперсія показника заломлення n_{21} визначає залежність кута запізнення фази δ від довжини хвилі. Задавши діапазон зміни δ ми фактично задаємо спектральний діапазон роботи ромбів Френеля. Для значення зміни δ рівного $\pm 2^\circ$ типова його протяжність дорівнює 300 нм для видимого діапазону довжин хвиль [13]. Розширити спектральний діапазон роботи можна за рахунок зменшення залежності n_{21} від довжини хвилі. Це досягається шляхом нанесення на відбиваючі грані ромбів тонкого шару речовини, дисперсія показника заломлення якого близька до дисперсії показника заломлення матеріалу ромба. Так, нанесення на відбиваючі поверхні скла тонкого шару MgF_2 (порядка 23 нм) дозволяє досягти значення результуючого фазового зсуву рівного $90 \pm 0,5^\circ$ у діапазоні від 370 нм до 1000 нм (в той час як запізнення фази класичних хвильових пластинок дає відхилення від 90° порядку 20° [1]).

Вплив температури. В ромбах Френеля температурно залежним параметром є показник заломлення. В більшості ізотропних матеріалів температурна залежність n_{12} незначна. Зокрема, в області кімнатних температур $dn/dT = 0,24 \cdot 10^{-5}/^\circ C$ [14] для скла ВК-7, $dn/dT = 0,24 \cdot 10^{-5}/^\circ C$ [15] для плавленого кварцу. Для ZnSe, CdTe, KRS-5 на $\lambda = 10,6$ мкм dn/dT відповідно дорівнює $6,1 \cdot 10^{-5}/^\circ C$, $10,7 \cdot 10^{-5}/^\circ C$, $-9,9 \cdot 10^{-5}/^\circ C$ [16]. Згідно наведених значень dn/dT , зміна температури ромба на $\pm 10^\circ$ приведе до зміни n_{12} не більше ніж на одиницю в третьому десятковому знакові після коми. Це вказує на незначний вплив температури ромба на величину запізнення фази.

Порівняння властивостей ромбів Френеля та фазових пластинок.

Дані таблиці 1 та таблиці 1 [4] дозволяють порівняти характеристики ромбів Френеля та фазових пластинок, що працюють у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Зокрема, при допуску на встановлення кута запізнення фази в 2° єдиною градуовальною таблицею можна користуватись в інтервалі довжин хвиль в 200-300 нм як для ахроматичних фазових пластинок, так і для ромбів Френеля. Розширити цей діапазон при одночасному зменшенні допуску на кут запізнення фази для фазових пластин складно. Однак, для ромбів Френеля нанесення на відбиваючі поверхні ромба зі скла тонкого шару MgF_2 дозволяє користуватись єдиною градуовальною таблицею в діапазоні довжин хвиль (370 -1000) нм з похибкою встановлення кута повороту площини поляризації в $0,5^\circ$ [1]. Ще більш різюча відмінність спостерігається в інфрачервоній області. Так при точності встановлення кута запізнення фази в 2° протяжність спектральної області в околі 10,6 мкм для фазової пластинки з CdS дорівнює $\pm 0,1$ мкм [16]. Для ромбів Френеля, виготовлених з ZnSe, у спектральній області від 9,238 мкм до 10,6 мкм відхилення від заданого значення кута запізнення фази не перевищує $0,08^\circ$ при нормальному куті падіння [17]. Власне з цієї причини для аналізу стану поляризації світла в інфрачервоній області, що потрібно для виявлення планет поблизу зірок та для дослідження магнітного поля та атмосфери, використовуються ромби Френеля, а не фазові пластинки [1,2]).

На вибір пристрою для керування поляризацією впливає чутливість його до кута падіння на вхідну поверхню. Так відхилення від нормального кута падіння на вхідну грань чвертьхвильової фазової пластинки на 5° викликає зміну кута запізнення фази на 2° [4]. Подвійний ромб Френеля (рис.1) мало чутливий до зміни кута падіння [7]. Для нього допускається відхилення від кута нормального падіння в кілька градусів. Півхвильові пластинки та одиночні ромби Френеля дуже чутливі до відхилення кута падіння від нормального.

Вплив температури на кут запізнення фази в ромбах Френеля незначний. В той же час властивості хвильових пластинок чутливі до зміни температури.

Девіація потоку випромінювання при повороті подвійних ромбів може досягати $\pm 0,5^\circ$ [11]. Суттєво її можна зменшити шляхом зменшення допуску на кут при основі ромба та на паралельність граней. Девіація та прецесія потоку світла, що проходить крізь фазову пластинку відсутня [5].

Променева стійкість ромбів Френеля та фазових пластинок близька. В них вона визначається променевою стійкістю матеріала, з якого вони виготовлені (при наявності повітряного шару між елементами), або променевою стійкістю клею, що з'єднує елементи фазових пластинок або ромбів.

Висновки. Виконано аналіз роботи, технічних параметрів ромбів Френеля. Здійснено порівняння характеристик ромбів Френеля та фазових пластинок. У системах, в яких основну роль грають малі габарити та вага, потрібно віддавати перевагу фазовим пластинкам. До таких систем перш за все потрібно віднести оптичну телекомунікацію. У системах, в яких потрібно керувати поляризацією в широкому діапазоні довжин хвиль, потрібно віддати перевагу ромбам Френеля. До таких систем можна віднести поляриметри, системи дослідження атмосфери і магнетизму Сонця та зірок, при дослідженні нелінійних оптичних властивостей середовищ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. (27.) P. Petit, J.-F. Donati, and the ESPaDOnS project team Stellar polarimetry with espadons // arXiv:astro-ph/0403118v1 4 Mar 2004. Pp. 1-8.
2. (19.) D. Mawet, C. Hanot, C/ Lenaerts, P. Riaud, D. Defrere, D. Vandormael, J. Loicq, K. Fleury, J.-Y. Plesseria, J. Surdej, S. Habraken Fresnel rhombs as achromatic phase shifters for infrared nulling interferometry // Optics express. Vol. 15, No. 20. Pp.12850-12865 (2007).
3. N.R. Kulish, M.P. Lisitsa, N.I. Malysh Influence of light polarization in CdS in the presence of two-photon absorption // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2007. V. 10, N 2. P. 72-75.
4. М. І. Малиш, М.Р. Куліш . Фазові пластинки – затримувачі фази // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2023. – Вип. 1 (51). С.194-199.
5. Р. Дитчберн. Физическая оптика. М. Наука. 1965. – 631 с.
6. EKSPLA UAB Savanoriu Av. 231 LT-02300 Vilnius-53 Lithuania.
7. К.И. Тарасов Спектральные приборы. Ленинград, Машиностроение. 1977. – 368 с.
8. DORIC LENSES INC 357 rue Franquet Quebec, QC CANADA G1P 4N7.
9. Newlight Photonics P.O. Box 261 Toronto Postal STN "E" 772 Dovercourt Road Toronto ON 6H 4E2 Canada.

10. 2007 – B. Halle Nachfl. GmbH Hubertusstraße 10 D – 12163 Berlin Germany.
11. Halbo Optics Fresnel Rhombs
12. Karl Lambrecht Corporation 4204 N. Lincoln Ave., Chicago, IL 60618.
13. P.A. Williams, A.H. Rose, C.M. Wang Rotation-polarimeter for accurate retardance measurement // *Applied optics*/ 1997. V. 36, No 25. P. 6466-6472.
14. UQG Ltd The Norman Industrial Estate, 99 – 101 Cambridge Road, Milton, Cambridge, CB4 6AT, England.
15. Е.М. Воронкова, Б.Н. Гречушников, Г.И. Дистлер, И.П. Петров Оптические материалы для инфракрасной техники. Москва, Наука. 1965. – 335 с.
16. II-VI INFRARED 375 Saxonburg Blvd Saxonburg, PA 16056
17. R. Anderson Quarterwaveplate and Fresnel rhomb compared in the 10- μm CO₂ laser emission region // *Applied Optics* (1988) Vol. 27, No. 13. Pp. 2746-2747.

REFERENCES

1. (27.) P. Petit, J.-F. Donati, and the ESPaDOnS project team Stellar polarimetry with espadons // arXiv:astro-ph/0403118v1 4 Mar 2004. Pp. 1-8.
2. (19.) D. Mawet, C. Hanot, C/ Lenaerts, P. Riaud, D. Defrere, D. Vandormael, J. Loicq, K. Fleury, J.-Y. Plesseria, J. Surdej, S. Habraken Fresnel rhombs as achromatic phase shifters for infrared nulling interferometry // *Optics express*. Vol. 15, No. 20. Pp.12850-12865 (2007).
3. N.R. Kulish, M.P. Lisitsa, N.I. Malyshev Influence of light polarization in CdS in the presence of two-photon absorption // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2007. V. 10, N 2. P. 72-75.
4. M.I. Malyshev, M.R. Kulish Phase plates – phase retarders. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2023. – Issue 1 (55). S.194-199.
5. P. Ditchbern *Fizicheskaja optika*. M. Nauka 1965. – 631 s.
6. EKSPLA UAB Savanoriu Av. 231 LT-02300 Vilnius-53 Lithuania.
7. K.I. Tarasov. *Spektralnyje pribory*. Leningrad. Mashinostrojnie. 1977. – 368 s.
8. DORIC LENSES INC 357 rue Franquet Quebec, QC CANADA G1P 4N7.
9. Newlight Photonics P.O. Box 261 Toronto Postal STN "E" 772 Dovercourt Road Toronto ON 6H 4E2 Canada.
10. 2007 – B. Halle Nachfl. GmbH Hubertusstraße 10 D – 12163 Berlin Germany.
11. Halbo Optics Fresnel Rhombs
12. Karl Lambrecht Corporation 4204 N. Lincoln Ave., Chicago, IL 60618.
13. P.A. Williams, A.H. Rose, C.M. Wang Rotation-polarimeter for accurate retardance measurement // *Applied optics*/ 1997. V. 36, No 25. P. 6466-6472.
14. UQG Ltd The Norman Industrial Estate, 99 – 101 Cambridge Road, Milton, Cambridge, CB4 6AT, England.
15. E.M.Voronkova, B.N. Grechushnikov.G/I. Distler,I.P. Petrov.Opticheskie materialy dlja infrakrasnoi tehniki. Moskva, Nauka. – 335 s.
16. II-VI INFRARED 375 Saxonburg Blvd Saxonburg, PA 16056
17. R. Anderson Quarterwaveplate and Fresnel rhomb compared in the 10- μm CO₂ laser emission region // *Applied Optics* (1988) Vol. 27, No. 13. Pp. 2746-2747.

РЕФЕРАТ

Малиш М.І. Ромби Френеля – затримувачі фази / М.І. Малиш, М.Р. Куліш, А.Є. Ключан // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2024. – Вип. 1 (58).

Розглянуто принципи роботи, технічні характеристики ромбів Френеля. Здійснено порівняння їх властивостей. Обговорено основні області їх застосування.

Мета досліджень: проаналізувати принцип роботи ромбів Френеля, порівняти їх технічні характеристики.

Метод дослідження – теоретичний.

Встановлено, що ромби Френеля використовуються для аналізу та керування поляризацією світла у досить широкій спектральній області. Їх широко застосовують у наукових дослідженнях і в техніці, у системах для виявлення планет поблизу зірок і для дослідження їх магнітного поля та атмосфери.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РОМБ ФРЕНЕЛЯ, СПЕКТРАЛЬНА ОБЛАСТЬ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА, ЗАТРИМУВАЧ ФАЗИ.

ABSTRACT

Malysh M.I., Kulich M.R., Klochan A.Ye. Fresnel rhombic – phase retarders. Visnyk National Transport University. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – К.: NTU, 2024. – Issue 1 (58).

The principles of operation, technical characteristics of Fresnel rhombuses 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 Fresnel rhombuses, to compare their technical characteristics.

The research method is theoretical.

It has been established that Fresnel rhombuses are used to analyze and control the polarization of light in a fairly wide spectral range. They are widely used in scientific research and engineering, in systems for detecting planets near stars and for studying their magnetic field and atmosphere.

KEY WORDS: FRESNEL RHOMBUS, SPECTRAL FIELD, POLARIZATION OF LIGHT, 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.С. Лашкарьова 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.

Клочан Арсен Євгенійович, PhD, Національний транспортний університет, асистент кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, e-mail: VArsenchuk@gmail.com, тел. +38(068)-352-81-26, Україна, 01101, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка 1, orcid.org/0000-0002-4225-9382.

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 Mykola 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.

Klochan Arsen Ye., PhD, National Transport University, assistant of the department of information analysis and information security, e-mail: VArsenchuk@gmail.com, tel. +38(068)-352-81-26, Ukraine, 01101, Kyiv, Mykhaila Omelianovycha – Pavlenka str. 1, orcid.org/0000-0002-4225-9382

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, провідний науковий співробітник Інститута фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова 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, Leading scientific scientist, V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.