

*Вінницький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних систем управління та автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки*

Метод і засіб поляриметричного аналізу оптично активних рідин

*Матеріали до захисту МКР за спеціальністю
152 – « Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»,
спеціалізація «Лазерна техніка та оптоінформатика»*

Виконав: студент гр. ЛТО-17м Сауляк О.С.

Керівник: доцент, к.т.н. Тужанський С.Є.

ВІННИЦЯ – 2019

Актуальність теми

Стрімкий прогрес засобів вимірювання параметрів, які характеризують структурні зміни анізотропних речовин, зумовлений, значною мірою, розвитком автоматизованих засобів вимірювання поляризаційних параметрів середовищ, які використовують зондування лазерним пучком.

Одним із перспективних напрямків розвитку засобів вимірювання і контролю оптично активних рідин є розробка систем Стокс- поляриметрії, які забезпечують високі показники чутливості й точності вимірювань.

Разом з тим більшість пристроїв лазерної поляриметрії є відносно інерційними та не забезпечують повну оперативність вимірювань при вивченні в динамічних змін поляризаційних характеристик зразків (кінетика біохімічних реакцій, швидкісні структурні зміни у речовині та ін.).

Таким чином, розробка і удосконалення методів і засобів лазерної поляриметрії анізотропних рідин на базі сучасних оптико-електронних технологій є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність процесу виявлення структурних змін об'єктів при аналізі поляризаційних характеристик.

Мета роботи. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення швидкодії процесу вимірювань поляризаційних параметрів у оптично анізотропних рідинах засобами лазерної поляриметрії для подальшого динамічного аналізу відповідних структурних та інших змін.

Основні завдання :

- ❑ провести порівняльний аналіз сучасних методів і засобів оптичної поляриметрії анізотропних середовищ, а також активних перетворювачів поляризації, зробити класифікацію поляризаційних вимірювальних приладів;
- ❑ удосконалити метод вимірювання та розробити схему двохвильового лазерного поляриметра для динамічного аналізу поляризаційних характеристик оптично анізотропних рідин та його окремих вузлів;
- ❑ виконати розрахунок параметрів та змоделювати роботу модулятора поляризації та фотометричного блоку поляриметра;
- ❑ спроектувати конструкцію і проаналізувати роботу універсального швидкодіючого лазерного поляриметра;
- ❑ розробити схеми основних функціональних вузлів пристрою на основі сучасної елементної бази та проаналізувати їх роботу.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання поляризаційних характеристик анізотропних рідин.

Предмет дослідження – методи і засоби швидкодіючої лазерної поляриметрії анізотропних рідин.

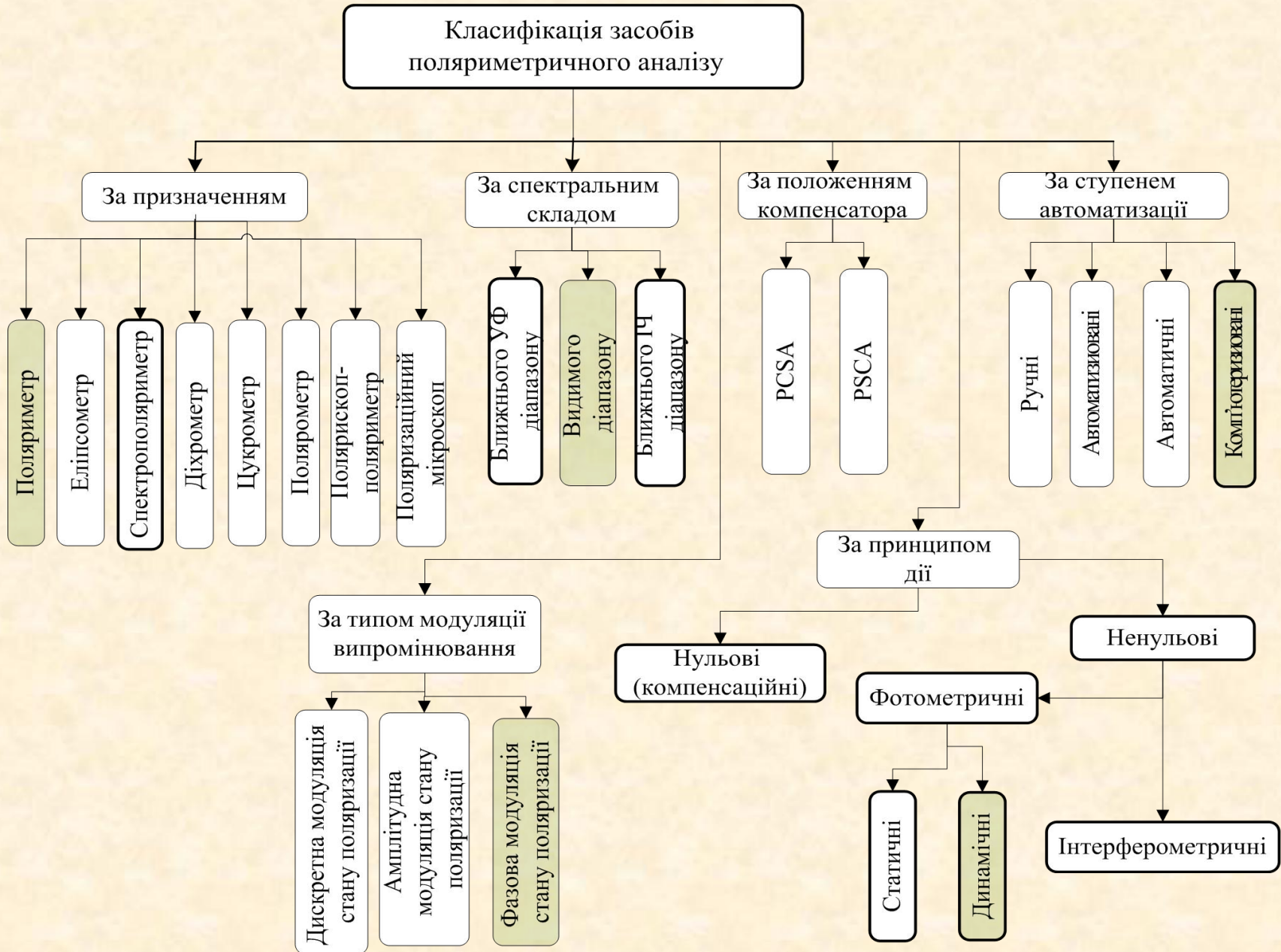
Методи дослідження: Електромагнітна хвильова теорія; матрична оптика; поляризаційна оптика; основи квантової електроніки і лазерної техніки; теорія оптичних вимірювань; основи електроніки; комп'ютерне моделювання для аналізу характеристик модулятора.

Наукова новизна. Удосконалено метод лазерної поляриметрії анізотропних рідин для схеми із подвійним електрооптичним ефектом, який базується на динамічному визначенні параметрів лінійної фазової анізотропії зразків, що їх отримують при відновленні з параметрів Стокса на основі оптимізованої характеристичної матриці інтенсивностей. Це дозволило підвищити швидкодію процесу вимірювання поляризаційних параметрів, а також розширити функціональні можливості методу для динамічного аналізу структурних та інших змін у анізотропних речовинах.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних положень:

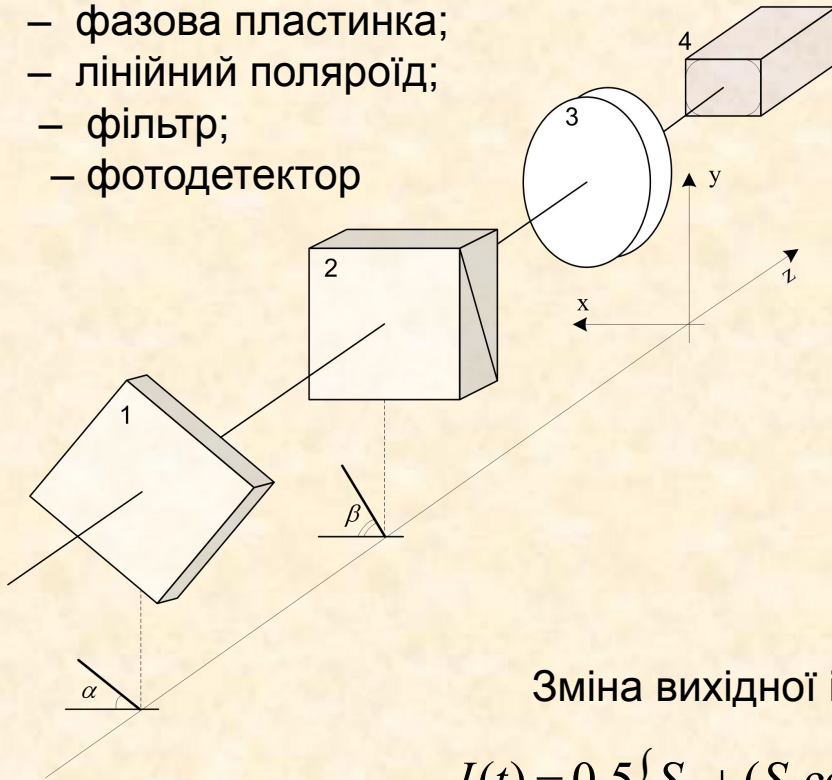
- Розроблено структурну функціональну схему швидкодіючого засобу лазерного поляриметричного аналізу та електричні схеми його основних функціональних вузлів, що враховують особливості динамічного процесу взаємодії поляризованого випромінювання із зразком та дозволяють оптимізувати процес вимірювання параметрів анізотропії;
- Розраховано характеристики електрооптичного модулятора світла на кристалах DKDP для перетворювача поляризації лазерного поляриметра, що дозволило удосконалити схему поляриметра для вимірювань поляризаційних характеристик в динамічному режимі аналізу структурних змін зразка.

Класифікація засобів поляриметричного аналізу речовин



Типова оптична схема приймального каналу Стокс-поляриметра

- 1 – фазова пластинка;
- 2 – лінійний поляроїд;
- 3 – фільтр;
- 4 – фотодетектор



Вектор Стокса (визначення)

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ I_H - I_V \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix},$$

Вектор Стокса вихідного випромінювання

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}$$

Зміна вихідної інтенсивності світла

$$I(t) = 0,5 \{ S_0 + (S_1 \cos^2 2\omega t + \sin^2 2\omega t \cdot \cos \delta) + \\ + 0,5 S_2 \sin 4\omega t (1 - \cos \delta) + S_3 \sin 2\omega t \cdot \sin \delta \}.$$

де $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$ – параметр лінійної фазової анізотропії (фазовий зсув між звичайним та незвичайним променями, $\delta \in [0; \pi]$); d – товщина зразка.

Акустооптичні модулятори для перетворення стану поляризації світла

Матеріал	Оптичний діапазон, мкм	Показник заломлення	Швидкість звукової хвилі, км/с	Добротність, $10^{-15} \text{ м}^2/\text{W}$
Халькогенідне скло	1.0 - 2.2	2.7	2.52	164
Флінт SF-6	0.45-2	1.8	3.51	8
Кварцеве скло	0.2-4.5	1.46	5.96	1.56
Фосфіт галію	0.59-10	3.3	6.3	44
Германій	2-12	4.0	5.5	180
Фосфат індію	1-1.6	3.3	5.1	80
Ніобат літію	0.6-4.5	2.2	6.6	15

Марка модулятора	<i>Brimrose TEM-85-10</i>	<i>AA optoelectronic MT80-A1.5-VIS</i>
Робочі довжини хвиль	380-1600 нм	450-700 нм
Час перемикання	55 нс	50 нс
Діаметр активної апертури	1 мм	1.5x2 мм
Ширина смуги модуляції	10 МГц	9 МГц
Ефективність	80%	85%

Електрооптичні модулятори для перетворення стану поляризації світла

Основні типи кристалів для ЕОМ:

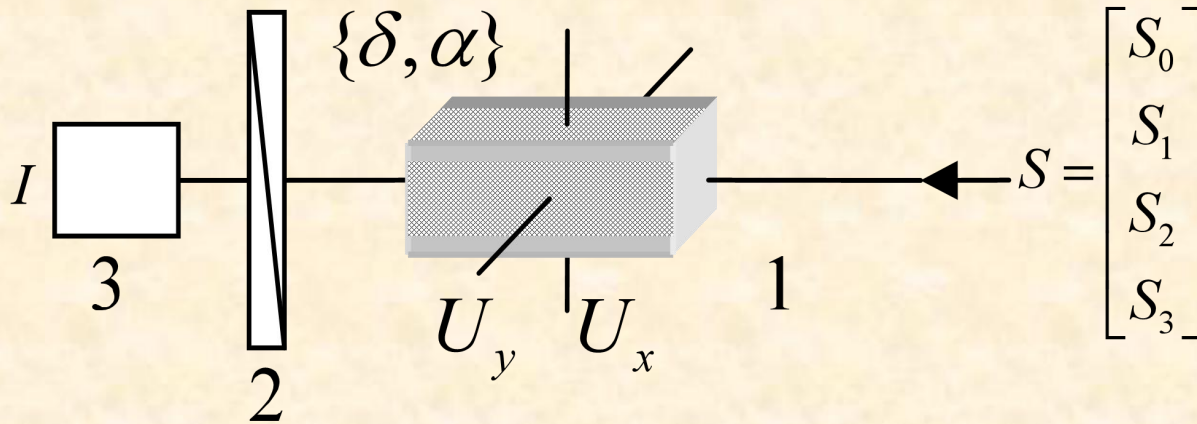
- дідейтерофосфат калію KD_2PO_4 ($KD^*P = DKDP$),
- титан-фосфаткалію $KTiOPO_4$ (KTP),
- бета-борат барію BaB_2O_4 (BBO),
- **ніобат літію ($LiNbO_3$)**,
- танталат літію ($LiTaO_3$),
- дігідрогенат фосфату амонію ($NH_4H_2PO_4$).

Марка модулятора	<i>ThorLabs EO Amplitude Modulator</i>	<i>Newport 4102NF (4104NF)</i>	<i>EKSMA OPTICS PCB3S</i>	<i>InradOptics PKC 21 (PKC24)</i>
Матеріал кристалу	LiNbO ₃ +MgO	LiNbO ₃	BBO	KD*P
Робочі довжини хвиль	600-900 нм	500-900 нм	200-2000 нм	250-1320 нм
Діаметр апертури	2 мм	2 мм	2,5 мм	9,5мм-25мм
Напівхвильова напруга	205 В при 633 нм	160 В при 532 нм	2,5кВ при 532 нм	3,3 кВ при 1064нм
Вхідний імпеданс	14 пФ	10 пФ	4 пФ	8-17пФ

Порівняльний аналіз модуляторів стану поляризації світла

Технологія модуляції	Вид перетворювача	Швидкодія	Втрати, дБ	Особливості застосування
Оптико-механічна	Універсальний	~50 мкс	1	Поляризатор (аналізатор), що механічно обертається, зменшує точність, швидкодію і надійність системи
Електро-оптична	Універсальний	10 нс-50пс	2-3	Велике поглинання в УФ-діапазоні, значні напруги керування, необхідність колімації пучка, мала кутова апертура (1°...2°)
Магніто-оптична	Кругова фазова анізотропія	0,1мкс*	1-2	Низьке значення сталої Верде у видимому діапазоні зменшує діапазон змін площин поляризації, швидкодію
Акусто-оптична	Лінійна фазова анізотропія	0,01мкс	1-2	Широкий спектральний діапазон, велика кутова апертура, висока добротність; залишкове подвійне променезаломлення не дозволяє розрізнити лінійну і кругову поляризації
Рідко-кристалічна	Лінійна фазова анізотропія	~10 мкс	2-3	Інерційність, низьке енергоспоживання, температурний контроль

Методика і схема вимірювань



Стокс - поляриметр із елементом лінійної фазової анізотропії на електрооптичному модуляторі

Матричне рівняння

$$S' = M_{LP} \cdot M_{PhLn} \cdot S$$

Вихідна інтенсивність випромінювання

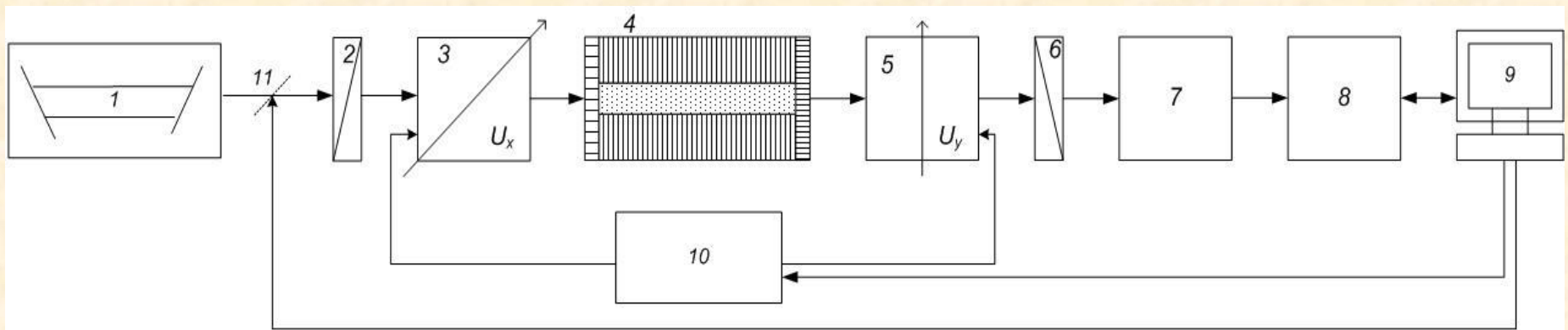
$$I(\delta, \alpha, S_0, S_1, S_2, S_3) = S_0 + S_1(\cos^2(2\alpha) + \sin^2(2\alpha)\cos(\delta)) + \\ + S_2 \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) - S_3 \sin(2\alpha)\sin(\delta).$$

$\alpha = 0.5 \arctg\left(\frac{U_x}{U_y}\right)$ - величина лінійної фазової анізотропії

$\delta = \frac{2\pi n_0^3 r \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{\lambda d} l$ - орієнтація швидкої осі лінійної фазової анізотропії

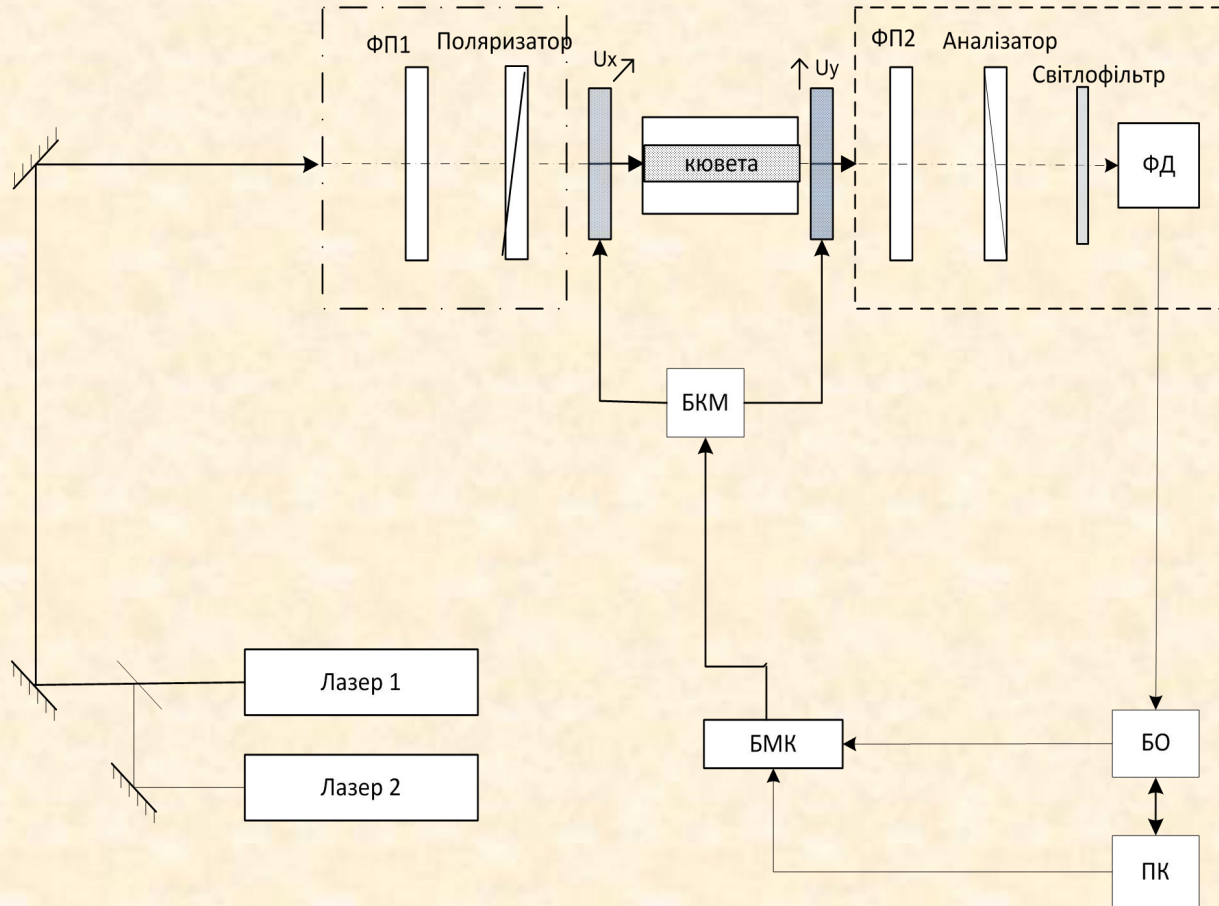
n_0 – коефіцієнт заломлення для звичайної хвилі; r – електрооптичний коефіцієнт; λ – довжина хвилі у вакуумі; l – довжина кристалу; d – товщина кристалу

Функціональна схема базового каналу поляриметричного аналізу



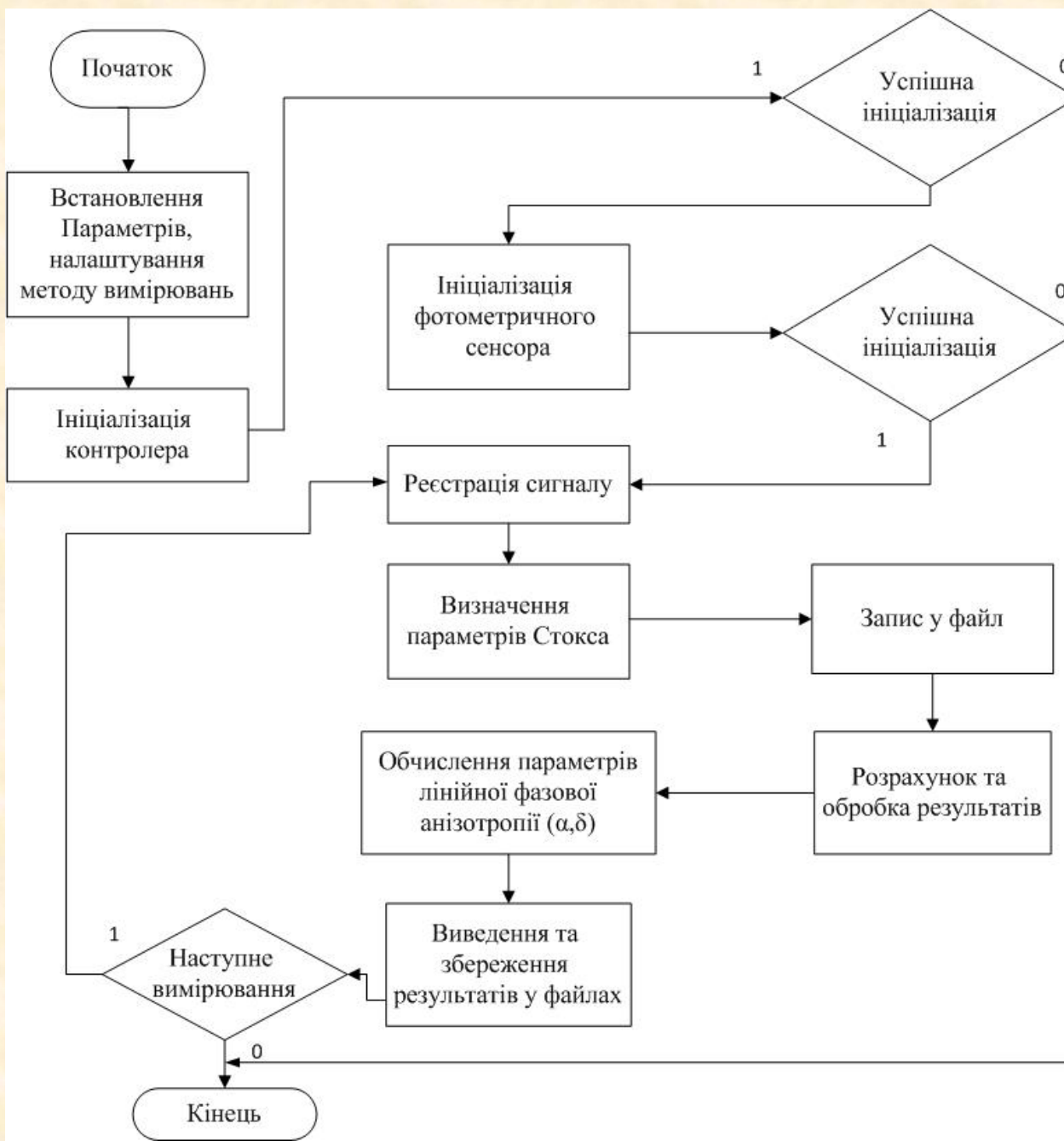
- 1 – He-Ne Лазер
- 2 - Поляризатор
- 3 – Електрооптичний модулятор світла (координата x)
- 4 – Кювета-капіляр
- 5 – Електрооптичний модулятор світла (координата y)
- 6 – Аналізатор
- 7 – Діодний фотоелектричний перетворювач
- 8 – Блок реєстрації та обробки сигналів
- 9 – Персональний комп'ютер
- 10 - Мікроконтролерний блок керування електрооптичним модулятором
- 11 - Електронний затвор

Узагальнена схема двохвильового засобу поляриметричного аналізу



ФП1, ФП2 – фазові пластини $\lambda/4$, ФД – фотодетектор, БМК – мікроконтролерний блок, БКМ – блок керування модулятором, БО – блок реєстрації та обробки сигналів з АЦП, ПК – персональний комп'ютер

Узагальнений алгоритм роботи пристрою



Розрахунок параметрів базового He-Ne лазера

Параметри He-Ne лазера:

$$l=50 \text{ см}, \lambda=0,6328 \text{ мкм}$$

Кут розбіжності:

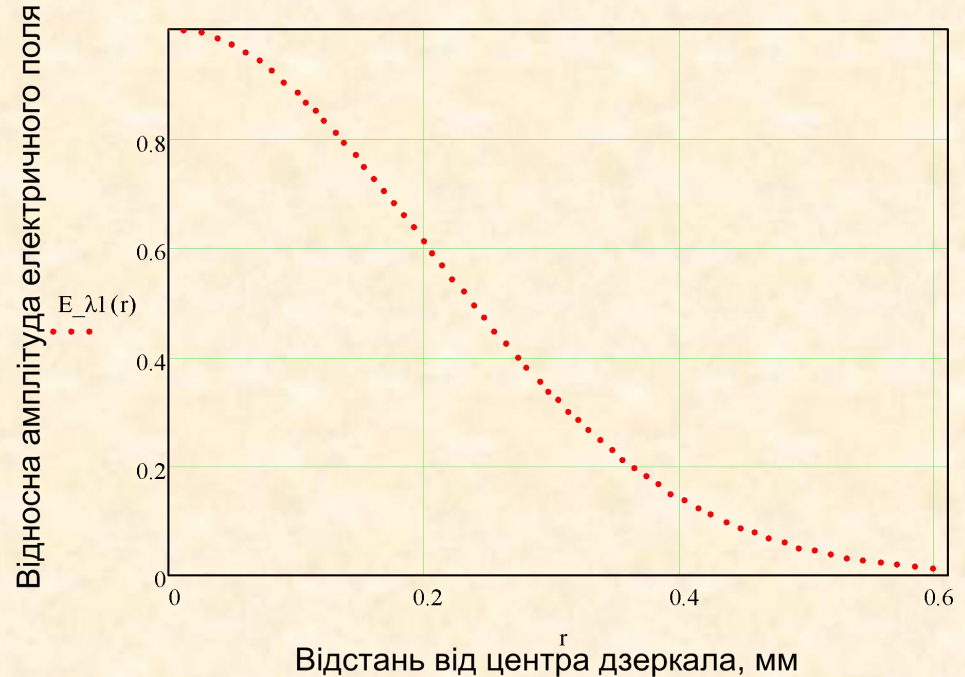
$$\omega_d \approx 0,5 \cdot 1,22 \frac{\lambda}{D} \cong 7,72 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$$

Резонансний коефіцієнт підсилення

$$G_o = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda_o^2}{\Delta \nu_D} \frac{A_{21}}{4\pi} \Delta N_{21} = 0,0299 (\approx 3\%)$$

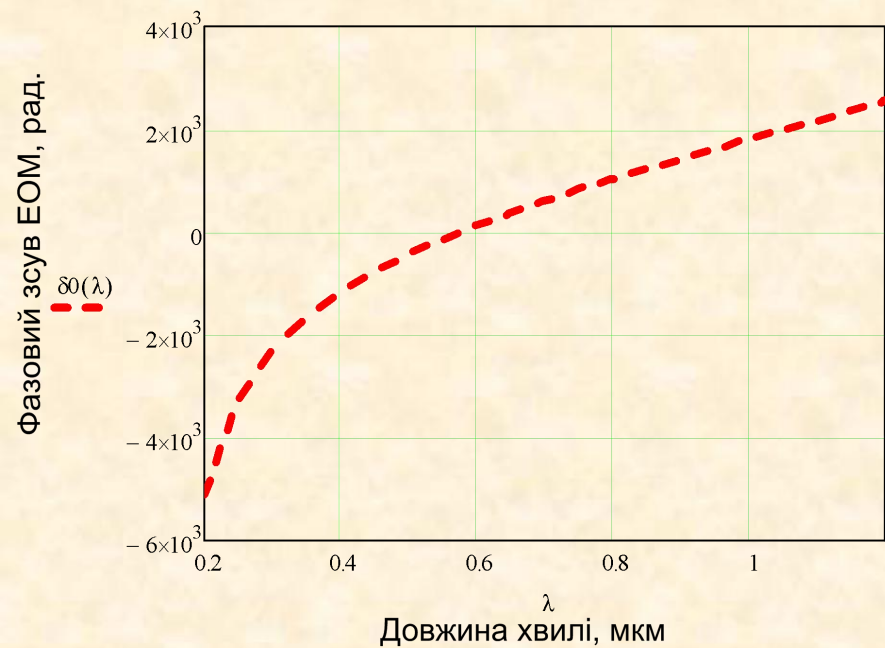
Вихідна потужність лазера

$$P_{вих} = B \left(\frac{G_o}{\alpha_w + \tau_\lambda} - 1 \right) \tau_\lambda = 48,4 \text{ мВт}$$



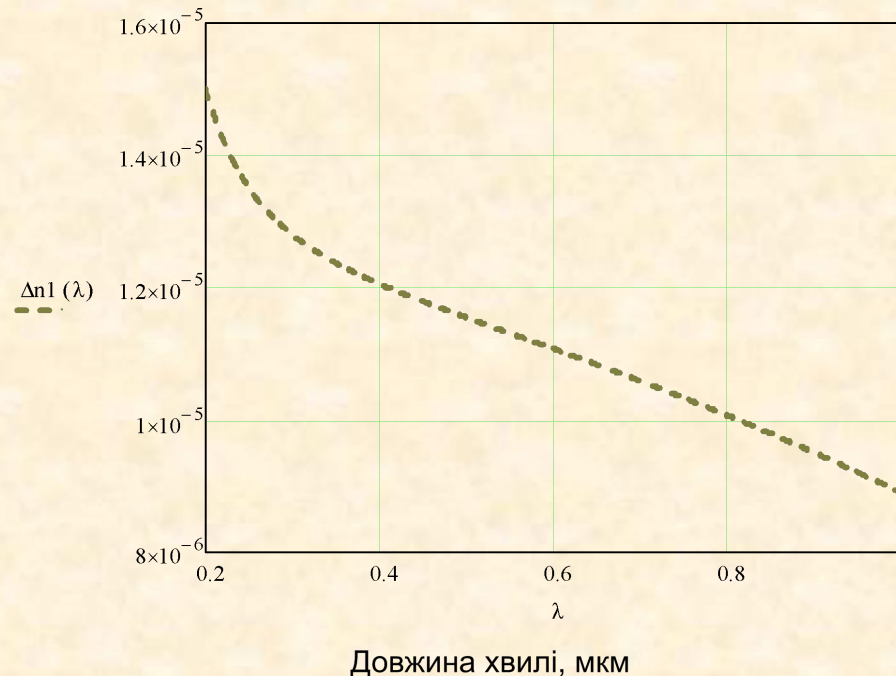
Розрахунок і моделювання параметрів електрооптичного модулятора

Кристал KD_2PO_4



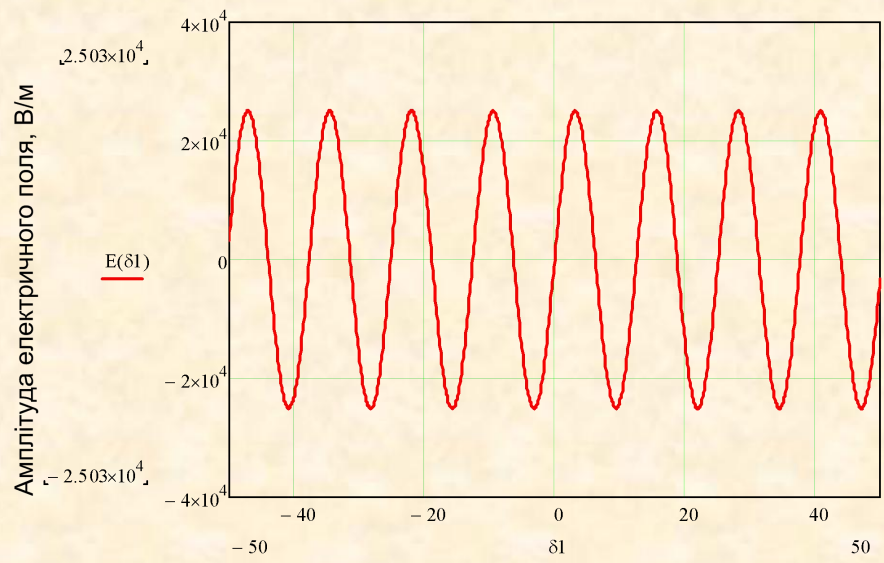
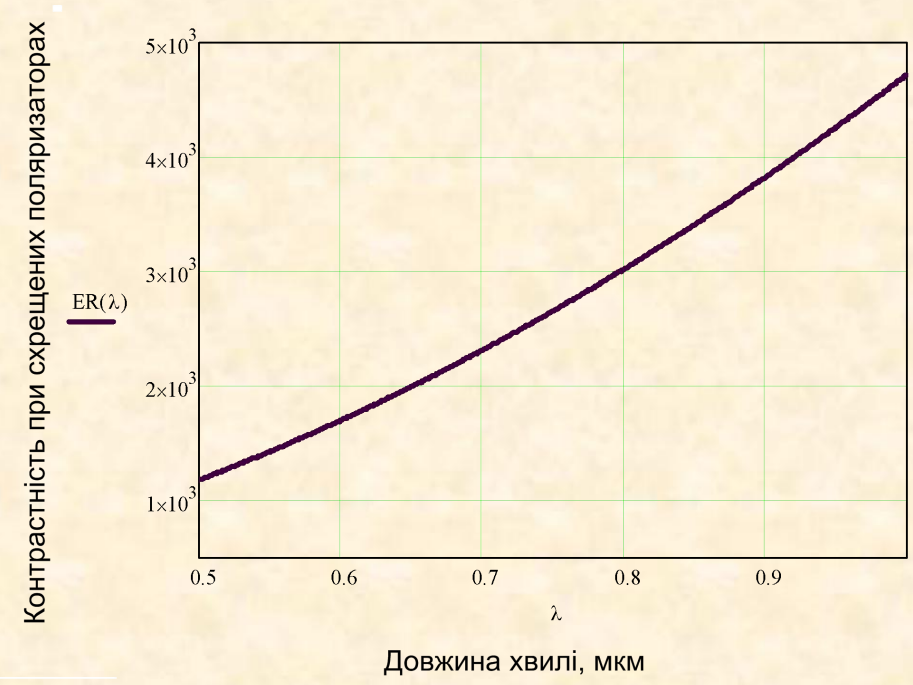
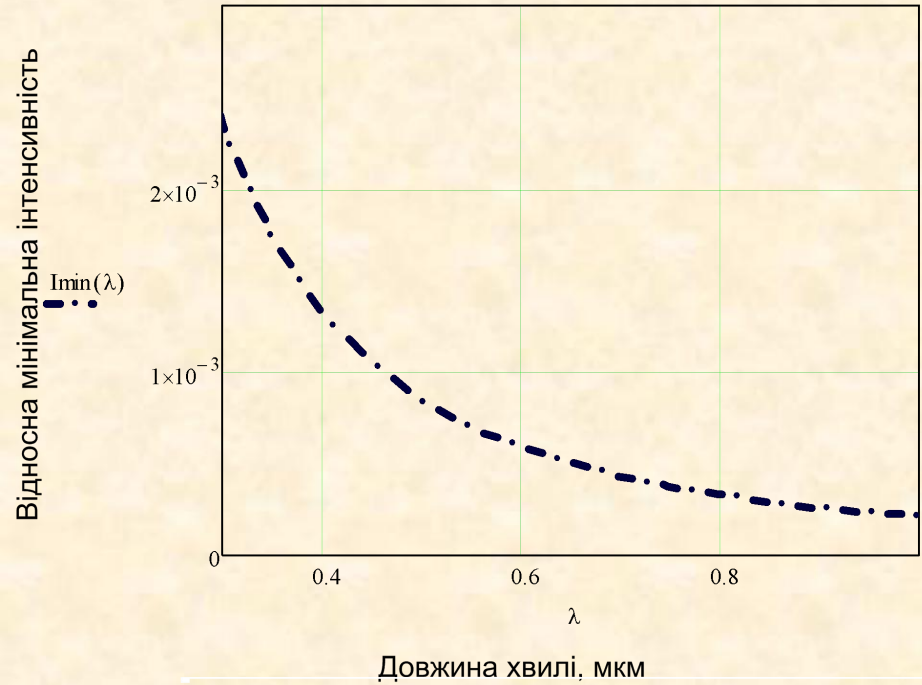
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_x - n'_y) d = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} n_0^3 U$$

Наведене двопронезаломлення Δn



$$\Delta n(\lambda) = \frac{n_0^3(\lambda) r_{63} U_{\pi}}{d}$$

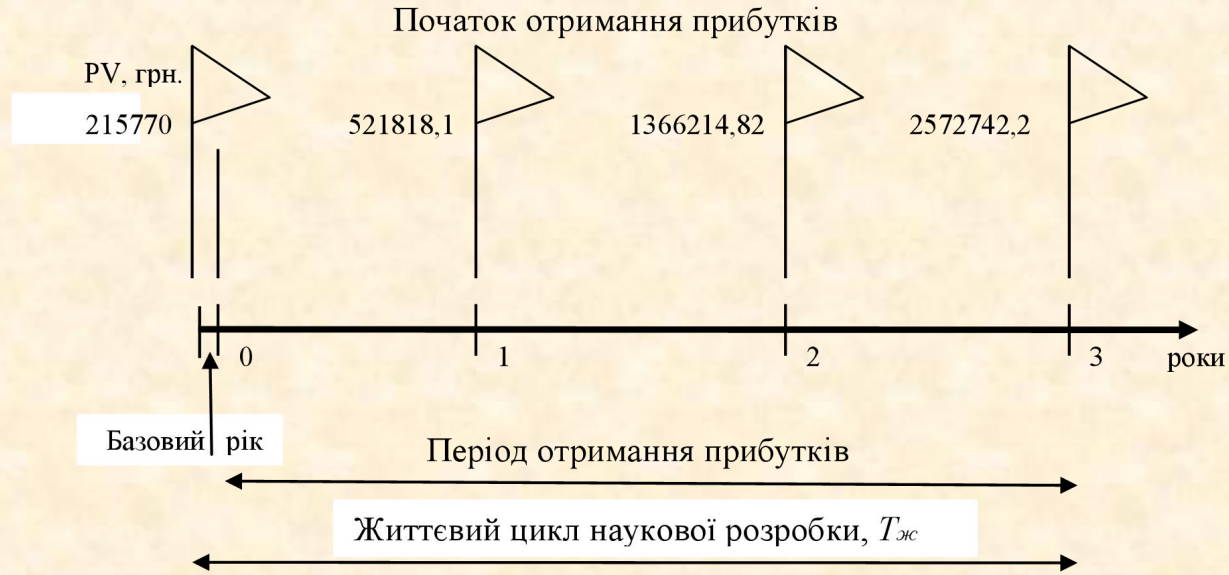
Розрахунок і моделювання параметрів електрооптичного модулятора



$$M := \frac{2}{\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot 10 \cdot n_0 \cdot n_0 \cdot U}{2 \times 0.6328 \cdot d}\right)\right)} = 2001 \times 10^3$$

$$I_{\min} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3}{2\lambda} E\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3 U}{2\lambda d}\right)$$

Економічні розрахунки



Ефективність вкладених в розробку інвестицій $E_e = 1,745$

Термін окупності розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{1,745} = 0,57 \text{ року} = 208 \text{ днів}$$

Висновки

- Проведено порівняльний аналіз методів і оптичних схем для визначення анізотропних властивостей речовин з урахуванням особливостей різних типів модуляторів поляризації випромінювання.
- Запропоновано методику і архітектуру лазерного автоматизованого поляриметра, які можуть бути застосовані для швидкісного високочутливого аналізу динаміки структурних змін у анізотропних рідинах. Однією з особливостей є використання кювети-капіляра (дозволяє мінімізувати об'єм досліджуваної речовини) та електрооптичного перетворювача, що збільшує швидкість та чутливість вимірювань.
- Виконано моделювання характеристик і розрахунок основних вузлів і компонентів поляриметра. Так, визначено енергетичні (вихідна потужність ~ 48 мВт) і спектральні (ширина лінії ~ 150 МГц) характеристики лазерного випромінювача. Розраховані характеристики наведеного двопроменезаломлення у кристалі електрооптичного модулятора, його контрастність і зміну інтенсивності, які дозволили оптимізувати структуру з урахуванням робочої довжини хвилі лазера. Розраховані параметри фотометричного сенсора свідчать про високу чутливість ($0,41$ А/Вт) та швидкодію засобу (~ 5 нс)
- Розроблено електричні схеми блоку живлення лазера і керування електрооптичного перетворювача, схему фотоприймального блоку.
- Виконано економічну частину розрахунків.

Апробація результатів

Окремі положення роботи й отримані результати магістерської роботи обговорювались на:

- 1) Міжнародній науково-технічній конференції «Оптоелектронні інформаційні технології ФОТОНІКА-ОДС-2018» (м.Вінниця, 2018)
- 2) XLVII-й науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ (Факультет комп'ютерних систем і автоматики, секція лазерної та оптоелектронної техніки), (Вінниця, 2018)

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!