

УДК 535.568:61
PACS number(s): 42.25.Ja

ПРЕЦИЗИЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ СТУПЕНЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ СВІТЛА

О. Куций, Я. Шопа

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: shopa@physics.wups.lviv.ua*

Знайдено узагальнені залежності пропускання системи поляризатора-аналізатора, які можна використовувати для прецизійного вимірювання ступеня поляризації світла. Запропоновано спосіб обчислення мінімального значення інтенсивності вихідного світла та положення мінімуму системи за допомогою апроксимації результатів експерименту методом найменших квадратів. Подано результати аналізу поляроїда та двох призм Аренса.

Ключові слова: поляризатор, ступінь поляризації, узагальнений закон Малюса.

Важливою характеристикою лінійного поляризатора є ступінь P поляризації пучка природного світла після проходження крізь нього [1]:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

де I_{\max} – інтенсивність, що відповідає коливанням світлової хвилі, котрі мають максимальну амплітуду, а I_{\min} – інтенсивність, що відповідає коливанням, котрі мають мінімальну амплітуду.

Від часу відкриття Барголіном властивостей ісландського шпату в 1670 р. [2] минуло вже чимало часу, але й зараз не меншає цікавість науковців до дослідження впливу матеріалів та явищ на стан поляризованого світла. Для ідеального поляризатора, який на виході створює лінійно поляризоване світло, ступінь поляризації $P = 1$. Реальні ж поляризатори, особливо дешевші частково продукують поляризоване світло, тобто, схрестивши поляризатор і аналізатор, ми не отримаємо нульової інтенсивності світла на виході. А оскільки точність досліджень постійно зростає, то підвищуються й вимоги до „якості” поляризованого світла, а саме, до його ступеня поляризації.

Наприклад, під час експериментів з вивчення двозаломлення вакууму [3], спочатку використовували поляризатор Глана–Томсона з коефіцієнтом затухання (величина обернено пропорційна до ступеня поляризації) порядку 10^{-7} , але згодом і цього виявилось замало, тому його планують замінити поляризатором Глана–Тейлора з коефіцієнтом затухання меншим від 10^{-8} . Досліджують також, в яких

виникає потреба визначення найменших змін ступеня поляризації світла після проходження крізь речовину. Зокрема під час поляризаційної томографії металічних пористих наномасивів [4].

Стає зрозуміло, що перед тим як використовувати поляризатори у будь-яких точних вимірюваннях чи серійній апаратурі потрібно з'ясувати ступінь поляризації отриманого за їхньою допомогою світла, щоб передбачити та врахувати пов'язані з цим з похибки. Ось чому існують автоматизовані прилади для отримання, підтримки, підсилення та визначення ступеня поляризації світла.

Знаходження ступеня поляризації ґрунтується на прецизійному вимірюванні інтенсивності світла I , яке пропускає система поляризатор–аналізатор і відповідно відомого закону Малюса залежить від початкової інтенсивності I_0 та азимута поляризатора θ [5]. Під час вимірювань цієї величини виникають такі труднощі [6, 7]:

- обмежений динамічний діапазон фотоприймачів;
- обмежена точність відліків кута повороту поляризаторів.

З метою зменшення їхнього впливу стараються удосконалювати можливості експериментальної апаратури [8, 9], а також використовують різноманітні числові методи для опрацювання результатів [10, 11].

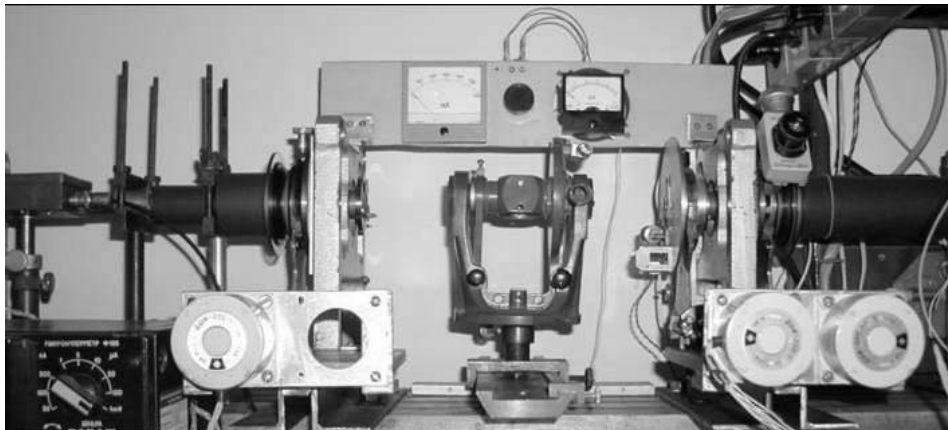


Рис. 1. Фотографія автоматизованого поляриметра, використаного для вимірювань ступеня поляризації світла

У вимірюваннях ми використовували автоматизований поляриметр [9], в якому роздільна здатність кутових відлікових пристроїв становить $0,00133^\circ$ і залежить від властивостей механічних приводів поляризаторів (рис. 1). Вимірювання інтенсивності проводили у невеликому діапазоні кутів повороту аналізатора біля положення погасання, тому можна було використати чутливий приймач випромінювання (фотодіод) з обмеженим динамічним діапазоном.

Для одержання узагальненої залежності вихідної інтенсивності світла від вхідної (частковим випадком якої для ідеальних поляризаторів є закон Малюса) використали такі припущення [10]:

- вектор електричного поля падаючого пучка має однакову амплітуду коливаний у всіх площинах, що містять напрям поширення;

- кутова діаграма поляризованого світла на виході має вигляд еліпса, велика вісь якого збігається з віссю пропускання реального поляризатора (яку для зручності вибрано паралельною до Ox);
- падаюче світло можна розкласти на x - та y -складові так, що $I_x = I_y = I_0/2$, де I_0 – інтенсивність падаючого світла;
- вздовж осі пропускання поляризатора Ox світло проходить без змін інтенсивності, а вздовж осі Oy інтенсивність меншає на величину коефіцієнта “пропускання” поляризатора $\eta = I_{yp}/I_y$.

Після таких припущень, а також означення ступеня поляризації (1) отримуємо

$$P = \frac{I_{xp} - I_{yp}}{I_{xp} + I_{yp}} = \frac{1 - \eta}{1 + \eta}, \quad (2)$$

де I_{xp} , I_{yp} – інтенсивності світла вздовж осей Ox та Oy , відповідно, після проходження світлом першого поляризатора;

Для випадку проходження світла крізь два поляризатори, коефіцієнт пропускання яких і ступені поляризації, відповідно, η_1, P_1 та η_2, P_2 отримуємо, що інтенсивність на виході з системи становитиме:

$$I = \frac{I_0}{2} \left((1 + \eta_1 \eta_2) \cos^2 \theta + (\eta_1 + \eta_2) \sin^2 \theta \right), \quad (3)$$

$$I = \frac{I_0}{(1 + P_1)(1 + P_2)} \left((1 + P_1 P_2) \cos^2 \theta + (1 - P_1 P_2) \sin^2 \theta \right), \quad (4)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого пучка, θ – кут між відповідними осями поляризатора і аналізатора. Рівності (3) та (4) – це узагальнений закон Малюса; вони своєю чергою, за умови ідеальних поляризатора та аналізатора, перетворюються в закон Малюса.

Для випадку однакових поляризатора і аналізатора ($P_1 = P_2 = P$):

$$I = \frac{I_0}{2} \left((1 + \eta^2) \cos^2 \theta + 2\eta \sin^2 \theta \right), \quad (5)$$

$$I = \frac{I_0}{(1 + P)^2} \left((1 + P^2) \cos^2 \theta + (1 - P^2) \sin^2 \theta \right). \quad (6)$$

У випадку, коли у одного з поляризаторів ступінь поляризації значно кращий, ніж у іншого (поляризатор близький до ідеального: $P_1 \rightarrow 1, P_2 = P$), отримуємо:

$$I = \frac{I_0}{2} \left(\cos^2 \theta + \eta \sin^2 \theta \right), \quad (7)$$

$$I = \frac{I_0}{2} \left(\cos^2 \theta + \frac{1 - P}{1 + P} \sin^2 \theta \right). \quad (8)$$

Через обмежений динамічний діапазон фотоприймача та неможливість визначення абсолютного значення кута θ між осями пропускання поляризаторів працювати з величинами I_0 та θ не зручно. Тому в рівностях (3)–(8) варто зробити такі заміни:

1. Від інтенсивності падаючого пучка світла краще перейти до мінімальної інтенсивності світла на виході I_m , оскільки згідно з вище зазначеними причинами у ній інкапсулюються фактори, що спричиняють відсутність нульового мінімуму

інтенсивності в положенні схрещених поляризаторів, такі як темновий шум, засвітка та ін. Із формул (3) та (4) при $\theta = \pi/2$ отримаємо:

$$I_m = \frac{I_0}{2}(\eta_1 + \eta_2), \quad (9)$$

$$I_m = \frac{I_0(1 - P_1P_2)}{(1 + P_1)(1 + P_2)}. \quad (10)$$

2. Від кута θ між поляризаторами перейдемо до протилежного йому кута:

$$\alpha = \pi/2 - \theta, \quad (11)$$

Врахувавши зроблені заміни (9), (10) та (11), а також той факт, що коли кут $\theta \rightarrow \pi/2$ (в схрещеному положенні поляризаторів), $\cos^2(\pi/2 - \theta) = \sin^2 \alpha \approx \alpha^2$, а $\sin^2(\pi/2 - \theta) = \cos^2 \alpha \approx 1 - \alpha^2$, отримаємо:

$$I = I_m \left(\frac{1 + \eta_1\eta_2 - \eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \alpha^2 + 1 \right), \quad (12)$$

$$I = I_m \left(\frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \alpha^2 + 1 \right). \quad (13)$$

На практиці зручно перейти від кутів α до кутів β (покази по шкалі поляризаторів): $\alpha = \beta - \beta_0$, де β_0 – компенсуючий кут нульового відліку системи (значення кута β , за якого $\alpha = 0$). Тоді рівності (12) та (13) перейдуть у:

$$I = I_m \left(\frac{1 + \eta_1\eta_2 - \eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} (\beta - \beta_0)^2 + 1 \right), \quad (14)$$

$$I = I_m \left(\frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} (\beta - \beta_0)^2 + 1 \right). \quad (15)$$

Експериментально помірявши залежність $I = f(\beta)$ та апроксимувавши її параболою за допомогою методу найменших квадратів, можемо знайти мінімальну інтенсивність світла на виході системи, а також компенсуючий кут нульового відліку: $\beta_0 = -\frac{b}{2a}$, $I_m = c - \frac{b^2}{4a}$, де a , b , c – відповідні коефіцієнти апроксимаційної параболи $a\alpha^2 + b\alpha + c$.

Для випадку, коли у одного з поляризаторів ступінь поляризації значно краща (поляризатор близький до ідеального: $P_1 \rightarrow 1$, $P_2 = P$), ступінь поляризації іншого можна визначити так:

$$P = \frac{2a^2}{2a^2 - b^2 + 4ac}. \quad (16)$$

Як об'єкти досліджень ми вибрали дві призми Аренса [5] і плівковий дихроїчний поляроїд, які належать до найпоширеніших у сучасній апаратурі, а поляризаційну призму Глана [5] як поляризатор високої якості.

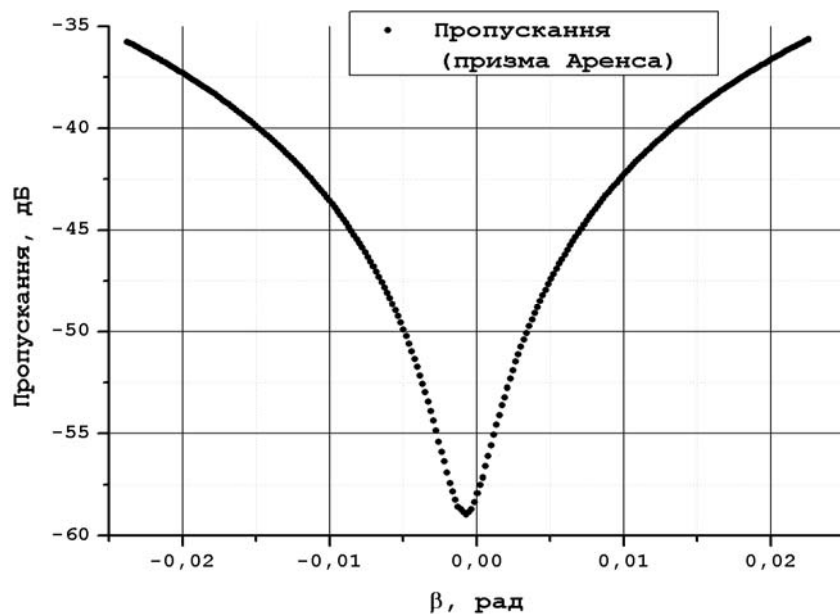


Рис. 2. Експериментальна крива пропускання поляризаційної системи з призмою Аренса

Як приклад на рис. 2, 3 та у табл. подано результати вимірювань і розрахунків згідно поданих вище співвідношень для двох різних призм Аренса та поляроїда.

Таблиця

Результати розрахунків параметрів поляризаційної системи для призм Аренса та поляроїда як аналізаторів у автоматизованому поляриметрі

	призма Аренса № 1	призма Аренса № 2	поляроїд
<i>A</i>	12720	12990	8089
<i>B</i>	572,258	19,6209	-63,1657
<i>C</i>	6,4549	0,0398	0,2934
<i>P</i>	0,9999985	0,9999975	0,9999848
<i>η</i>	$7,4935 \cdot 10^{-7}$	$1,2468 \cdot 10^{-6}$	$7,5740 \cdot 10^{-6}$
α_0 , рад	$-2,2492 \cdot 10^{-2}$	$-7,5520 \cdot 10^{-4}$	$3,9045 \cdot 10^{-3}$
<i>I_m</i> , в.о.	$1,8998 \cdot 10^{-2}$	$3,2393 \cdot 10^{-2}$	$1,2253 \cdot 10^{-1}$
<i>I₀</i> , в.о.	25439	25981	16179

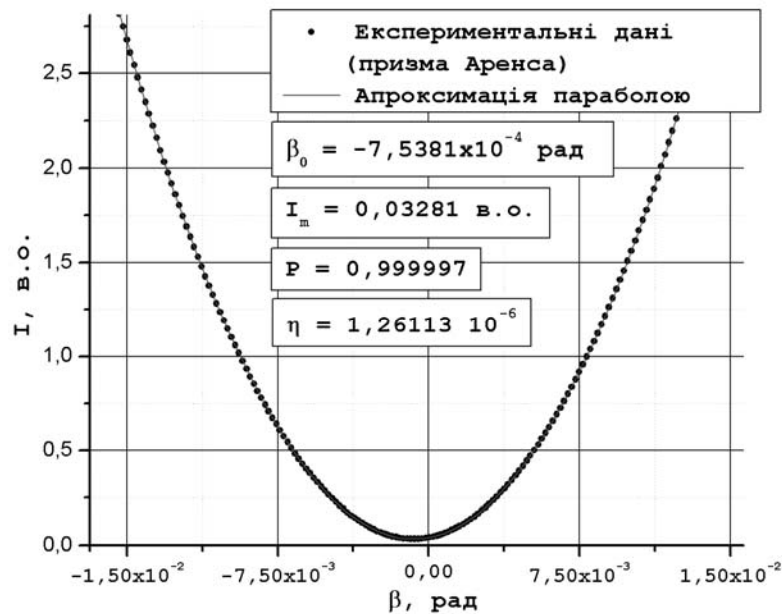


Рис. 3. Апроксимація експериментальних даних та обчислені на її основі параметри поляризатора

Як бачимо з рис. 2, 3, досліджена призма Аренса є хорошим поляризатором для звичайних вимірювань, оскільки коефіцієнт пропускання η призми є близько 10^{-6} , але недостатньо добрим для згаданих вище експериментів [3, 4], які потребують для цього параметра величини, не більшої від 10^{-8} .

Судячи з того, що апроксимаційна крива добре збігається з експериментальними даними, можна сказати, що запропонована схема вимірювання та розрахунків добре описує процес взаємодії частково поляризованого світла з реальним поляризатором та дає змогу за допомогою апроксимаційних коефіцієнтів визначити мінімальне можливе значення інтенсивності вихідного світла для цього типу поляризаторів у положенні їхнього погашення та коефіцієнт пропускання на рівні принаймні 10^{-7} .

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М: Мир, 1981. 584 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 684 с.
3. Sheng-Jui Chen, Hsien-Hao Mei, Wei-Tou Ni and Jeah-Sheng Wu. Improving ellipticity detection sensitivity for the Q & A vacuum birefringence experiment // Classical and Quantum Gravity. 2004. Vol. 21. N 5. P. S377–1264.
4. Altewischer E., Genet C., M. van Exter, Woerdman J., Alkemade P. et al. Polarization tomography of metallic nanohole arrays // Optics Letters. 2005. Vol. 30. N 1. P. 90–92.

5. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. С. 370–380.
6. Ванюрихин А.И. Герчановская В.П. Оптико-электронные поляризационные устройства. К: Техника, 1984. 200 с.
7. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 155 с.
8. Kobayashi J., Asahi T., Sakurai M., Takahashi M. et al. Optical properties of superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ // Phys.Rev.B, 1996. Vol. 53. P. 11784–11795.
9. Шона Я.І. Вимірювання оптичної активності в кристалах групи KDP методами високоточної поляриметрії // Журн. фіз. досл. 2001. Т. 5. № 1. 70 с.
10. Damian I. Malus' Law for a Real Polarizer // Buletinul Stiintific al Universitatii Politehnica din Timisoara. 2004. Vol. 49(63), N 2. P. 107.
11. Gjurchinovski A. Polarization Measurements - A Numerical Approach // Physica Macedonica. 2002. Vol. 52. P. 69–76.

PRECISION MEASUREMENT OF LIGHT POLARIZATION DEGREE

O. Kutsyy, Y. Shopa

*Ivan Franko National University of Lviv, General Physic Department
Kyrylo & Mefodiy Str., 8, UA-79005 Lviv, Ukraine
e-mail: shopa@physics.wups.lviv.ua*

Generalized transmission dependences for the polarizer-analyzer system, which can be used for precision measurement of polarization degree are found. The calculation method of transmitted light minimal intensity value and the system minimum location using the least squares method approximation of experimental results is suggested. Analysis results for the polaroid and two Arens' prisms are offered.

Key words: polarizer, polarization degree, generalized Malus law.

Стаття надійшла до редколегії 30.10.2006
Прийнята до друку 26.02.2007