УДК 535.421:534.2

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/1.15>

В.П.Данько, к.ф.-м.н.
А.В.Коваленко, к.ф.-м.н., доц.
Р.О.Коломієць, студент

Джерело світла зі змінною довжиною хвилі на основі акустооптичного дефлектора

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна, 01601, місто Київ, вул. Володимирська, 64/13
e-mail: vdan1962@gmail.com

V.P.Danko, PhD
A.V.Kovalenko, PhD, Associate Professor
R.O.Kolomiiets, student

Light source with variable wavelength based on acousto-optical deflector

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska st., Kyiv, Ukraine, 01601
e-mail: vdan1962@gmail.com

Показано можливість створення монохроматичного джерела світла зі змінною довжиною хвилі та шириною спектра близько 5 нм з використанням акустооптичного дефлектора як елемента, що здійснює перелаштування довжини хвилі. Наведено порівняння експериментальних даних з розрахунковими, показано хороше їх узгодження.

Ключові слова: монохроматичне джерело світла, акустооптичний дефлектор, акустооптичний фільтр, монохроматор.

The proposed work analyzes the design features of the acousto-optical deflector and filter on paratellurite. It is shown that under certain conditions the acousto-optical deflector can be used as an acousto-optical filter (as an element that performs spectral filtering of the incident light beam). The fundamental possibility of creating a monochromatic light source with a variable wavelength and a spectrum width of about 5 nm using an acousto-optical deflector as an element that adjusts the original wavelength is shown experimentally. As a broadband light source in this system, a semiconductor laser operating in subthreshold mode was used. The dependence of the output wavelength on the acoustic frequency is obtained. The comparison of experimental data with the calculated ones is given, it is shown that they have small differences.

Key Words: monochromatic light source, acousto-optical deflector, acousto-optical filter, monochromator.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Савенков С.М.

В оптичних дослідженнях часто виникає необхідність використання монохроматичного джерела світла, довжину хвилі якого можна змінювати в деяких межах. Найпростіше використати для цієї мети лазер зі змінною довжиною хвилі, як це зроблено, наприклад, в [1]. Проте часто може бути необхідним з тих чи інших причин для отримання світлового пучка з вузьким спектром використовувати фільтрацію світла від джерела зі значною спектральною шириною, яким є, наприклад світлодіод. У цьому випадку доцільно звернутися до акустооптики.

Взаємодія світла і ультразвуку застосовується в науці і техніці, зокрема, в оптиці, акустиці, оптоелектроніці і оптичній обробці інформації. Акустооптичні модулятори, дефлектори (АОД) і фільтри (АОФ) характеризуються ши-

рокими функціональними можливостями, надійністю, простотою електронного керування та малим енергоспоживанням, тому акустооптичні пристрої успішно використовуються в оптиці і спектроскопії, лазерній техніці та оптичному зв'язку, медицині, екології, астрономії і багатьох інших областях. У зв'язку з тим, що найбільшого поширення набули акустооптичні дефлектори, ми покажемо в цій роботі можливість використання АОД на кристалі парателуриту (TeO_2) як елемента, що здійснює перелаштування довжини хвилі монохроматичного джерела. Така можливість впливає з аналізу геометрії АОД та АОФ.

Типова геометрія АОД та АОФ на кристалі парателуриту вказана на рис. 1a та 1b відповідно [2, 3]. З їх порівняння можна зробити висновок що головними відмінностями дефлек-

ктора та фільтра є кут зрізу α , розмір п'єзоперетворювача (більший для фільтра та менший

для дефлектора) та кут падіння світлової хвилі.

Рис. 1: Типова геометрія акустооптичного дефлектора (а) та фільтра (б) на парателуриті [2, 3]

Отже, при відповідному орієнтуванні відносно падаючого пучка АОД може бути використаний в якості АОФ з дещо гіршою ефективністю та ширшою смугою пропускання. При цьому також збільшаться втрати на відбиття у зв'язку з неортогональним падінням світла на вхідну та вихідну площини кристалу. Центральна довжина хвилі АОФ визначається виразом [4]:

$$\lambda_t \approx (v/f) \left(n_i \sin \theta_i - \sqrt{n_0^2 - n_i^2 \cos^2 \theta_i} \right), \quad (1)$$

смугою пропускання – виразом [5]:

$$\Delta \lambda \leq \frac{0.8 \lambda_t}{l_0 \cos \psi (n_e - n_o) \sin^2 (\theta_i + \alpha)}, \quad (2)$$

де f – акустична частота; v – швидкість ультразвукової хвилі в площині (110); $n_0 = 2.26$ і $n_e = 2.412$ – показники заломлення для звичайного і незвичайного променів; n_i – ефективний показник заломлення для падаючої хвилі; θ_i – кут падіння пучка; α – кут зрізу кристала; l_0 – ширина п'єзоперетворювача; ψ – кут зносу акустичної енергії.

Швидкість ультразвукової хвилі визначається виразом [4]:

$$v = \sqrt{\left(\frac{c_{11} - c_{12}}{2} \cos^2 \alpha + c_{44} \sin^2 \alpha \right) / \rho}, \quad (3)$$

$\rho = 6 \text{ г/см}^3$ – питома вага парателуриту; $c_{11} = 5.59 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$, $c_{12} = 5.13 \times 10^{11}$

дин/см², $c_{44} = 2.67 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$ – константи пружності парателуриту.

Ефективний показник заломлення дорівнює [4]

$$n_i = n_0 n_e [n_e^2 \cos (\theta_i + \alpha) + n_0^2 \sin^2 (\theta_i + \alpha)]^{-1/2}, \quad (4)$$

Оптична схема експериментальної установки показана на рис. 2. Головним елементом є АОД 4 на парателуриті з параметрами кристала, близькими до типових (рис. 1а), та розмірами п'єзоперетворювача $2,0 \times 12,0 \text{ мм}$, зорієнтований так, щоб падаючий пучок був спрямований під кутом близько 20° до осі кристала. Це відповідало куту падіння пучка на вхідну грань АОД близько 50° . При такому куті падіння АОД працює як регульований фільтр, проте розмір падаючого пучка не може перевищувати кількох міліметрів, що пов'язано з геометричними обмеженнями (пучок входить в АОД та виходить з нього поряд з ребром кристала). На п'єзоперетворювач подається керуючий сигнал з ВЧ генератора 1 АFG-3101. В якості джерела світла 3 було використано червоний напівпровідниковий лазер ($\lambda = 655 \text{ нм}$ $P = 35 \text{ мВт}$), що працює зі зниженим струмом накачки в режимі світлодіода. При цьому діаметр пучка та його розбіжність залишаються малими, оскільки це забезпечується конструкцією лазера. Джерело живлення 4 служить для живлення лазера постійним струмом.

Рис. 2: Схема експериментальної установки

Для спостереження спектру продифрагованого пучка та визначення його довжини хвилі було використано монохроматор УМ-2 (елементи 5 – 10) на основі призми Аббе. Спектри можна було спостерігати за допомогою окуляра 11. Для реєстрації отриманих зображень замість окуляра встановлювалась камера Sanyo VCB-3385P з об'єктивом Гелиос-44-2, під'єднана до комп'ютера. Зображення з камери захоплювались фрейм-грабером на основі IC SAA7135. Калібрування монохроматора здійснювалось за допомогою напівпровідникового лазера ($\lambda = 650$ нм), DPSS лазера ($\lambda = 532$ нм, в спектрі присутні також лінії $\lambda = 808$ нм та $\lambda = 1.064$ мкм) та ртутної лампи.

Пороговий струм накачки для застосованого напівпровідникового лазера становив 40 мА. Щоб уникнути неконтрольованого переходу лазера в режим генерації, ми працювали при струмі 38 мА. Спектр випромінювання лазера в такому режимі показано на рис. 3.

Максимальна інтенсивність продифрагованого світла в режимі генерації досягалась на частоті 82,1 МГц. Зразки відфільтрованого спектру н/п лазера в режимі генерації та в допороговому режимі показано на рис. 4. Ширина

спектру у випадку (б) складає $\Delta\lambda \approx 5$ нм.

Рис. 3: Спектр випромінювання лазера в допороговому режимі

Рис. 4: Зразки відфільтрованого спектру н/п лазера в режимі генерації (а) та в допороговому режимі (б)

Була знята залежність вихідної довжини хвилі від частоти, що подавалась на дефлектор.

Для порівняння було теоретично розраховано залежність вихідної довжини хвилі від акустичної частоти за формулами (1) – (4) при

типовому для АОД значенні кута зрізу кристала ($\alpha = 6^\circ$) для кута падіння пучка $\theta_i = 19.9^\circ$.

Отримані результати показано на рис. 5. Видно, що отримані розрахункові та експериментальні залежності центральної довжини хвилі отриманого фільтра досить близькі.

Рис. 5: Розрахункова та експериментальна залежності вихідної довжини хвилі від акустичної частоти

Розрахункова смуга пропускання фільтра $\Delta\lambda_c \approx 4.7$ нм теж близька до отриманої в експерименті.

Таким чином, ми показали можливість створення джерела світла з перелаштуванням довжини хвилі на основі акустооптичного дефлектора на парателуриті, розміщеного в нестандартній геометрії. Проте зібраний макет ще не може бути використано як джерело світла в оптичному експерименті, оскільки потужність застосованого н/п лазера в режимі світлодіода дуже низька ($P < 8$ мВт).

Робота виконана за сприяння Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках НДР № 19БФ052-01.

Список використаних джерел

1. Andreoli D. Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix / D. Andreoli, [et al.] // Scientific Reports. — 2015. — Vol. 5. — Art. 510347.
2. Магдич Л.Н. Акустооптические устройства и их применение / Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. — М: Сов. Радио, 1978. — 112 с.
3. Балакший В.И. Физические основы акустооптики / Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. — М.: Радио и связь, 1985. — 278 с.
4. Зубринов И.И. Широкополосный акустооптический фильтр / И.И. Зубринов, В.К. Сапожников, Д.В. Шелопут // Журнал технической физики. — 1997. — Т. 67, № 6. — С. 50 – 53.
5. Волошинов В.Б. Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения / В.Б. Волошинов, В.Я. Молчанов, Т.М.Бабкина // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, № 9. — С. 93 – 98.

References

1. ANDREOLI, D. et al. (2015) Deterministic control of broadband light through a multiply scattering medium via the multispectral transmission matrix. In *Scientific Reports*, 5., 510347.
2. MAGDICH, L.N. & MOLCHANOV, V.Ya. (1978) *Akustoopticheskie ustroystva i ih primeneniye*, M: Sov. Radio, 112 p.
3. BALAKSHIJ, V.I., PARYGIN, V.N. and CHIRKOV, L.E. (1985) *Fizicheskie osnovy akustooptiki*, M: Radio i Sviaz, 112 p.
4. ZUBRINOV, I.I., SAPOZHNIKOV, V.K. and SHELOPUT, D.V. (1997) Shirokopolosnyj akustoopticheskij filtr. In *Zhurnal tehnikheskoj fiziki*, 67(6), 50-53.
5. VOLOSHYNOV, V.B., MOLCHANOV, V.Ya. and BABKINA, T.M. (2000) Akustoopticheskij filtr nepolarizovannogo elektromagnitnogo izluchenija. In *Zhurnal tehnikheskoj fiziki*, 70(9), 93-98.

Надійшла до редколегії 05.02.2021