

УДК 535.5

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОГО ПРОПУСКАННЯ СТРУКТУРИ ФАБРІ–ПЕРО З ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЮВАЛЬНИМ КРИСТАЛОМ

О. Кушнір¹, Т. Гузь¹, О. Дзендзелюк¹, Ю. Климович¹, В. Б. Михайлик²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна.

o_s_kushnir@electronics.wups.lviv.ua

²Оксфордський університет,
Кібл Роуд, Оксфорд OX1 3RH, Великобританія.
v.mikhailik1@physics.ox.ac.uk

Досліджено оптичне пропускання резонатора Фабрі–Перо, що містить кристал з подвійним променезаломленням. За допомогою програми, написаної в рамках пакета MathCad, виконано комп'ютерне моделювання інтенсивності світла, яке пройшло крізь таку систему, зазнавши багатопроменевої інтерференції. Проаналізовано залежності оптичного пропускання резонатора від низки параметрів: азимута поляризації падаючого світла, температури кристала, довжини світлової хвилі, коефіцієнта відбивання дзеркал резонатора і подвійного заломлення.

Ключові слова: резонатор Фабрі–Перо, подвійне променезаломлення, оптичне пропускання.

Вступ. Резонатор Фабрі–Перо, робота якого ґрунтується на інтерференції світла внаслідок багаторазових відбивань від якісних дзеркал, посідає чільне місце в техніці та практиці оптичного експерименту. Його широко досліджують і використовують в оптоелектроніці: на ньому будують резонатори лазерів, спектральні прилади, інтерференційні фільтри, сенсори, бістабільні пристрої. Зазвичай у теоретичному аналізі резонатор Фабрі–Перо вважають для простоти ізотропним. Проте досить часто на практиці (див. [1–4]) його насправді наповнюють кристалічними речовинами (наприклад, рідкими кристалами), які оптично анізотропні. Навіть за умови оптичної ізотропії наповнення може виникнути порівняно слабкий ефект анізотропії дзеркал резонатора, який треба враховувати в прецизійних експериментах. Найважливіший вияв оптичної анізотропії – це подвійне лінійне променезаломлення, яке загалом повинно би впливати на поляризацію та інтенсивність пройденого або відбитого світла.

Проте наявний у літературі аналіз анізотропних резонаторів Фабрі–Перо треба визнати неповним або й непослідовним. Наприклад, у класичній праці [5] стверджено, що анізотропний резонатор має спектр резонансних максимумів, інтенсивності яких не залежать від анізотропії, а анізотропія впливає лише на центральні частоти максимумів і їхню поляризацію. Це означає, що замість єдиної системи інтерференційних максимумів,

періодичних за шкалою φ (де φ – фазовий зсув світлової хвилі за одне проходження резонатора), яку маємо для ізотропного резонатора, в анізотропному випадку матимемо дві такі системи, зсунуті по φ (зсув пропорційний до двозаломлення). Навіть з огляду на найбільш загальні міркування з’являються причини для того, щоб поставити під сумнів коректність, або принаймні універсальність, цього висновку, адже тоді можливість інтерференції звичайної та незвичайної світлових хвиль (нижче для простоти обмежимося лише випадком оптично одновісних кристалів) просто ігнорують. З іншого боку, добре відомо, що багатопротенава інтерференція значно впливає на поляризацію пройденого світла та вимірювані параметри оптичної анізотропії кристалів навіть за умови порівняно малих коефіцієнтів відбивання, притаманних безрезонаторним схемам, у яких дзеркалами слугують (порівняно якісні) поверхні кристала [6–9]. Зрештою, про можливість істотного впливу оптичної анізотропії на інтенсивність світла посередньо свідчать і результати окремих експериментів (див., наприклад, [10]). У цій роботі виконано розрахунок інтенсивності світла, яке пройшло крізь анізотропний резонатор Фабрі–Перо.

Методика досліджень. Для аналітичних розрахунків ми застосували матричне числення Джонса [11], яке, як засвідчує аналіз [12], дає достатньо точні результати в припущенні про відносну мализну двозаломлення. З цією метою використано теоретичні вирази, одержані раніше для випадку багатократних відбивань світла від граней кристала з лінійним двозаломленням і оптичною активністю, або ефектом Фарадея [13–15]. Ці вирази узагальнено так, щоби врахувати можливість досягнення високих коефіцієнтів відбивання R , яка з’являється в разі використання високоякісних зовнішніх дзеркал резонатора, а також спрощено шляхом ігнорування порівняно слабких ефектів оптичної анізотропії для циркулярно поляризованих хвиль (відповідні результати наведено в [1, 16, 17]). Деякі дані, попередньо здобуті за предметом досліджень, висвітлено в праці [18].

Оскільки одержані підсумкові теоретичні формули для інтенсивності досить громіздкі, а поведінка інтенсивності світла залежно від основних параметрів неочевидна та не завжди піддається суто аналітичному аналізу, ми виконали також моделювання за допомогою програмного пакету MathCad. Аналізували залежності інтенсивності світла I на виході резонатора від азимута поляризації падаючого світла θ (який відлічують від однієї з кристалофізичних осей), температури кристала T , довжини світлової хвилі λ , фазового зсуву φ , коефіцієнта відбивання дзеркал R , лінійного двозаломлення Δn та інших параметрів.

Параметри моделювання обрано так, щоби переважно відповідали параметрам класичних кристалів кварцу. Проте для усунення одночасної дії різних факторів на інтенсивність, яка викликає труднощі їхнього практичного розділення, введено також окремі спрощення. Наприклад, температурні зміни головних значень звичайного та незвичайного показників заломлення n_o і n_e ми вважатимемо лінійними, що дає лінійність температурної шкали та шкали φ ($\varphi = 2\pi\bar{n}d/\lambda$, де для середнього показника заломлення \bar{n}

узято $\bar{n} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}}$). Крім того, термічні коефіцієнти змін n_o і n_e ми вважатимемо однаковими, а їхніми спектральними змінами нехтуватимемо. Тоді спектраль-

ні зміни однопрохідного фазового зсуву φ виникатимуть лише через безпосередні зміни λ . У підсумку прийнято такі співвідношення для показників заломлення:

$$n_o = 1,54222 + 2 \cdot 10^{-5} T + \frac{1,5 \cdot 10^{-15}}{\lambda^2} + \frac{1,5 \cdot 10^{-29}}{\lambda^4},$$

$$n_e = 1,55094 + 2 \cdot 10^{-5} T + \frac{1,5 \cdot 10^{-15}}{\lambda^2} + \frac{1,5 \cdot 10^{-29}}{\lambda^4}. \quad (1)$$

Величину двозаломлення Δn ми вважали вільним параметром, який може змінюватися в межах від 0–0,1, а для товщини кристала d – значення, що збігається з дослідженим у праці [6] ($d = 1,512$ мм).

Результати та обговорення. Нижче опишемо лише найголовніші з одержаних нами результатів. Найсуттєвіше на оптичне пропускання впливає азимут поляризації світла θ . Відмінні від “граничних” значень ($\theta = 0^\circ, 90^\circ$) азимуту суттєво змінюють криву оптичного пропускання. Зокрема, тоді виникають додаткові (побічні) максимуми пропускання, що з’являються поблизу основних (рис. 1). Побічні максимуми ліпше помітні за умов високих коефіцієнтів відбивання R (рис. 2). Наскільки нам відомо, у літературі нема жодних вказівок на можливість появи цього явища в анізотропному резонаторі Фабрі–Перо.

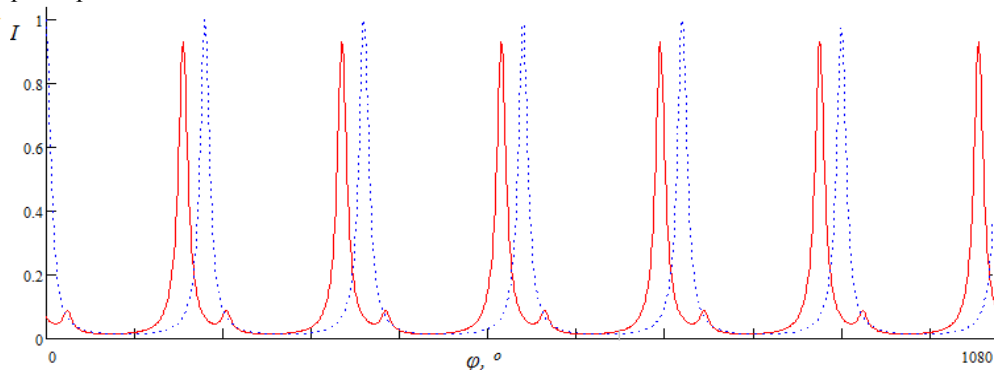


Рис. 1. Залежності оптичного пропускання резонатора Фабрі–Перо без ($\Delta n = 0$, штрихована лінія) та з анізотропією ($\Delta n = 0,1$, суцільна лінія) від фази світлової хвилі φ за умов $R = 0,8$ і $\theta = 15^\circ$.

Оскільки при $\theta = 0, 90^\circ$ додаткові максимуми не виникають навіть у разі максимального дослідженого нами коефіцієнта відбивання $R = 0,999$, ми припускаємо, що їхня поява зумовлена лише одночасним збудженням звичайної і незвичайної хвиль у резонаторі та їхньою інтерференцією. З відхиленням значення азимута поляризації від нуля маємо поступове зростання побічних максимумів, висоти яких за умови $\theta = 45^\circ$ вирівнюються з висотами основних максимумів, єдино притаманних ізотропному резонаторові, і становлять 0,5 (рис. 3).

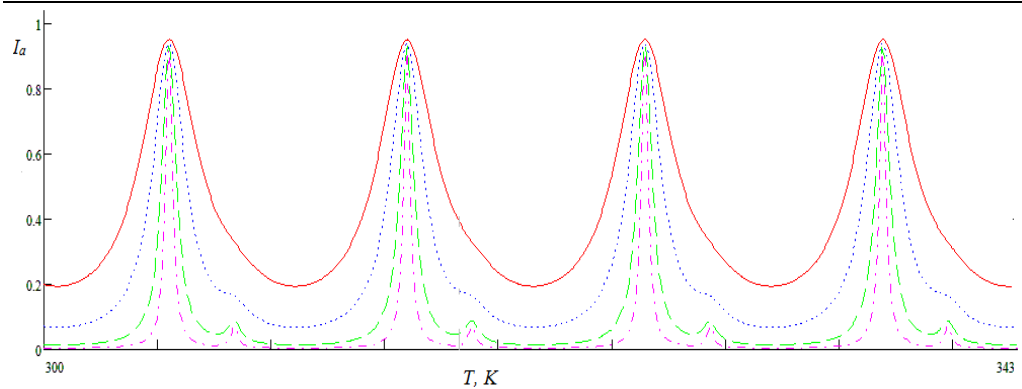


Рис. 2. Залежності оптичного пропускання анізотропного резонатора Фабрі–Перо ($\Delta n = 0,1$, $\theta = 15^\circ$, $\lambda = 633$ нм) від температури T за умови різних значень коефіцієнта відбивання: $R = 0,4$ (суцільна лінія), $0,6$ (пунктирна лінія), $0,8$ (штрихова лінія) і $0,9$ (штрих-пунктирна лінія).

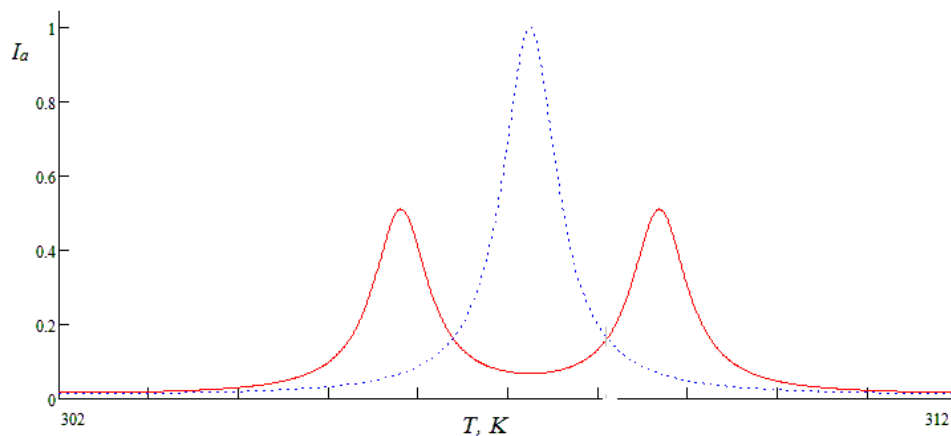


Рис. 3. Залежності оптичного пропускання резонатора Фабрі–Перо від температури T для $R = 0,8$, $\theta = 45^\circ$ і $\lambda = 633$ нм без (штрихована лінія) та з ($\Delta n = 0,1$, суцільна лінія) лінійною анізотропією.

На підставі одержаних результатів зроблено висновок про негативний вплив анізотропії на контраст інтерференції на виході резонатора: зі зростанням анізотропії висота основних максимумів уже не єдинична, як для ізотропного резонатора (див. рис. 1–3). Функція пропускання залежно від фази світлової хвилі φ змінюється періодично зі зміною лінійного двозаломлення. За умови товщини $d = 1,512$ мм і з урахуванням зроблених припущень цей період оцінено як $\Delta n_T = \lambda/d$. Звідси для довжини хвилі $\lambda = 633$ нм одержуємо $\Delta n_T \sim 4,2 \cdot 10^{-4}$, що добре збігається з даними моделювання. Отже, вплив оптичної анізотропії на пропускання резонатора можна сподіватися виявити в експери-

менті вже за досить малих значень двозаломлення. Тому в нашому наближеному теоретичному аналізі ми не перейшли межі застосовності джонсівського числення.

Для ізотропного й анізотропного випадків площі під кривими пропускання $I(\varphi)$ у межах одного порядку інтерференції однакові для тих же значень R . Це означає, що наявність анізотропії приводить лише до перерозподілу інтенсивності в межах заданого порядку інтерференції зі зменшенням висоти основного максимуму та збільшенням пропускання поза цим максимумом. Площа під кривою незмінна й за умов змін лінійного двозаломлення Δn або азимута поляризації θ .

Анізотропія наповнення резонатора Фабрі–Перо призводить до деякого зростання півширини $\varphi_{1/2}$ основного максимуму на половині його висоти, а тому до погіршення селективності резонатора, що найліпше помітно для великих R . Для точнішої кількісної оцінки селективності пропускання резонатора введемо спеціальний параметр W_0 :

$$W_0 = \frac{\int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \varphi_{1/2}} I(\varphi) d\varphi / \varphi_{1/2}}{\int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \varphi_{T/2}} I(\varphi) d\varphi / \varphi_{T/2}}, \quad (2)$$

де φ_0 – значення фази, для якого спостерігаємо деякий основний максимум; $\varphi_{T/2}$ – півперіод функції пропускання $I(\varphi)$. Аналіз засвідчив, що цей параметр зростає зі зростанням коефіцієнта відбивання R , проте зменшується за наявності анізотропії робочого матеріалу резонатора. Зазначено також асиметрію функції пропускання в околі кожного основного максимуму, яка пов'язана з тим, що побічний максимум з'являється лише з правого (або лівого) боку від цього максимуму.

Висновки. Завдяки моделюванню наближеної теоретичної функції оптичного пропускання анізотропного резонатора Фабрі–Перо доведено факт впливу лінійної оптичної анізотропії на цю функцію. Цей вплив з'являється внаслідок інтерференції звичайної та незвичайної світлових хвиль. Він полягає в зміщенні положення та зменшенні висоти основних максимумів пропускання, а також появі додаткових побічних максимумів, висоти яких вирівнюються з висотами основних максимумів за оптимальної умови $\theta = 45^\circ$, коли амплітуди звичайної та незвичайної світлових хвиль, збуджених у резонаторі, стають однаковими. Систематичне висвітлення всіх закономірностей для оптичного пропускання анізотропного резонатора буде предметом наступного дослідження.

1. *Lalov I. J.* Optically active absorptive Fabry-Perot etalon / I. J. Lalov, E. M. Georgieva // J. Opt A: Pure Appl. Opt. – 1995. – Vol. 42. – P. 713–723.
2. *Huang Yuhua.* Simulations of liquid-crystal Fabry–Perot etalons by an improved 4x4 matrix method / Yuhua Huang, Thomas X. Wu, Shin-Tson Wu // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93. – P. 2490–2495.
3. *Табарин В. А.* Оптический бистабильный по поляризации элемент на эффекте Фарадея / В. А. Табарин, С. Д. Демьянцева // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – С. 7–11.

4. Dynamical behaviour of birefringent Fabry-Perot cavities / P. Berceau, M. Fouche, R. Battesti, F. Bielsa, J. Mauchain, C. Rizzo // *Appl. Phys. B.* – 2010. – Vol. 100. – P. 803–809.
5. *Doyle W. M.* Properties of an anisotropic Fabry-Perot resonator / W. M. Doyle, M. B. White // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1965. – Vol. 55. – P. 1221–1225.
6. *Melle H.* Change of the polarization of coherent light due to oblique transmission through a plane-parallel, optically active plate / H. Melle // *Optik.* – 1986. – Vol. 72. – P. 157–164.
7. Multiple beam interference in anisotropic crystals and the consequences for the birefringence measurement / G. Bosch, I. Jahn, W. Prandl, M. Verhein // *Physica B.* – 1986. – Vol. 142. – P. 320–327.
8. *Hernandez-Rodriguez C.* Systematic errors in the high-accuracy universal polarimeter: application to determining temperature-dependent optical anisotropy of KDC and KDP crystals / C. Hernandez-Rodriguez, P. Gomez-Garrido, S. Veintemillas // *J. Appl. Cryst.* – 2000. – Vol. 33. – P. 938–946.
9. *Кушнір О. С.* Багатопроренева інтерференція і оптична активність кристалів / О. С. Кушнір, О. В. Сидор, П. О. Нек // *Наук. вісн. Ужгород. ун-ту.* – 2005. – № 17. – С. 99–102.
10. www.meadowlark.com/.../Liquid%20Crystal%20Filled%20Fabry-Perot%20Filter.pdf
11. *Jones R. C.* A new calculus for the treatment of optical systems. VII. Properties of the N-matrices / R. C. Jones // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1948. – Vol. 38. – P. 671–685.
12. On the propagation of light in incommensurately modulated dielectric crystals / O. S. Kushnir, L. O. Lokot, L. P. Lutsiv-Shumski, I. I. Polovinko, Y. I. Shopa // *Phys. Stat. Solidi (b).* – 1999. – Vol. 214. – P. 487–494.
13. *Кушнір О. С.* Прояви оптичної анізотропії кристалів у багатопрореневій інтерференції Фабрі-Перо / О. С. Кушнір // *Журн. фіз. досліджень.* – 2002. – Т. 6. – С. 354–361.
14. *Kushnir O. S.* Effect of multiple reflections of light on the optical characteristics of crystals / O. S. Kushnir // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2003. – Vol. 5. – P. 478–488.
15. *Kushnir O. S.* Multiple reflections in crystals: natural and Faraday optical activity / O. S. Kushnir // *Ukr. J. Phys. Opt.* – 2004. – Vol. 5. – P. 87–95.
16. Polarization-optical characteristics of gyrotropic dielectrics in Fabry-Perot resonator / O. S. Kushnir, O. S. Dzdzelyuk, V. A. Hrabovskyy, B. Ya. Blagitko, V. G. Rabyk // *Proceedings of Vth International Workshop “Relaxed, nonlinear and acoustic optical processes; materials – growth and optical properties” (RNAOPM’2010).* – Lutsk, Ukraine. – 2010. – P. 20–22.
17. *Кушнір О. С.* Вплив оптичної активності на функцію пропускання інтерферометра Фабрі-Перо / О. С. Кушнір, В. А. Грабовський, О. С. Дзєндзелюк // “Проблеми електроніки та інформаційні технології”: Зб. тез доп. II Всеукр. нау.-практ. конф. – Чинадієво. – 2010. – С. F4–F5.
18. *Кушнір О. С.* Особливості спектрів оптичного пропускання анізотропного резонатора Фабрі-Перо / О. С. Кушнір, О. С. Дзєндзелюк // “Проблеми електроніки та інформаційні технології”: Зб. тез доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. – Чинадієво. – 2010. – С. F6–F7.

MODELING OF OPTICAL TRANSMITTANCE OF THE FABRY-PEROT STRUCTURE WITH BIREFRINGENT CRYSTAL

O. Kushnir¹, T. Guz¹, O. Dzendzelyuk¹, Yu. Klymovych¹, V. Mikhailik²

¹ *Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine.
o_s_kushnir@electronics.wups.lviv.ua*

² *Oxford University, Keble Road, Oxford OX1 3RH, Great Britain.
v.mikhailik1@physics.ox.ac.uk*

The aim of this work is to study optical transmittance of a Fabry-Perot structure containing a crystal with a double refraction. Using a program written in the frame of MathCad software package, we have modelled the intensity of light transmitted through such a system after having undergone multi-beam interference. The analysis is performed concerned with possible dependence of the optical transmittance on a number of parameters such as polarization azimuth of the incident light, temperature of a crystal, light wavelength, reflection coefficient of mirrors, and a double refraction magnitude.

Key words: Fabry-Perot structure, double beam refraction, optical transmittance.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ СТРУКТУРЫ ФАБРИ-ПЕРО С ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИМ КРИСТАЛЛОМ

О. Кушнір¹, Т. Гузь¹, О. Дзендзелюк¹, Ю. Климович¹, В. Михайлик²

¹ *Львовский национальный университет имени Ивана Франко,
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017 Львов, Украина.
o_s_kushnir@electronics.wups.lviv.ua*

² *Оксфордский университет,
Кибл Роуд, Оксфорд OX1 3RH, Великобритания.
v.mikhailik1@physics.ox.ac.uk*

Исследовано оптическое пропускание резонатора Фабри-Перо, который содержит кристалл, обладающий двойным лучепреломлением. С помощью программы, написанной в рамках пакета MathCad, проведено компьютерное моделирование интенсивности света, прошедшего через данную систему, претерпев многолучевую интерференцию. Проанализированы зависимости оптического пропускания резонатора от ряда параметров: азимута поляризации падающего света, температуры кристалла, длины световой волны, коэффициента отражения зеркал резонатора и двойного лучепреломления.

Ключевые слова: резонатор Фабри-Перо, двойное лучепреломление, оптическое пропускание.

Стаття надійшла до редколегії 09.06.2011
Прийнята до друку 29.06.2011