



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



МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

УНІВЕРСАЛЬНИЙ ШВИДКОДІЮЧИЙ ЛАЗЕРНИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Спеціальність 8.05100402 – «Лазерна і оптоелектронна техніка»

Виконав: студент гр. ЛОТ-15м *Дорофєєв Михайло Юрійович*

Керівник: доцент, к.т.н. *Тарновський Микола Геннадійович*

ВІННИЦЯ – 2017

Актуальність теми. Стрімкий прогрес засобів вимірювання параметрів, які характеризують структурні зміни анізотропних речовин, зумовлений, значною мірою, розвитком оптико-електронної техніки. Важливе місце серед них займають автоматизовані системи вимірювання поляризаційних параметрів середовищ, які використовують зондування лазерним пучком.

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

Разом з тим більшість пристроїв лазерної поляриметрії є відносно інерційними, отже не забезпечують повну функціональність в умовах різноманітності об'єктів досліджень. Так, класичні засоби поляриметрії не повністю забезпечують потрібну оперативність вимірювань при вивченні в динаміці змін поляризаційних характеристик зразків (кінетика швидкоплинних біохімічних реакцій, швидкісні структурні зміни у речовині та ін.). Таким чином, розробка й вдосконалення методів, алгоритмів і технічних засобів швидкісної лазерної поляриметрії анізотропних речовин на базі сучасних оптико-електронних технологій є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність процесу виявлення структурних змін динамічних об'єктів при вимірюванні відповідних поляризаційних характеристик порівняно із традиційними.

Мета роботи. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення швидкодії процесу вимірювання поляризаційних характеристик оптично анізотропних середовищ і, як наслідок, розширення функціональних можливостей лазерної поляриметрії для оперативного аналізу динамічних структурних та біохімічних змін у таких речовинах.

Основні завдання дослідження:

- провести порівняльний аналіз сучасних методів і засобів оптичної поляриметрії анізотропних середовищ, а також активних перетворювачів поляризації, зробити класифікацію поляризаційних вимірювальних приладів;
- спроектувати схему функціонування універсального швидкодіючого лазерного поляриметра для динамічного аналізу поляризаційних характеристик оптично анізотропних речовин та його окремих вузлів;
- виконати розрахунок параметрів та змодельювати роботу електрооптичного модулятора поляризації та фотометричного сенсора 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 речовин.

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

Методи дослідження: Електромагнітна хвилева 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 універсальної лазерної поляриметрії анізотропних середовищ, який базується на одночасному визначенні параметрів лінійної фазової анізотропії зразків, що їх отримують при відновленні з оброблених із використанням оптимізованої характеристичної матриці інтенсивностей параметрів Стокса випромінювання. Це дозволило підвищити швидкодію процесу аналізу поляризаційних параметрів з урахуванням оптичної товщини зразка, а також розширити функціональні можливості методу для дослідження динамічних структурних змін анізотропних речовин.

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

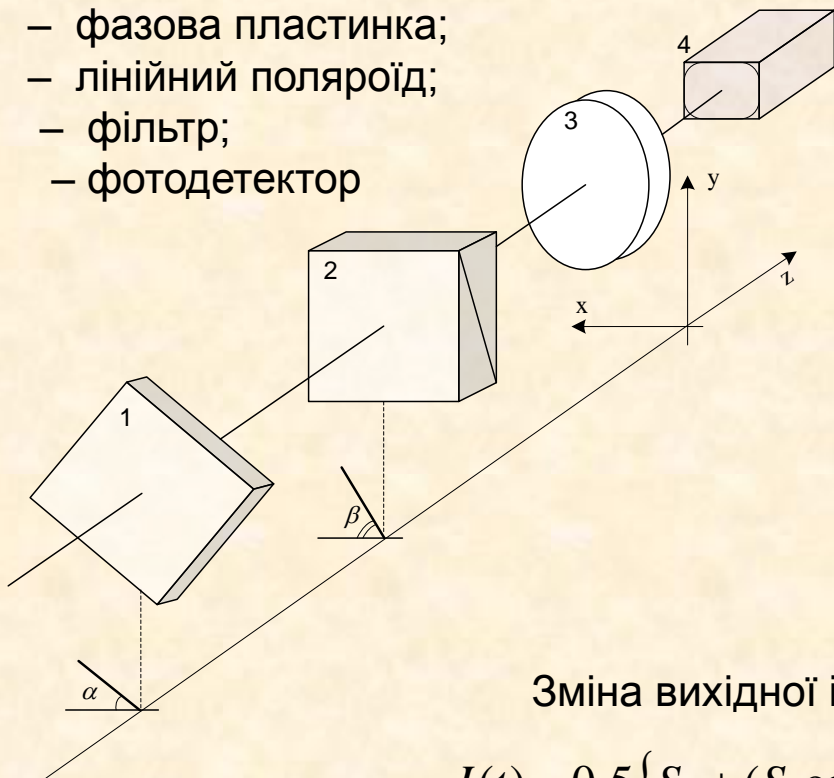
- Розроблено структурну функціональну схему універсального швидкодіючого лазерного поляриметра та електричні схеми його основних функціональних вузлів, що враховують особливості динамічного процесу взаємодії поляризованого випромінювання із зразком та дозволяють оптимізувати процес вимірювання параметрів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

Класифікація вимірювальних поляризаційних приладів



Типова оптична схема приймального каналу Стокс-поляриметра

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



Вектор Стокса (визначення)

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

Вектор Стокса вихідного випромінювання

$$S' = M_2 \cdot M_1 \cdot S$$

Зміна вихідної інтенсивності світла

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

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</i> <i>TEM-85-10</i>	<i>AA optoelectronic</i> <i>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:

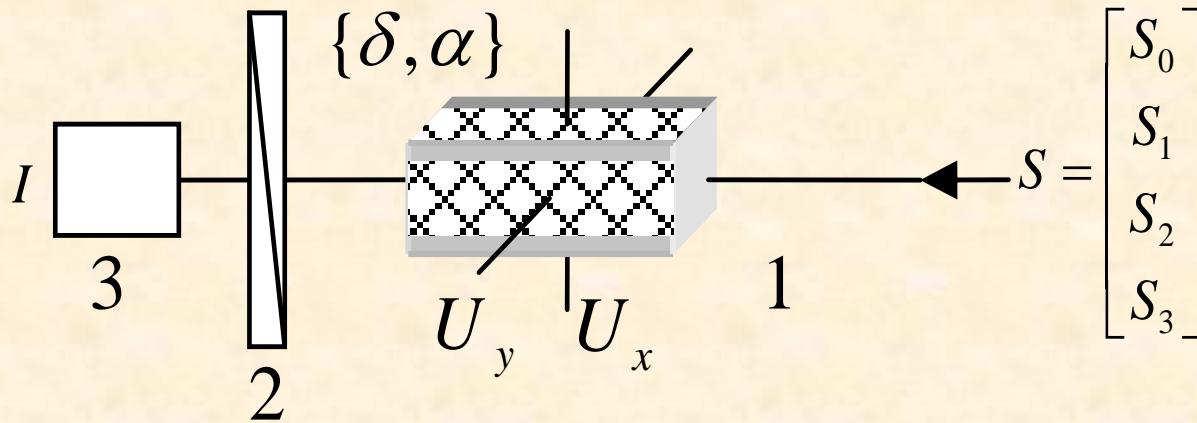
- дідейтерофосфат калію KD_2PO_4 ($KD^*P = DKDP$),
- титан-фосфаткалію $KTiOPO_4$ (KTP),
- бета-борат барію BaB_2O_4 (BBO),
- ніобат літію ($LiNbO_3$),
- танталат літію ($LiTaO_3$),
- дігідрогенат фосфату амонію ($NH_4H_2PO_4$).

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 ($1^\circ \dots 2^\circ$)
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

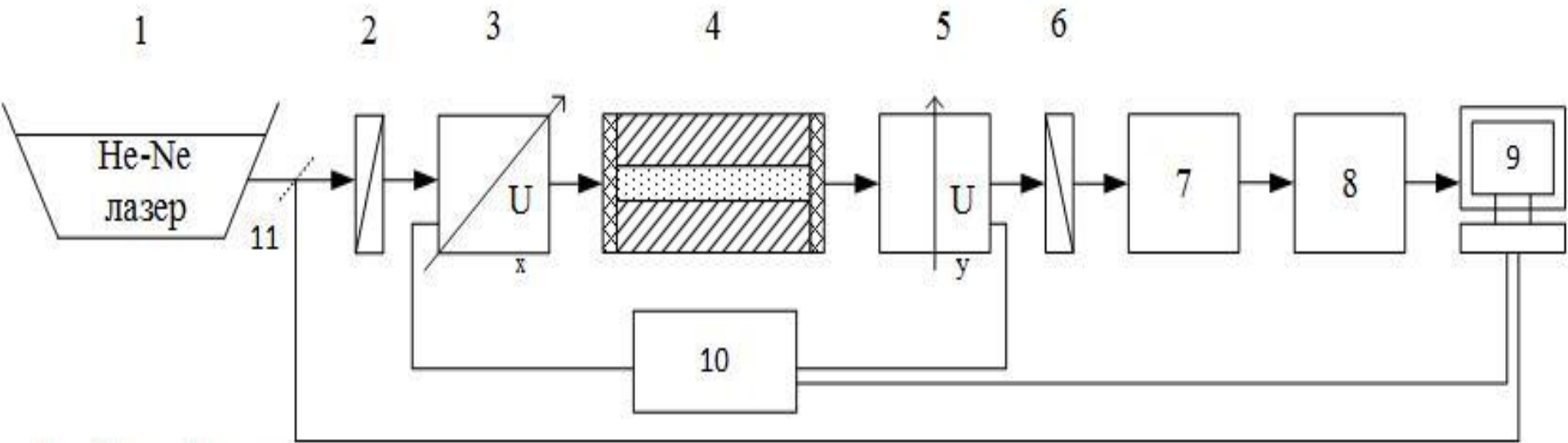
$$I(\delta, \alpha, S_0, S_1, S_2, S_3) = S_0 + S_1(\cos^2(2\alpha) + \sin^2(2\alpha)\cos(\delta)) + \\ + S_2 \cos(2\alpha)\sin(2\alpha)(1 - \cos(\delta)) - S_3 \sin(2\alpha)\sin(\delta).$$

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

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

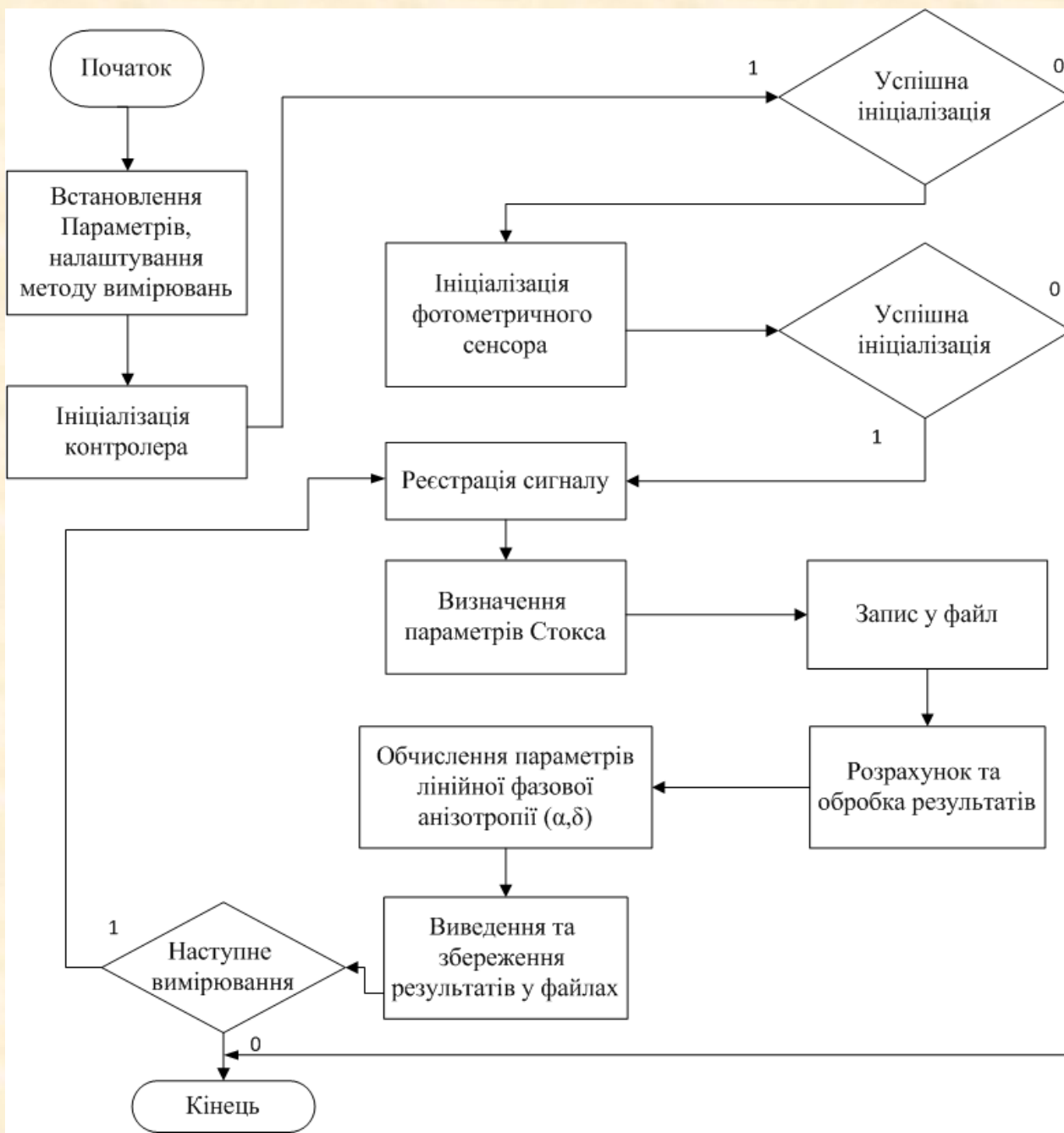
n_0 – коефіцієнт заломлення для звичайної хвилі; r – електрооптичний коефіцієнт; λ – довжина хвилі у вакуумі; l – довжина кристалу; d – товщина кристалу

Узагальнена структурна схема універсального швидкодiючого поляриметра



1. He-Ne лазер
2. Поляризатор (електрооптичний модулятор світла, який повертає площину поляризації по осі Ox).
3. Вимірювальна кювета
4. Електрооптичний модулятор світла по координатам Oy .
5. Аналізатор.
6. Фотометричний сенсор.
7. Блок обробки сигналів.
8. Персональний комп'ютер.
9. Мікроконтролерний блок керування.
10. Електронний затвор

Узагальнений алгоритм роботи пристрою



Розрахунок параметрів 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

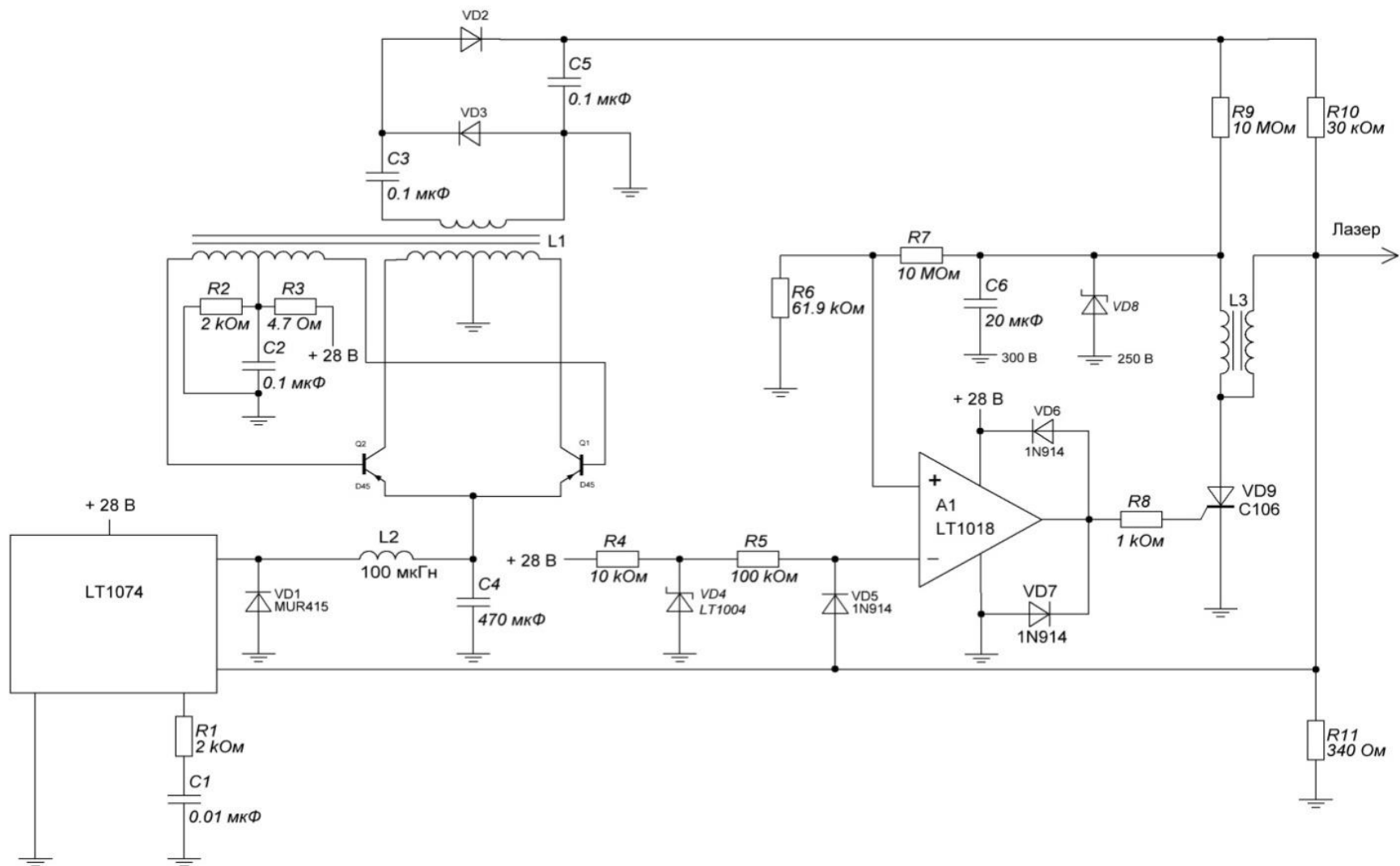
$$P_{вих} = B \left(\frac{G_o}{\alpha_w + \tau_\lambda} - 1 \right) \tau_\lambda = 48,4 \text{ мВт}$$

Спектральна ширина ліній генерації

$$\Delta \nu_N = 26 + 146 p_2 = 172 \text{ [МГц]}$$



Блок живлення He-Ne лазера



Розрахунок і моделювання параметрів електрооптичного модулятора

Кристал KD_2PO_4

Фазовий зсув ЕОМ, рад.



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

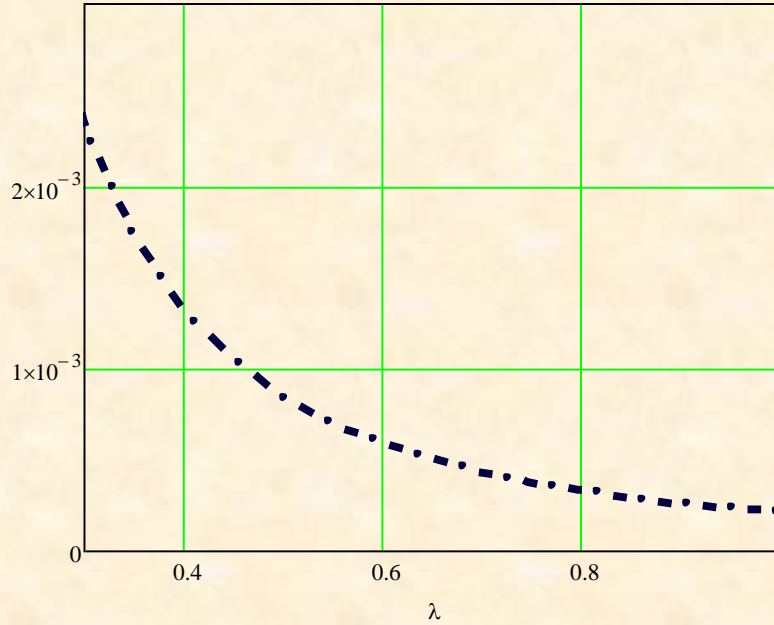
Наведене двопронезаломлення Δn



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

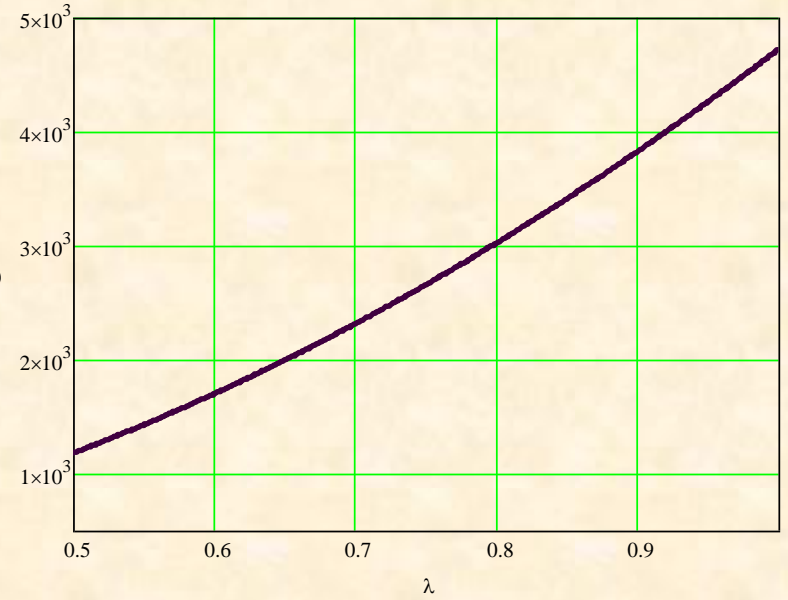
Розрахунок і моделювання параметрів електрооптичного модулятора

Відносна мінімальна інтенсивність

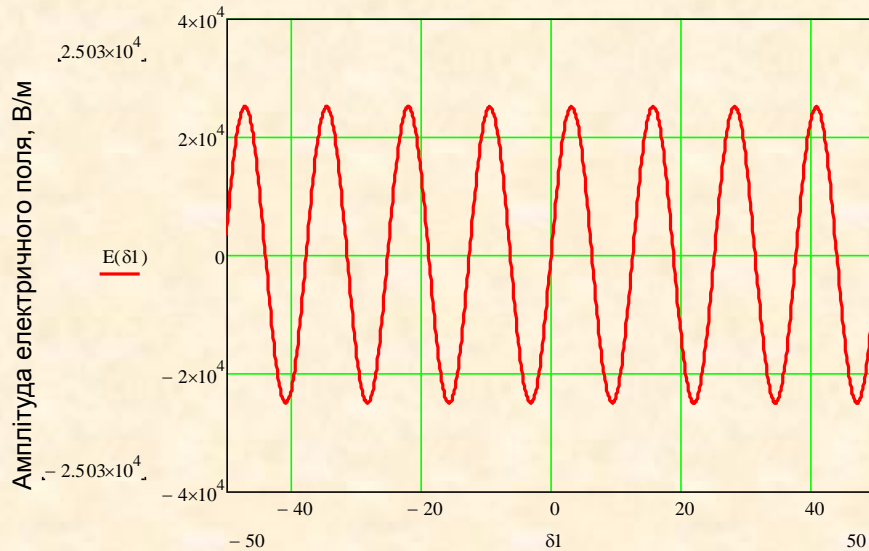


Довжина хвилі, мкм

Контрастність при схрещених поляризаторах



Довжина хвилі, мкм

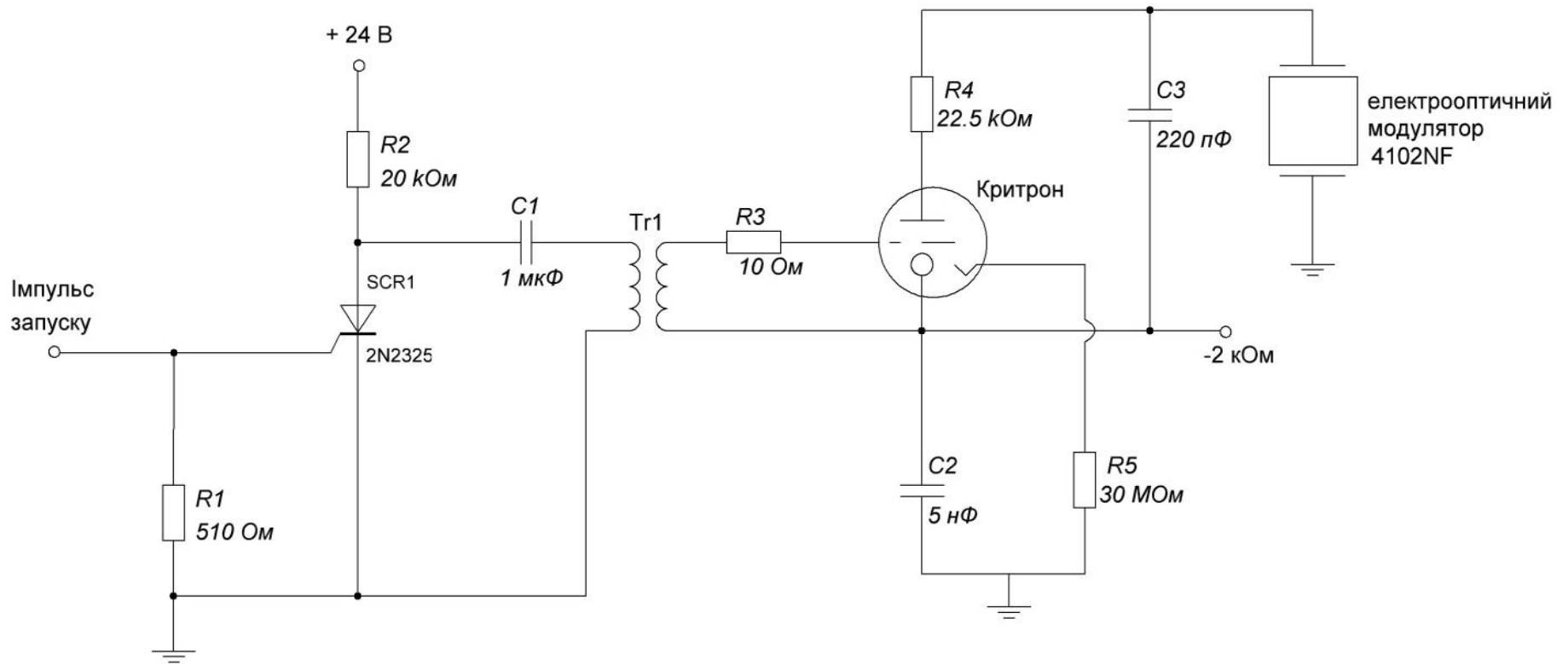


Фазовий зсув між компонентами поля з різною поляризацією, рад

$$M := \frac{2}{\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot 10 \cdot r_0 \cdot n_0 U}{2 \times 0.6328 \cdot d}\right)\right)} = 2.001 \times 10^3$$

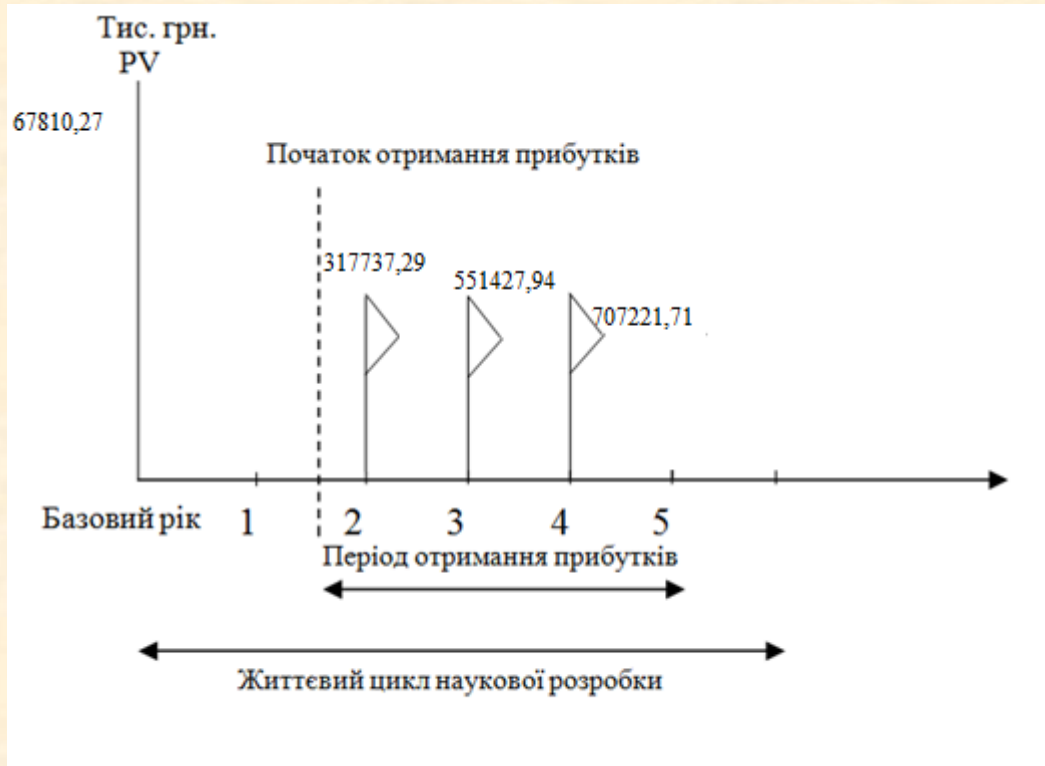
$$I_{\min} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3}{2\lambda} E\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3 U}{2\lambda d}\right)$$

Схема драйвера электрооптического модулятора



Економічні розрахунки

Ефективність вкладених в розробку інвестицій



Термін окупності розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{0,75} = 1,33 \text{ роки.}$$

Висновки

Проведено порівняльний аналіз методів і оптичних схем для визначення анізотропних властивостей речовин з урахуванням особливостей різних типів модуляторів поляризації випромінювання. Аналіз показав, що найбільш швидкодіючими є модулятори на електрооптичних кристалах.

Запропоновано методику і архітектуру лазерного автоматизованого поляриметра, які можуть бути застосовані для швидкісного високочутливого аналізу динаміки структурних змін у анізотропних рідинах та суцільних зразках. 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 – лазера, електрооптичного модулятора та фотометричного сенсора. Так, визначено енергетичні (вихідна потужність ~ 48 мВт) і спектральні (доплерівське уширення ~ 150 МГц) характеристики лазерного випромінювача, параметри оптичного резонатора.

Розраховані характеристики наведеного двопротинезаломлення у кристалі модулятора, його контрастність і зміну інтенсивності, які дозволили оптимізувати структуру з урахуванням робочої довжини хвилі лазера.

Розраховані параметри фотометричного сенсора свідчать про можливість високу чутливість ($0,41$ А/Вт), швидкодію (порядка 1 нс) і високі значення сигнал/шум при реєстрації сигналів.

Розроблено електричні схеми блоку живлення лазера і керування електрооптичного перетворювача поляризації, схему фотометричного сенсора .

- Виконано економічну частину розрахунків.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!