МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження та розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Виконав: студент II курсу, групи 8.1764
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

_____ Д. Р. Янченко
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н., Світанько М.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра *електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Спеціальність *176 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)
Освітня програма *Мікроелектронні інформаційні системи*
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*
Критська Т.В.
"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Янченку Дмитру Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Дослідження та розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання*

керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27*" *лютого 2025 року №* *313-с*

2 Строк подання студентом роботи *01 грудня 2025 року*

3 Вихідні дані до роботи *30-1100 нм, лавинний фотодіод, MOSFET транзистор, U= 10 кВ, U=±15 В, U=±5 В, Proteus, Multisim, Mathcad*
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Поляризатори світла і однофотонна реєстрація оптичних сигналів 2. Розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання 3. Техніко – економічне обґрунтування 4. Охорона праці та техногенна безпека при розробці системи*
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Поляризація світла і однофотонна реєстрація оптичних сигналів 2. Стрктурна схема однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання 3. Поляризаційно-стабільне оптоволокно 4. Електрооптичний елемент 5. Генератор напруги електрооптичного модулятора 6. Електрична схема модулятора на MOSFET транзисторі 7.

Моделювання параметрів електрооптичного модулятора 8. Розрахунок параметрів фотодіода системи реєстрації 9. Мікроконтролерний блок реєстрації і обробки сигналів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
II	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
III	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
IV	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*

7 Дата видачі завдання *28 лютого 2025 року*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*23.04.2025*	
2	*Розрахункова частина*	*20.10.2025*	
3	*Техніко-економічне обґрунтування розробки*	*20.11.2025*	
4	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*20.11.2025*	
5	*Розробка графічної частини роботи*	*25.11.2025*	
6	*Оформлення пояснювальної записки*	*01.12.2025*	
7	*Нормоконтроль*	*01.12.2025*	
8	*Попередній захист роботи*	*05.12.2025*	

Студент _____ *Янченко Д.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Світанько М.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 90 сторінок, 27 рисунків, 18 таблиць, 61 джерело літератури.

Об’єкт дослідження – оптоволоконні квантові інформаційні системи.

Мета роботи – дослідження та розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання.

Завдання роботи – розробити структурну схему тапровести моделювання основних функціональних блоків однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus, Multisim, Mathcad.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено структурну схему оптоволоконої поляризаційної системи однофотонної реєстрації в діапазоні випромінювання 300 – 1100 нм, проведено моделювання роботи системи за допомогою сучасних САПР електронних схем. Результати впроваджень – система обговорювалась на Всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Прогнозні пропозиції – використання системи в сучасних комплексах квантової криптографії.

ПОЛЯРИЗАТОР, ОПТОВОЛОКНО, ЛАВИННИЙ ФОТОДІОД, МІКРОКОНТРОЛЕР, PROTEUS.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 28.02.2025 р. по 01.12.2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……. 6

1. Поляризатори світла і однофотонна реєстрація оптичних сигналів ….. 7

1.1 Поляризація світла …… 7

1.2 Важливість поляризації в застосуванні лазера …….. 14

1.3 Поляризація світла – важливий елемент квантового комп'ютера (квантова заплутаність)…… 17

1.4 Однофотонний процес реєстрації оптичних сигналів …….. 20

1.4.1 Стандартні технології однофотонної реєстрації……. 20

1.4.2 Технологія прямого вимірювання часу прольоту (dTOF)…….. 21

1.5 PON тестер ……. 23

2. Розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання…….. 25

2.1 Структурна схема розробка однофотонної системи реєтрації поляризованого випромінювання …… 25

2.2 Поляризаційно-стабільне оптоволокно ……. 26

2.3 Електрооптичний елемент …… 28

2.3.1 Вибір матеріалу для електрооптичного модулятора…….. 28

2.2.3 Схема модуляції оптичного сигналу……. 31

2.4 Розробка генератора напруги електрооптичного модулятора …… 33

2.4.1 Моделювання зміни напруженості електричного поля у кристалі DKDP…… 36

2.4.2 Моделювання функціональності блоку генератора напруги електрооптичного модулятора на кристалі DKDP……. 39

2.5 Розрахунок параметрів фотодіода системи реєстрації …… 40

2.6 Мікроконтролерний блок реєстрації і обробки сигналів однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання …… 45

3. Техніко-економічне обґрунтування розробки однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання …… 50
3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання ……. 50
3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання ……..... 55
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання…… 57
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів…….. 57
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 58
4.3 Виробнича санітарія……... 59
4.4 Електробезпека……... 62
4.5 Пожежна та техногенна безпека ……. 63
4.6 Розрахунок електромагнітного випромінювання від моніторів в приміщенні лабораторії……... 68
Висновки та рекомендації……... 70
Перелік посилань……..…… 72
Додаток 1…… 79

Вступ

Світло можна розуміти як поперечну електромагнітну хвилю, що складається з коливальних електричного та магнітного полів. Напрямок електричного поля в світловій хвилі описується поляризацією світла. Багато джерел світла, включаючи сонячне світло, галогенні лампи та світлодіодні прожектори, вважаються неполяризованими, оскільки напрям їхніх електричних полів змінюється випадковим чином у часі. З іншого боку, лазерні джерела зазвичай лінійно поляризовані [1-3].

Розуміння поляризації лазерного світла є важливим для багатьох застосувань, оскільки поляризація впливає на відображення, фокусування лазерного променя та інші оптичні характеристики, які впливають на кінцеве застосування лазера. Хоча більшість лазерних джерел лінійно поляризовані, інші типи поляризації також можуть бути створені, наприклад кругова, еліптична та радіальна поляризація.

Поляризація електромагнітних хвиль і, зокрема, світла, широко використовується в сучасній технології.

Наприклад, піксель рідкокристалічного дисплея складається щонайменше з трьох шарів: твердого (скляного) шару, який пропускає лише горизонтально-поляризоване світло.

Поляризаційні фільтри застосовують для гасіння дзеркальних відблисків, наприклад при фотографуванні картин, скляних та порцелянових виробів, поверхні води. У будівельній і машинобудівній техніці явище поляризації застосовується для вивчення напружень, що виникають в окремих вузлах споруд і машин. Останні дослідження показали можливість застосування поляризованого випромінювання у квантових комп’ютерах.

Тому, актуальним є питання дослідження і розробки нових систем, які використовують поляризаційне випромінювання [4,5].

1. Поляризатори світла і однофотонна реєстрація оптичних сигналів

1.1 Поляризація світла

Природа світла. Світло має складну, подвійну природу. У поведінці світла проявляються як корпускулярні, так і хвильові властивості (так званий корпускулярно-хвильовий дуалізм світла). В одних оптичних явищах (інтерференція, дифракція) світло поводить себе як електромагнітна хвиля, у інших (теплове випромінювання, гальмове рентгенівське випромінювання, фотоефект) воно поводить себе як потік світлових частинок (корпускул) – фотонів [6-8].

Три розділи оптики. Оптика має три розділи:

1) Геометричною оптикою називається граничний випадок хвильової оптики при $\lambda \to 0$ (λ – довжина хвилі), в якому закони оптики сформульовані на мові геометрії (закони відбиття, заломлення, та ін.). При цьому світло поширюється уздовж деяких ліній (напрямків), що називаються променями.
2) Хвильова оптика. Цей розділ охоплює коло оптичних явищ, в основі яких лежить хвильова природа світла (інтерференція, дифракція, тощо).
3) Квантова оптика. Цей розділ охоплює коло оптичних явищ, що обумовлені корпускулярною (або квантовою) природою світла (теплове випромінювання, гальмівне рентгенівське випромінювання, фотоефект, тощо) [6-8].

Світлова хвиля. Це електромагнітна хвиля. Як уже згадувалося вище, в електромагнітній хвилі коливається вектор напруженості $\vec{E}$ електричного поля і вектор напруженості $\vec{H}$ магнітного поля. Фотофізіологічна, фотохімічна, фотоелектрична дія світла обумовлена електричною

компонентою $\vec{E}$ електромагнітної хвилі. Тому вектор $\vec{E}$ в оптиці називають світовим вектором і позначають $\vec{A}$.

Тоді формула світлової хвилі [6-8]

$$a = A\cos(\omega t - kz + \alpha). \qquad (1.1)$$

Формула (6.1) описує світлову хвилю, що поширюється вздовж осі z. Тут використовуються такі позначення:

a – миттєве значення світлового вектора,

A – амплітуда (максимальне значення),

$\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота коливань світлового вектора,

$\nu = 1/T$ – частота коливань,

$k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ – хвильове число,

$\lambda = vT$ – довжина хвилі,

v – швидкість поширення світлової хвилі.

Перехід через межу розподілу. При переході через межу розподілу двох середовищ частота коливань у хвилі залишається незмінною (вона задається джерелом світла), а змінюється швидкість поширення хвилі і, отже, довжина хвилі [6-8].

Розглянемо перехід хвилі з вакууму в речовину. У вакуумі довжина хвилі $\lambda_0 = c/\nu$, c – швидкість світла у вакуумі. У речовині довжина хвилі $\lambda = v/\nu$, де v – швидкість світла в речовині. Введемо абсолютний показник заломлення речовини:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Тоді довжина хвилі в речовині $\lambda = \lambda_0/n$.

Інтенсивність світла. Природне світло – це накладання (суперпозиція) світлових хвиль з довжинами хвиль у діапазоні

$$\Delta\lambda = (0{,}40 \div 0{,}76)\cdot 10^{-6} \text{ м},$$

або з частотою в діапазоні $\Delta\nu = (0{,}39 \div 0{,}75)\cdot 10^{15}$ Гц.

Око людини регіструє середній за часом потік енергії, що переноситься світловою хвилею. Середня за часом густина потоку енергії називається інтенсивністю світла $I = nA^2$. [6-8].

Види поляризації. У природному світлі коливання світового вектора різних напрямків швидко і невпорядковано змінюють одне одного у площині, що перпендикулярна до напрямку поширення світла (див. рис. 1.1, а) [6-8].

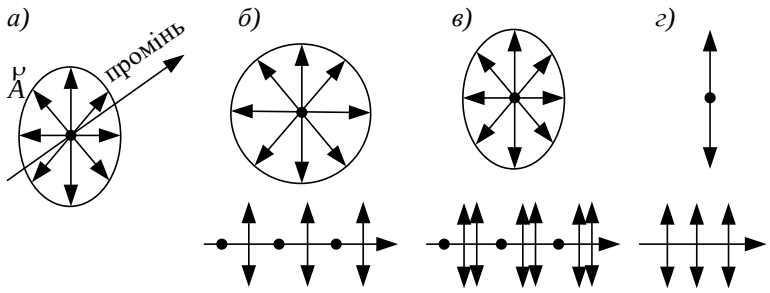


Рисунок 1.1 – Види поляризації

Таке світло називається неполяризованим. Амплітуда коливань світлового вектора $\vec{A}$ у нього по всіх напрямках у площині, перпендикулярній до напрямку поширення променя, однакова і, якщо з'єднати кінці світлових векторів різних напрямків, то отримаємо коло (див. рис. 1.1, б).

Світло, в якого коливання світлового вектора $\vec{A}$ впорядковано якимось чином називається поляризованим. Розрізнюють часткову і повну поляризацію.

У частково поляризованого світла амплітуда коливань у якомусь напрямку більша, ніж у перпендикулярному тобто є домінуючий напрямок і є часткова впорядкованість в коливаннях світлового вектора. Якщо з'єднати кінці світлових векторів різних напрямків то отримаємо еліпс (див. рис. 1.1, в).

У повністю поляризованого світла коливання світлового вектора повністю впорядковані. На рис. 1.1, г показано повністю поляризоване світло, в якого коливання світлового вектора відбувається в одній площині (плоско поляризоване світло) [6-8].

Поляризацію променя світла можна зобразити за допомогою двокінцевих стрілок і точок. Стрілки позначають коливання світлового вектора у площині рисунка, а точки – коливання, що перпендикулярні до площини рисунка. Для неполяризованого світла густина стрілок і точок на промені однакова, для частково поляризованого – більша густина або стрілок, або точок, для повністю поляризованого світла на промені або тільки стрілки, або тільки точки (залежно від напрямку коливання світлового вектора) [6-8].

Мірою поляризації є ступінь поляризації

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

де I_{max} – максимальна інтенсивність, I_{min} – мінімальна інтенсивність (у перпендикулярному напрямку). Для неполяризованого світла $I_{\max} = I_{\min}$ і $P = 0$, для частково поляризованого $0 < P < 1$, для повністю поляризованого $I_{min} = 0$ і $P = 1$.

Поляризатори. Природне неполяризоване світло перетворюється на поляризоване за допомогою поляризаторів. Поляризатори – це пристрої, які пропускають коливання, що паралельні площині поляризатора, і повністю затримують коливання, що перпендикулярні до неї.

Якщо на поляризатор падає поляризоване світло з інтенсивністю I_0 і площина коливань світлового вектора складає кут φ з площиною поляризатора, то інтенсивність світла на виході поляризатора (див. рис. 1.2, а) визначається за формулою [6-8].

$$I_{вих} = I_0 \cdot \cos^2 \varphi. \qquad (1.2)$$

Формула (6.14) має назву закону Малюса. [1-6]

Якщо на поляризатор падає неполяризоване світло (див. рис. 1.2, б), то кут φ у формулі (1.2) приймає будь-які значення від 0 до 2π і потрібно провести усереднення по всіх можливих кутах. Середнє значення $\cos^2 \varphi = 1/2$ і в результаті

$$I_{вих} = \frac{1}{2} I_0 .$$

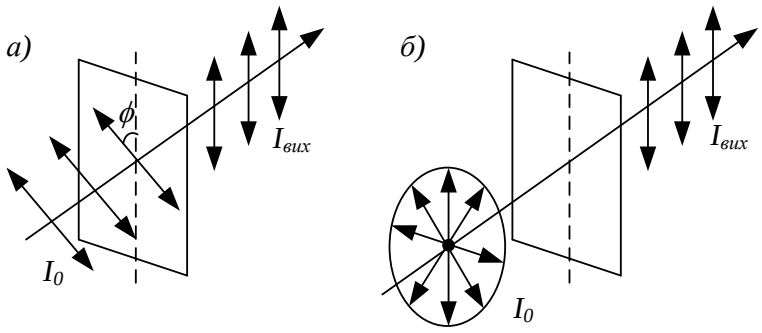


Рисунок 1.2 – Світло у поляризаторі [6-8]

Поляризація при відбитті і заломленні. Якщо на межу розподілу двох середовищ з абсолютними показниками заломлення n_1 і n_2 (перше середовище – це середовище, в якому поширюється падаючий промінь, друге середовище – де заломлений) падає природній (неполяризований) промінь світла, то відбитий і заломлений промені будуть частково поляризованими. При цьому в відбитому промені домінують коливання перпендикулярні до площини падіння, а у заломленому – паралельні до площини падіння (див. рис. 1.3).

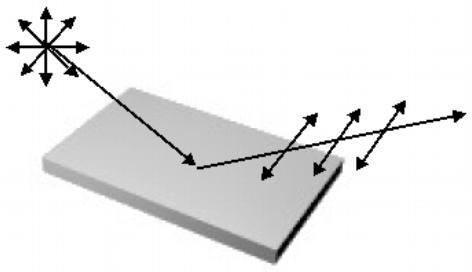


Рисунок 1.3 – Поляризація при відбиванні світла

Коли світло досягає об'єкта, частина світла буде поглинена об'єктом (або заломлюється всередині об'єкта), тоді як інші частини світла будуть відображатися об'єктом. Це відбите світло частково до повністю поляризованого, залежно від кута, куди світло досягає об'єкта. Напрямок поляризації буде в тому ж напрямку, що і поверхня об'єкта.

Сонячне світло, що вражає поверхню води або дороги, є прикладами відбитого світла. Велика частина відбитого світла буде вібрувати в напрямку Схід-Захід (E-W), тому поляроїдні сонцезахисні окуляри орієнтовані в напрямку Північ-Південь (N-S) для подолання відблисків [6-8].

Поляризація подвійним заломленням

Коли неполяризоване світло потрапляє в анізотропічний дорогоцінний камінь під кутом, відмінним від оптичної осі, це світло буде розділено на два поляризовані промені, вібруючи під прямим кутом один до одного. Це пов'язано з подвійними заломлюючими властивостями аністропних матеріалів. При виході з дорогоцінного каменю ці два поляризовані вогні знову поєднуватимуться як неполяризовані [6-8].

Однак в деяких мінералах (таких як турмалін) один з цих поляризованих променів повністю поглинається мінералом. Це означає, що тільки один з поляризованих променів вийде з мінералу, і цей промінь залишиться поляризованим. Явище поглинання світла, яке рухається в певному напрямку, називається селективним поглинанням. Ефект, який він викликає, називається плеохроизмом.
Перші поляроїдні фільтри були створені з дрібних зерен мінералу герапатит, який проявляє ті ж властивості, що і турмалін.

Поляризація при подвійному променезаломленні. При проходженні через деякі кристали світловий промінь розділяється на два промені. Це явище отримало назву подвійного променезаломлення. Вперше воно спостерігалося у кристалах ісландського шпату ($CaCO_3$).

Напрямок у кристалі, поширюючись вздовж якого промінь світла не розділяється на два промені, називається оптичною віссю кристала, а площина, що проходить через оптичну вісь і падаючий промінь – головним перерізом кристала.

Один із заломлених променів задовольняє звичайним законом заломлення і називається звичайним (позначається буквою *о*), інший – не задовольняє і називається незвичайним (позначається буквою *е*). Коливання світлових векторів у звичайному і незвичайному променях здійснюються у перпендикулярих площинах: у незвичайного променя в головному перерізі кристала, у звичайного – перпендикулярного до нього (див. рис. 84). Явище подвійного променезаломлення спостерігається для всіх прозорих кристалів за винятком тих, що належать до кубічної системи. В кристалах некубічної системи діелект- рична проникність ε, отже, і абсолютний показник заломлення $n = \sqrt{\varepsilon}$, залежать від напрямку променя, що і призводить до виникнення подвійного променезаломлення [6-8].

Призма Ніколя. На використанні явища подвійного променезаломлення заснована дія поляризатора, який називається призмою Ніколя, або просто ніколем. Ніколь являє собою призму із ісландського шпату, розрізану по діагоналі і склеєну прозорим клеєм (див. рис. 1.4) [6-8].

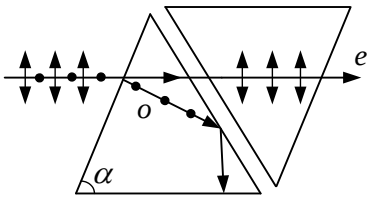


Рисунок 1.4 –Призма Ніколя

При падінні на клеєву плівку звичайний промінь падає з середовища оптично більш густого у середовище оптично менш густе і, якщо підібрати кут нахилу призми α так, щоб кут його падіння на клеєву плівку був більший за кут повного внутрішнього відбиття, то звичайний промінь відбивається від клеєвої плівки, а незвичайний – проходить. У результаті при падінні на ніколь неполяризованого світла на виході воно буде повністю поляризованим

1.2 Важливість поляризації в застосуванні лазера

Світло можна розуміти як поперечну електромагнітну хвилю, що складається з коливальних електричного та магнітного полів. Напрямок електричного поля в світловій хвилі описується поляризацією світла. Багато джерел світла, включаючи сонячне світло, галогенні лампи та світлодіодні прожектори, вважаються неполяризованими, оскільки напрям їхніх електричних полів змінюється випадковим чином у часі. З іншого боку, лазерні джерела зазвичай лінійно поляризовані [7-10].

Поляризаційне суміщення пучка

Також відомий як поляризаційний зв’язок, цей метод об’єднує кілька лінійно поляризованих лазерних променів і може бути розділений на дві підкатегорії: когерентні та некогерентні поляризаційні комбінації (рисунок 1.5).

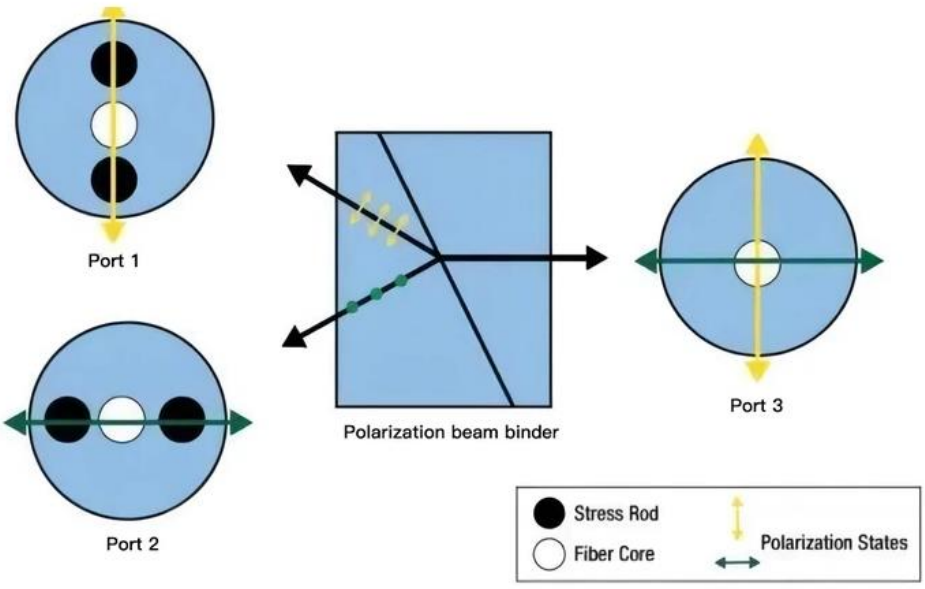


Рисунок 1.5 – Поляризаційне суміщення пучка [7-10]

У разі когерентної комбінації поляризації стани ортогональної поляризації двох когерентних пучків накладаються, що призводить до чисто лінійного лазерного випромінювання. Завдяки такому результату техніку можна повторювати кілька разів, щоб збільшити загальну потужність, випромінювану лазером, що також відомо як масштабування потужності. Ця технологія використовується в лазерних системах підсилювача потужності.
Некогерентне поляризаційне об'єднання передбачає надсилання променів різної поляризації через об'єднувач поляризаційних променів (PBC), щоб отримати неполяризований промінь, який відображає сукупну оптичну потужність і майже вдвічі перевищує яскравість падаючого променя. Ця техніка включає в себе поляризований вхідний промінь і неполяризоване випромінювання, тому не підходить для повторюваного масштабування потужності. Наприклад, вертикально поляризований промінь і горизонтально поляризований промінь можна пропустити через тонкоплівковий поляризатор, в результаті чого один з променів відбивається, а інший пропускається, причому обидва промені поширюються в одному напрямку.

Некогерентне об'єднання пучків можна застосувати до твердотільних лазерів із кінцевою накачуванням, де світло накачки вводиться вздовж напрямку променя, а не поперечно. Лазерні кристали, виготовлені з таких матеріалів, як Nd: YAG, які можуть поглинати випромінювання накачування в обох напрямках поляризації, можуть використовувати переваги цієї технології. Наприклад, діодний лазерний стек, що складається з кількох діодних смуг, розташованих у двовимірному масиві випромінювачів для отримання кількох кіловат вихідної потужності, має нижчу загальну яскравість, ніж одна діодна смуга. Комбінації некогерентно поляризованих променів можуть бути застосовані до шару аромату для збільшення яскравості, яка, у свою чергу, накачує потужні твердотільні об'ємні лазери[7-10].

Подвійне променезаломлення лазерного випромінювання

Подвійне променезаломлення описує оптичну властивість, яка виникає в певних прозорих середовищах, у яких показник заломлення залежить від поляризації світла, що спричиняє подвійне заломлення світла в матеріалі. Це явище може бути викликано багатьма факторами, включаючи кристалічну структуру середовища, власне або індуковане поле напруги в матеріалі та застосування додаткових електромагнітних полів[7-10].

Ця властивість використовується в пристроях, які називаються тюнерами подвійного променезаломлення, які звужують оптичну смугу пропускання та відбивають інші довжини хвилі світла від лазерного променя, що поширюється всередині резонатора. Тюнер розташовують під кутом Брюстера, а потім повертають навколо осі, перпендикулярної поверхні розділу, щоб викликати затримку на звуженій довжині хвилі передачі. Цікава довжина хвилі демонструє лише p-поляризовану складову, що призводить до мінімальних втрат на відбиття або їх відсутності. Навпаки, інші довжини хвиль затримуються по-іншому, стають s-поляризованими та відчувають втрати від відбиття. Кут нахилу тюнера впливає на зсув довжини хвилі, щоб мінімізувати втрати потужності, і регулюється на підставці, обладнаній мікрометричними гвинтами для точних модифікацій.

Однопластинний тюнер із кутом падіння, рівним куту Брюстера, здатний створювати залежні від довжини хвилі зміни поляризації через втрати передачі s-поляризованого компонента лазерного променя. Чим товщий тюнер, тим менший вільний спектральний діапазон, який визначає спектральний інтервал між двома значеннями передачі та забезпечує кращу спектральну роздільну здатність. Лазерний промінь, що поширюється, поширюється всередині фільтра дещо інакше, ніж його звичайні та незвичайні промені, коли перший проходить без змін, а другий заломлюється під певним кутом. Це призводить до подвійного променезаломлення та нерівномірного накладання вкладів у вихідний промінь. Обертання тюнера

навколо осі, перпендикулярної до поверхні, змінює криву пропускання і неминуче змінює напрямок аномальної складової світла [7-10].

Двопроменезаломлюючі тюнери також можуть складатися з кількох пластин. Додаткова кількість пластин дозволяє лазеру працювати з мінімальними втратами цілі. Це пояснюється тим, що зі збільшенням товщини пластини вільний спектральний діапазон зменшується, а мінімум пропускання в діапазоні довжин хвиль наближається. Щоб ще більше збільшити втрати на відбиття на небажаних довжинах хвиль, між пластинами можна вставити поляризатори. Ця конфігурація з певною граничною товщиною пластини стає так званим деполяризатором Ліо, який деполяризує падаюче поліхроматичне поляризоване світло.

Множник частоти

Концепція нелінійної поляризації починає діяти в галузі волоконних лазерів із подвоєною частотою. У деяких лазерах, які використовують Nd:YAG та інші нелінійні кристали як середовище генерації, подвоєння частоти створює хвилю з оптичною частотою, яка вдвічі перевищує світло накачки [7-10].

1.3 Поляризація світла – важливий елемент квантового комп’ютера (квантова заплутаність)

Квантова сплутаність — квантовомеханічне явище, при якому квантовий стан двох або більшої кількості об'єктів повинен описуватися у взаємозв'язку один з одним, навіть якщо окремі об'єкти рознесені в просторі. Внаслідок цього виникають кореляції між спостережуваними фізичними властивостями об'єктів. Наприклад, гіпотетично можна так приготувати дві частинки в єдиному квантовому стані, що коли одна частинка спостерігається в стані зі спіном, спрямованим вгору, то спін іншої

виявляється спрямованим вниз, і навпаки, і це попри те, що за принципами квантової механіки, передбачити, яка частинка фактично рухатиметься в заданому напрямку, неможливо. Іншими словами, створюється враження, що вимірювання над однією системою миттєво впливають на систему, сплутану з нею. Однак те, що розуміється під інформацією в класичному сенсі, все-таки не може бути передано через заплутаність швидше, ніж зі швидкістю світла [4,5].

Генерація заплутаних фотонів в результаті спонтанного параметричного розсіяння (СПР) лазерного потоку в нелінійному кристалі [4,5].

У найпростішому випадку джерелом S потоків заплутаних фотонів слугує певний нелінійний матеріал, на який спрямовується лазерний потік певної частоти та інтенсивності (схема з одним емітером). В результаті спонтанного параметричного розсіювання (СПР) на виході виходять два конуси поляризації H та V, що несуть пари фотонів у заплутаному квантовому стані (біфотони) (рисунок 1.6) [4,5].

При СПР II типу під впливом поляризованого лазерного випромінювання накачування в кристалі бета-борату барію спонтанно народжуються біфотони, сума частот яких дорівнює частоті випромінювання накачування [4,5].

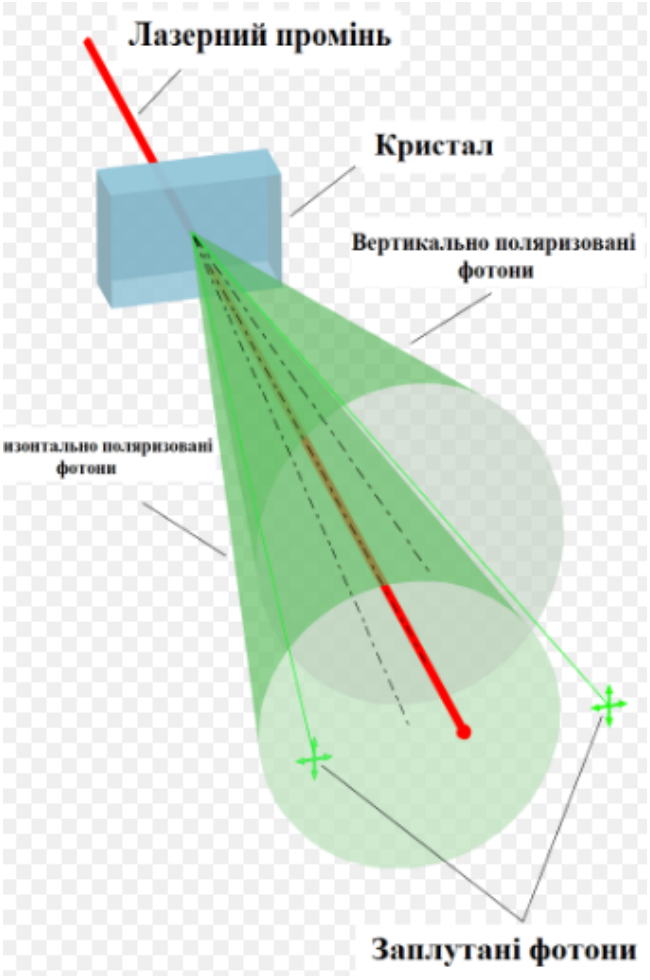


Рисунок 1.6 – Генерація заплутаних фотонів

Дослідники у декількох країнах працюють над створенням робочої системи квантової передачі даних (або квантового інтернету). Для цього необхідно аби заплутаність виникала швидко і тривала досить довго, щоб встигнути передати інформацію на наступний вузол. Часткове рішення знайшли у Делфтському технічному університеті [4,5].

2014 року нідерландські учені телепортували інформацію через кімнату, а за рік ця відстань збільшилася до 1,3 км. 2017 року китайські дослідники змогли створити заплутані фотони та через супутник Micius передати їх до двох наземних лабораторій. Відстань між лабораторіями становила 1,2 тис. км. А на початку 2018 року вчені використали Micius, щоб відправити дані з Китаю аж до Австрії. У 2020 році дослідники планують створити квантову заплутаність із кількома вузлами та «зв'язати» 4 міста у Нідерландах [4,5].

16 серпня 2016 року в КНР був запущений перший супутник квантового зв'язку[3]. Вартість супутника становила близько $100 млн, а дослідження відбувались в рамках проекту англ. *Quantum Experiments at Space Scale* (QUESS). Даний експеримент має довести можливість квантової передачі даних на великі відстані [4,5].

У випуску журналу *Science* за 16 червня 2017 року китайські вчені повідомили про встановлення нового рекорду дальності квантової передачі даних у 1203 км. При цьому дані передавались між супутником та наземними станціями.

В липні 2018 року група китайських дослідників повідомила про встановлення нового рекорду — їм вдалось створити систему сплутаних станів з 6-ма фотонами, кожен з трьома ступенями свободи. Отримана ними система на 18 кубіт здатна генерувати 2^{18} = 262 144 станів [4,5].

1.4 Однофотонний процес реєстрації оптичних сигналів

1.4.1 Стандартні технології однофотонної реєстрації

Як зазначалось раніше, стійкий стан процесу пропускання світла через поляризатори і аналізатори буде якнайбільше корисним у такому важливому дослідницькому питанні, як однофотонна реєстрація оптичного випромінювання [11-17].

Однофотонний реєстратор — це пристрій для виявлення та підрахунку окремих фотонів світла, який генерує імпульс сигналу для кожного виявленого фотона. На відміну від звичайних фотодетекторів, які видають аналоговий сигнал, пропорційний загальній інтенсивності світла, однофотонний детектор надає цифровий вихід, що дозволяє підрахувати кількість фотонів за певний проміжок часу. До таких пристроїв належать

фотоелектронні помножувачі, однофотонні лавинні діоди та детектори на основі надпровідних нанодротів [11-17].

Існують наступні типи однофотонних реєстраторів [11-17]:

Фотоелектронні помножувачі (ФЕП): широко використовувані пристрої, які посилюють сигнал до рівня, що дозволяє виявити окремий фотон.

Однофотонні лавинні діоди (ОЛД): тип напівпровідникових детекторів, які використовують лавинний ефект для підсилення сигналу від одного фотона.

Детектори одиничних фотонів на основі надпровідних нанодротів (SNSPD): Пристрої, які працюють при наднизьких температурах і надзвичайно чутливі до окремих фотонів у ближньому інфрачервоному та оптичному діапазонах.

Давачі на крайовому переході та сцинтиляційні лічильники: Інші типи детекторів, які можуть бути налаштовані для виявлення окремих фотонів.

Останнім часом з’явились іноваційні методи однофотонної еєстраії. Одним із них є технологія прямого вимірювання часу прольоту (dTOF) [18].

1.4.2 Технологія прямого вимірювання часу прольоту (dTOF)

Технологія прямого вимірювання часу прольоту (dTOF) – це інноваційний підхід до точного вимірювання часу прольоту світла, що використовує метод корельованого з часом підрахунку окремих фотонів (TCSPC). Ця технологія є невід'ємною частиною різноманітних застосувань, від датчиків близькості в побутовій електроніці до передових систем LiDAR в автомобільних системах. По суті, системи dTOF складаються з кількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє вирішальну роль у забезпеченні точних вимірювань відстані (рисунок 1.6) [18].

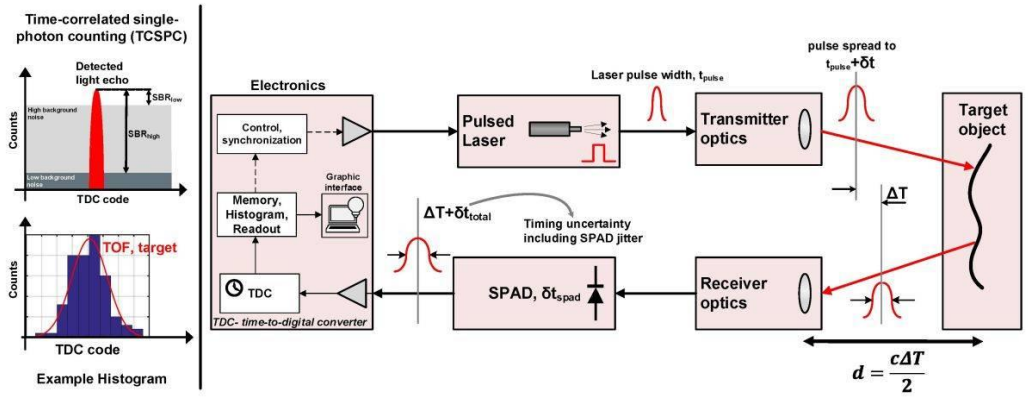


Рисунок 1.6 - Основні компоненти систем dTOF

Основними компонентами системи dTOF є наступні.

Лазерний драйвер та лазер[18].

Драйвер лазера, ключова частина схеми передавача, генерує цифрові імпульсні сигнали для керування випромінюванням лазера за допомогою перемикання MOSFET. Лазери, зокрема, вертикальні резонаторні поверхневі випромінювальні лазери(VCSEL) є популярними завдяки вузькому спектру, високій енергоємності, можливостям швидкої модуляції та легкості інтеграції. Залежно від застосування, довжини хвиль 850 нм або 940 нм вибираються для балансу між піками поглинання сонячного спектру та квантовою ефективністю сенсора [18].

Передавальна та приймальна оптика

На передавальному боці проста оптична лінза або комбінація коліматорних лінз та дифракційних оптичних елементів (ДОЕ) спрямовує лазерний промінь через потрібне поле зору. Приймальна оптика, спрямована на збирання світла в межах цільового поля зору, використовує лінзи з нижчими діафрагмовими числами та вищою відносною освітленістю, а також вузькосмугові фільтри для усунення сторонніх світлових перешкод.

Датчики SPAD та SiPM [18].

Однофотонні лавинні діоди (SPAD) та кремнієві фотопомножувачі (SiPM) є основними датчиками в dTOF-системах. SPAD вирізняються своєю здатністю реагувати на окремі фотони, запускаючи сильний лавинний струм лише одним фотоном, що робить їх ідеальними для високоточних вимірювань. Однак, більший розмір пікселя порівняно з традиційними CMOS-сенсорами обмежує просторову роздільну здатність dTOF-систем.

Часово-цифровий перетворювач (TDC) [18].

Схема TDC перетворює аналогові сигнали на цифрові сигнали, представлені часом, фіксуючи точний момент реєстрації кожного імпульсу фотона. Ця точність є критично важливою для визначення положення цільового об'єкта на основі гістограми записаних імпульсів.

Дослідження параметрів продуктивності dTOF

Дальність виявлення та точність [18].

Діапазон виявлення системи dTOF теоретично поширюється настільки далеко, наскільки можуть поширюватися її світлові імпульси та відбиватися назад до датчика, чітко ідентифікуючись серед шуму. Для побутової електроніки фокус часто знаходиться в межах 5 м, використовуючи VCSEL, тоді як для автомобільних застосувань може знадобитися діапазон виявлення 100 м або більше, що вимагає використання різних технологій, таких як EEL або волоконні лазери.

Майбутнє технології dTOF

Незважаючи на високі технічні бар'єри та витрати, пов'язані з технологією dTOF, її переваги в точності, діапазоні та енергоефективності роблять її перспективним кандидатом для майбутнього застосування в різних галузях. Оскільки сенсорні технології та розробка електронних схем продовжують розвиватися, системи dTOF готові до ширшого впровадження, стимулюючи інновації в побутовій електроніці, автомобільній безпеці тощо[18].

Тому, метою оботи є дослідження та розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання.

Для досягнення мети виконати наступні завдання:

1) провести аналіз стану технологій однофотонних поляризаційних систем, обрати найбільш оптимальну для аналізу та розробки;

2) розробити структурну схему пристрою;

3) провести моделювання основних функціональних блоків пристрою за допомогою САПР електронних схем;

4) провести техніко-економічний розрахунок системи, що розробляється;

5) розробити заходи із норм дотримання умов безпеки праці та техногенної безпеки.

2. Розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

2.1 Структурна схема розробка однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Часткою світла є фотон - реальна елементарна частинка. У фотонній теорії поляризацію світла пов'язують з поляризацією фотонів, що обумовлена наявністю спіну у цих часток і його певною спрямованістю у просторі. Особливою умовою для функціювання фотонних або квантових систем є стабільність стану поляризації фотона та можливість його безпосередньої реєстрації [19]. Виходячи з цього, у роботі запропоновано наступну структурну схему однофотонної реєстрації поляризованого випромінювання (рисунок 2.1).

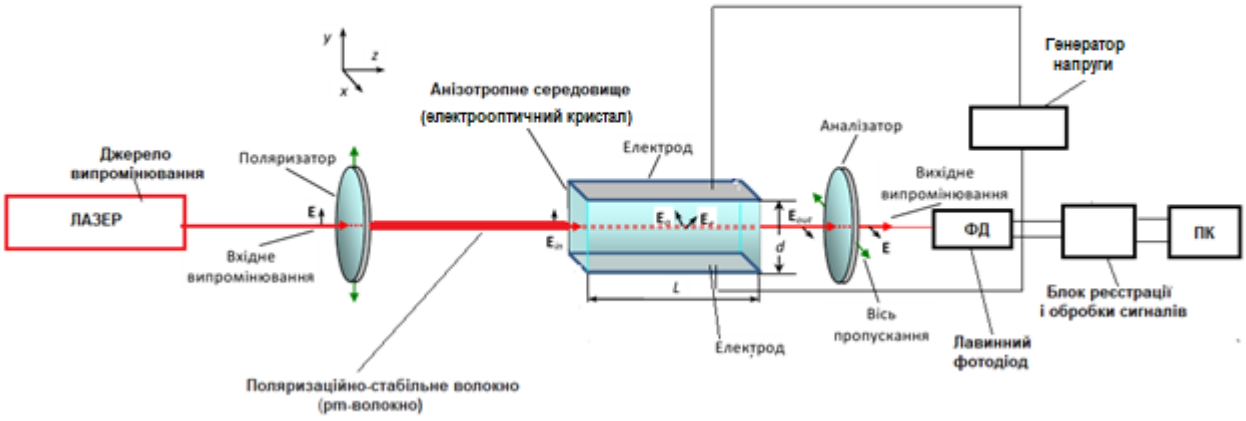


Рисунок 2.1. – Стрктурна схема однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Для забезпечення стабільного оптичного каналу у схемі використовується поляризаційно-стабільне оптоволокно, яке має безпосередній щільний контакт із анізотропним середовищем [20]. У якості випромінювача використовуємо

лазерні джерела випромінювання у діапазоні 300-1100 нм [19]. У якості поляризатора та аналізатора використовуємо лазерні поляризаційні фільтри, які забезпечують стабільну лінійну поляризацію вхідного випромінювання [8].

2.2 Поляризаційно-стабільне оптоволокно

Одним з поширених видів оптичних волокон, якемає ефект стабілізації поляризації випромінювання, що вводиться до волокна, є спеціальне одномодове волокно типу Panda (рисунок 2.2) [21-23].

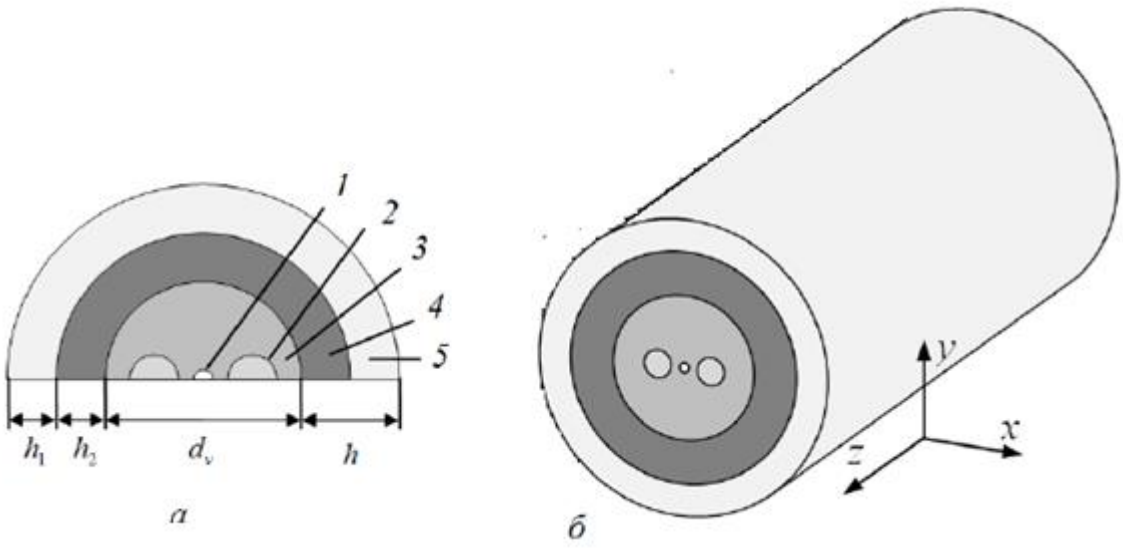


Рисунок 2.2 - Поляризаційно-стабільне оптоволокно типу Panda: а - поперечний переріз волокна; б - об'ємна модель; 1 - світлопровідний канал, 2 - силовий елемент, 3 -кварцове скло, 4 – внутрішніє захисне покриття, 5 – зовнішнє захисне покриття

Саме волокно складається з чистого кварцового скла (основний матеріал 3) і кварцового скла, легованого різними добавками GeO_2 (світлопровідний канал,1), B_2O_3 і P_2O_5(силові едементи 2). Такі добавки істотно змінюють термомеханічні властивості скла (в'язкість, температура склування,

показник заломлення), що призводить до формування у світлопровідному каналі анізотропії розподілу залишкової напруги після виготовлення. Різниця головної напруги призводить до появи у світлопровідному каналі двопроменезаломлення, при якому показник заломлення залежить від напряму поширення світла. Цей ефект сприяє збереженню стану поляризації випромінювання при його проходженні по волокну [21-23].

Дане волокно має ідеальну геометрію за параметрами: діаметр волокна 80 мкм (волокно призначене для передачі сигналу з довжиною хвилі λ=1,55 мкм), діаметр светопровідного каналу -6 мкм, діаметр силового елемента - 15 мкм, відстань між центрами волокна і сиового елемента 15 мкм, діаметр зовнішнього зовнішнього захисного покриття - 167 мкм, діаметр внутрішнього захисного покриття - 130 мкм (прийнятий як стандартний діаметр).

У подальшому поляризоване світло подається до електрооптичного кристалу, щоб за рахунок наведеного двопроменезаломлення під дією електричного поля (електрооптичний ефект), створити два стійких стани поляризації – поляризованого звичайного променя n_0, та незвичайного променя n_e (рисунок 2.3) [19].

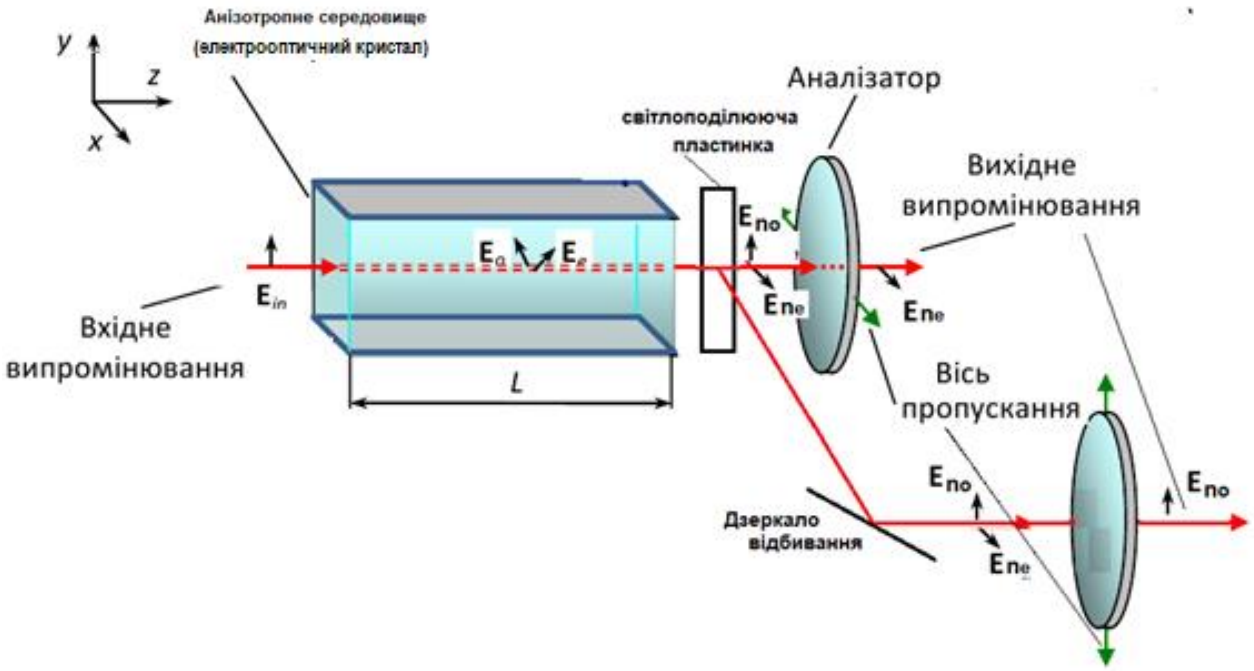


Рисунок 2.3 – Схема формування стійких станів поляризації системи: En_o – світловий промінь звичайної хвилі випромінювання, En_e – світловий промінь незвичайної хвилі випромінювання.

Така схема формування стійких поляризаційних станів зможе значно збільшити кількість варіантів кодування оптичного інформаційного сигналу у двійковій системі [19].

2.3 Електрооптичний елемент

2.3.1 Вибір матеріалу для електрооптичного модулятора

Для електрооптичного модулятора у якості анізотропного середовища обираємо відомий нелінійно-оптичний кристал дигідрофосфат калію KH_2PO_4 (DKDP)[24-31]. Дигідрофосфат калію (DKDP) — широко використовуваний електрооптичний кристал із чудовими властивостями в галузі оптики та фотоніки. Він належить до сімейства нелінійних оптичних кристалів і завоював популярність завдяки своїм унікальним характеристикам. Кристали DKDP прозорі в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах і демонструють

чудові електрооптичні та нелінійні оптичні властивості, що робить їх придатними для різноманітних застосувань. Їх широка доступність, економічна ефективність і легкість вирощування кристалів сприяють їх широкому використанню в електрооптичних пристроях і системах. Вони мають великий електрооптичний коефіцієнт, що забезпечує ефективну модуляцію світла шляхом застосування електричного поля. Кристали DKDP також мають відмінні нелінійні оптичні властивості, що робить їх придатними для таких застосувань, як подвоєння частоти, параметричне посилення та оптичні параметричні коливання. Вони мають широкий діапазон прозорості, що охоплює від ультрафіолетової до інфрачервоної області, забезпечуючи універсальність у застосуванні з різними довжинами хвиль. Крім того, кристали KDP мають гарну оптичну якість, низьке поглинання та високий поріг ушкодження, викликаного лазером, що робить їх придатними для потужних лазерних систем і складних середовищ.

Але, ці кристали також мають значну гігроскопічність. Тому для роактичного використання готовий модулятор покриваюь захисним просвітлюючим покриттям [24-31].

На рисунку 2.4 представлений зовнішній вигляд кристалів KD_2PO_4 (DKDP) [29, 30].



Рисунок 2.4 - Кристали KD_2PO_4 (DKDP)

У таблиці 2.1 представлені порівняльні характеристики відомих кристалів для електрооптичних модуляторів. У таблиці 2.2 представлені основні фізичні параметри кристалів DKDP, які знадобляться для розрахунків параметрів модулятора та моделювання його роботи [24-31].

Таблиця 2.1 - Порівняльні характеристики кристалів для електрооптичної модуляції [24-31]

Кристал	Область прозорості, мкм	Напівхвильова напруга, кВ (λ=0,633 мкм)	Гігроскопічність
KH_2PO_4 (KDP)	0,2 – 1,5	8,1	+
KD_2PO_4 (DKDP)	0,2 – 1,6	3,4	+
$LiNbO_3$ (LN)	0,3 – 5,5	3,0	-
β-BaB_2O_4 (BBO)	0,19 – 3,2	14,0	+
$KTiOPO_4$ (KTP)	0,3 – 4,5	0,366	-

Таблиця 2.2 Фізичні параметри кристалів DKDP [24-31]

Характеристики	KDP	DKDP
Хімічна формула	KH_2PO_4	KD_2PO_4
Область прозорості	200-1500 нм	200-1600 нм
Нелінійні коефіцієнти	d_{36} =0,44 пм/В	d_{36} =0,40 пм/В
Показник заломлення（ при 1064 нм）	no =1,4938 , ne =1,4599	no =1,4948 , ne =1,4554
Електрооптичні коефіцієнти	r_{41}=8,8 пм/В r_{63}=10,3 пм/В	r_{41}=8,8 пм/В r_{63}=25пм/В
Поріг оптичного руйнування	> 5ГВт/см ^{2}	> 3ГВт/см ^{2}
Поглинання	0,07/см	0,006/см

Як видно із таблиць 2.1 та 2.2, за основними характеристиками (спектральний діапазон прозорості, значення напвхвильової напруги), найбільш вигідним був би кристал BBO. Але на даний час існує велика проблема із наявністю цього матеріалу, та великою складністю його отримання. Тому за умови подібності параметрів, обираємо кристал KD_2PO_4 (DKDP) із нанесеним на його робочі поверхні захисним просвітлюючим покриттям.

2.3.2 Схема модуляції оптичного сигналу

У деяких кристалах спостерігається зміна показників заломлення прямо пропорційно величині прикладеного електричного поля. Дане явище називається лінійним електрооптичним (ЕО) ефектом або ефектом Покельса [19,24-26, 28, 31]. Електрично наведене двозаломлення призводить до відносної фазової затримки ортогонально поляризованих компонент лінійно

поляризованого світлового пучка залежно від величини прикладеної до кристала напруги. У загальному випадку це описується тензором електрооптичних коефіцієнтів і призводить до досить громіздких виразів. Проте у багатьох випадках обчислення спрощуються завдяки симетрії кристала і спеціальному вибору напрямів електричного поля і поширення світла відносно осей кристала [19,24-26, 28, 31].

На практиці застосовуються дві основні конфігурації: повздовжню і поперечну (на рисунках 2.1 та 2.3 представлений варіант поперечної модуляції.

У повздовжній конфігурації світловий пучок і електричне поле паралельні. У кристалах DKDP (KD_2PO_4) при поширенні світла уздовж оптичної осі фазова затримка пропорційна напрузі U, прикладеній до кристала. Цей випадок називається фазовою модуляцією. Якщо помістити кристал між двома схрещеними поляризаторами, вихідна інтенсивність підкорятиметься закону Малюса:

$$I=Iosin^2(Г/2), \qquad (2.1)$$

тобто вихідна інтенсивність модулюється прикладеною напругою і в даному випадку говорять про амплітудну модуляцію. Максимальна вихідна інтенсивність досягається, коли фазова затримка рівна λ/2 (половина довжини хвилі). Можна відмітити, що відповідна напруга $U_{\lambda/2}=\lambda/2*n_o3r_{63}$, тобто визначається лише довжиною хвилі і властивостями матеріалу. У зв'язку з цим $U_{\lambda/2}$ або напівхвильову напругу часто використовують як параметр, що характеризує ефективність матеріалу для ЕО модуляції [19,24-26, 28, 31]. Повздовжна конфігурація використовується при модуляції широкоапертурних світлових пучків і до цих пір широко застосовується для кристалів KDP і DKDP. Але використання цих кристалів пов'язано з високою напругою управління (до 10 кВ), а також з технічними складнощами нанесення прозорих провідних електродів та спеціальних кільцевих електродів для формування подовжнього електричного поля. Також існує необхідність захисту цих гігроскопічних кристалів від атмосферної вологи.

У поперечній конфігурації електричне поле перпендикулярне світловому пучку, що забезпечується нанесенням електродів на дві бічні грані кристала. В цьому випадку фазова затримка визначається не лише прикладеною напругою, але також і геометрією кристала. На додаток до простішої конструкції електродів поперечна конфігурація дозволяє понизити управляючу напругу, в число разів, яке визначається відхиленням довжини кристала L до його апертури d (відстань між електродами) [19,24-26, 28, 31].

ЕО кристал, необхідним чином орієнтований, відполірований, з нанесеними просвітляючими покриттями і електродами і змонтований в спеціальну комірку з виводами для підключення управляючої напруги, інколи з додаванням поляризаційних елементів (призма Глана або фазова пластина) називається коміркою Покельса. Для оптимального вибору кристала для такої комірки слід брати до уваги багато параметрів: робочий діапазон довжин хвиль, оптичну потужність, діапазон керуючої напруги, частота модуляції, діелектричні втрати та ін.

Але на практиці виникають обмеження, пов'язані з ємкістю комірки і проблемами створення відповідних генераторів керуючої напруги (драйверів) для роботи на високих частотах (до 1 ГГц). Слід мати на увазі, що ЕО коефіцієнти зменшуються на високих частотах.
До недоліків, що певною мірою обмежують вживання $LiNbO_3$ у комірках Покельса відноситься порівняно невисока променева міцність (близько 250 МВт/см^2 λ= 1064 нм, 10 нс), а також наявність значного п'єзоефекту в цьому кристалі, що наводить до необхідності демпфування механічних резонансів ЕО комірки [19,24-26, 28, 31].

2.4 Розробка генератора напруги електрооптичного модулятора

Електрооптичні пристрої вимагають відносно високої напруги, як правило, порядку кіловольт для поздовжніх пристроїв і від однієї до декількох

сотень вольт для поперечних пристроїв. У стандартній схемі модуляції добротності твердотільного лазерного випромінювача АІГ, для подачі керуючої напруги на кристал модулятора використовувались схеми драйверів із критроном (рисунок 2.5) [8, 32 - 34].

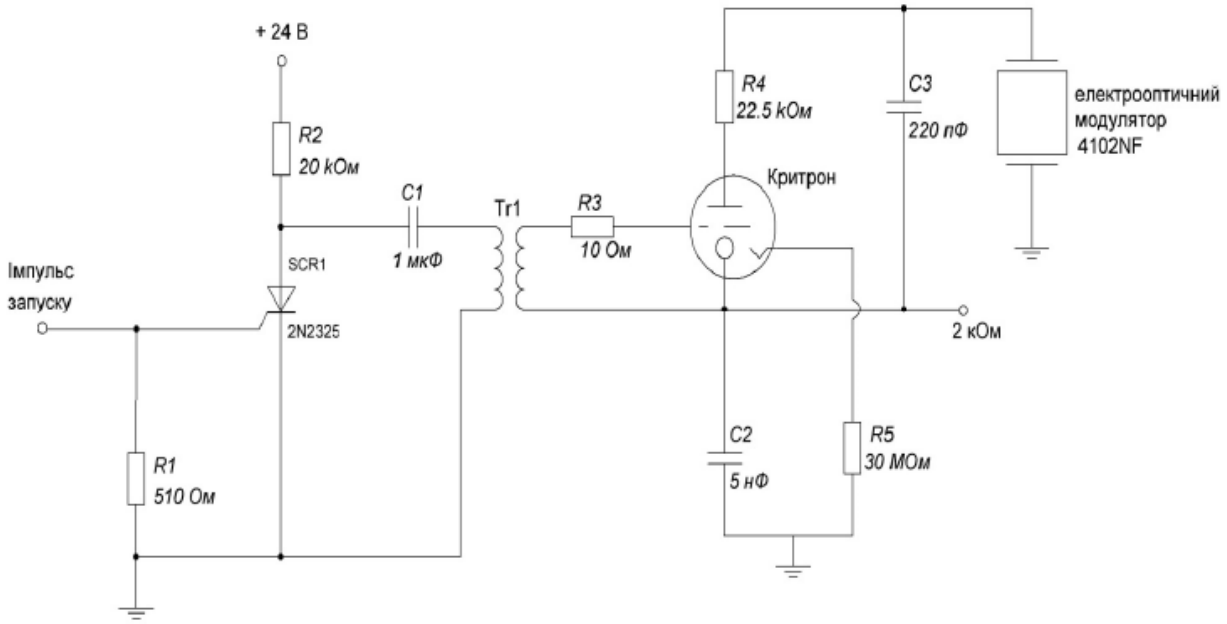


Рисунок 2.5 - Електрична схема модулятора на критроні

Критрон – газонаповнена трубка, яка використовує дуговий розряд для перемикання напруги в діапазоні від 3 до 7 кіловольт. Керуючий імпульс, який ініціює роботу комутатора, подається через тиристор і трансформатор. Ця схема може перемикати електрооптичний модулятор світла на основі комірки Поккельса зі швидкістю в наносекундному діапазоні [34].

Зважаючи на унікальність критрона, у якості модулюючого пристрою використовуємо базову функціональну схему живлення високовольтної апаратури яка представлена на рисунку 2.6. із заміною критрона на MOSFET транзистор [35].

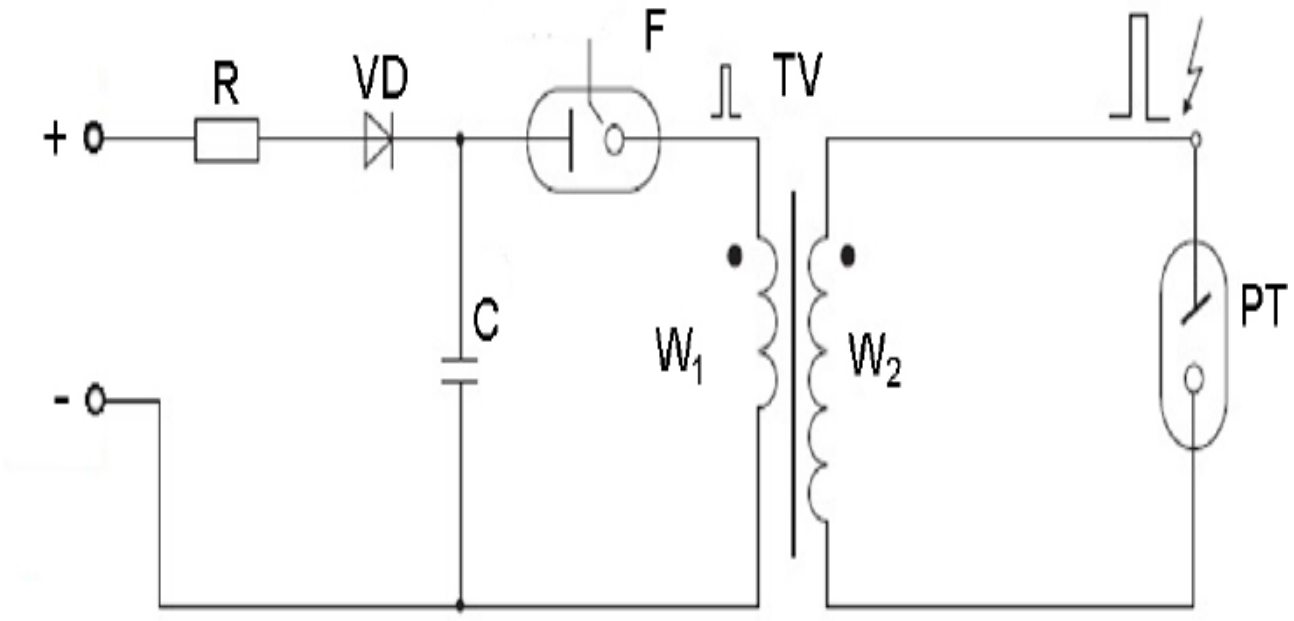


Рисунок 2.6 - Базова схема високовольтного модулятора

У схемі джерело постійної напруги через струмообмежувальний резистор R і блокуючий діод VD заряджає конденсатор C. Імпульс напруги на первинній обмотці W1 імпульсного підвищувального трансформатора TV формують відкриванням швидкісного комутатора F [35].

У цій схемі в якості швидкісного комутатора використовуємо MOSFET транзистор IRF2807 із наступними характеристиками [36]:

Максимальна потужність, що розсіюється (Pd): 230 Вт

Гранично допустима напруга стік-витік |Uds|: 75 В

Гранично допустима напруга затвор-витік | Ugs |: 20 В

Порогова напруга включення | Ugs (th) |: 4 В

Максимально допустимий постійний струм стоку | Id |: 82 А

Максимальна температура каналу (Tj): 175 °C

Загальний заряд затвора (Qg): 160(max) нКл

Час зростання (tr): 64 нс

Вихідна ємність (Cd): 610 пФ

Опір стік-витік відкритого транзистора (Rds): 0.013 Ом

Тип корпусу: TO220AB

Остаточна схема представлена на рисунку 2.7.

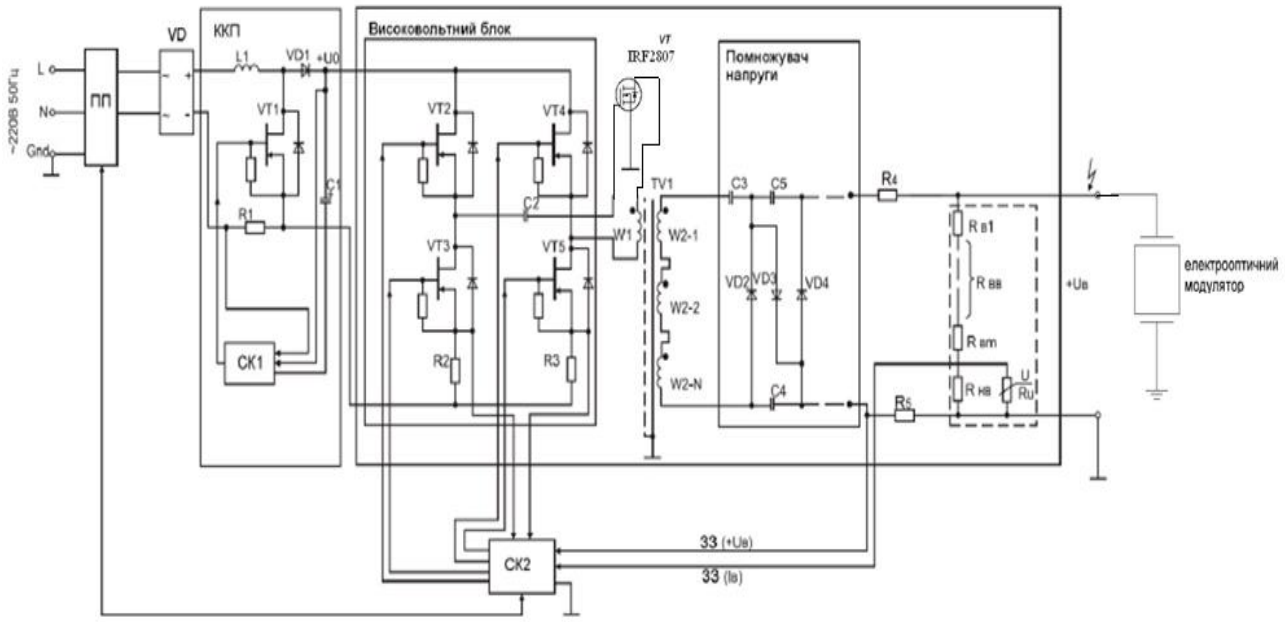


Рисунок 2.7 – Схема модулятора на MOSFET транзисторі

Схема використовує живлення від мережі однофазного змінного струму. У схемі використано активний коректор потужності і регульований мостовий інвертор. Вказана схема може забезпечити вихідну потужність 3-5 кВт. Коректор потужності виконано на основі підвищувального перетворювача з системою керування СК1. Інвертор виконано по мостовій схемі на транзисторах VT2-VT5. На виході трансформатора інвертора TV1 встановлено помножувач напруги на конденсаторах C3-C5 і діодах VD2-VD4. На виході перетворювача встановлені давачі напруги і струму [37-40].

2.4.1 Моделювання зміни напруженості електричного поля у кристалі DKDP

У роботі було проведено моделювання параметрів електрооптичного кристала, що використовувався у якості модулятора.

Згідно принципу схрещених поляризаторів за формулою (2.1) порводимо розрахунок зміни напруженості електричного поля у кристалі DKDP. Зміна амплітуди електричного поля описується виразом [26-28].

$$E_{\min} = E_0 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), \qquad (2.2)$$

де δ - різниця фази (фазовий зсув0 між компонентами поля з різною поляризацією, E_0 - амплітуда світлової хвилі з вихідної поляризацією на виході середовища.

Фазовий зсув розраховуємо наступним чином [26-28]:

$$\delta = \frac{2\pi l}{\lambda}\Delta n, \qquad (2.3)$$

де l - довжина середовища, λ-довжина хвилі світла у вакуумі, Δn-зміна показника заломлення.

Тоді зміна інтенсивності світла після аналізатора буде мати вигляд [26-28]:

$$I_{\min} \infty E_0^{\,2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \infty I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right), \qquad (2.4)$$

де I_0 - інтенсивність світла з вихідною поляризацією на виході середовища за відсутності поля.

Підставляючи в формулу (2.4) вираз (2.2) з урахуваннями змін з формули (2.3), отримаємо вираз змін інтенсивності для ефекту Покельса [26-28]:

$$I_{\min} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3}{2\lambda} E\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi l r_{63} n^3 U}{2\lambda d}\right) \qquad (2.5)$$

При повздовжньому електрооптичному ефекті різниця фаз між ортогональними компонентами:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n'_x - n'_y)d = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} n_0^3 U\ , \qquad (2.6)$$

де U – напруга, що прикладена до кристала; d – товщина кристалічної пластинки; r_{63} – електрооптичний коефіцієнт; n_0 – показник заломлення звичайного променя вздовж головних осей кристала.

На підставі розрахункових формул в математичному редакторі Mathcad будуємо залежність фазового зсуву між компонентами електричного поля з різними поляризаціями від амплітуди електричного поля. Результат моделювання представлено на рисунку 2.8 [26-28].

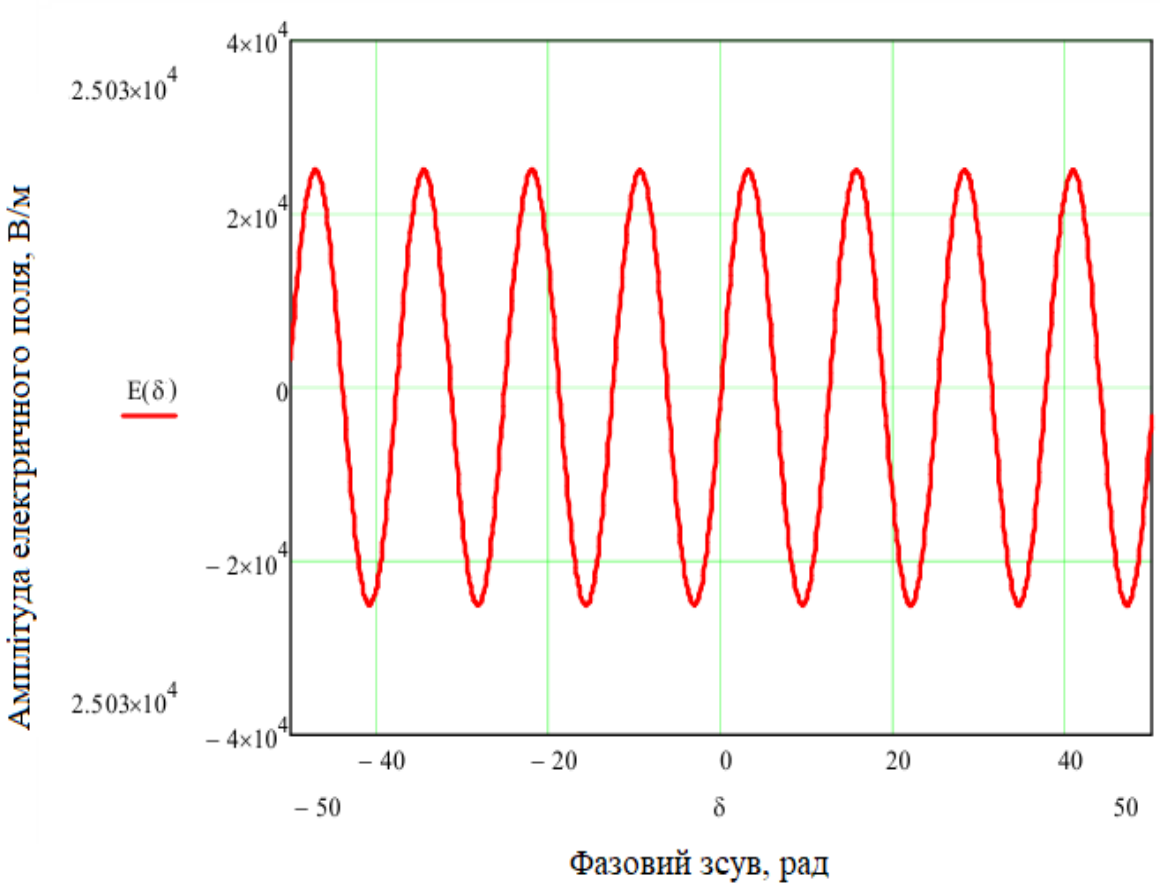


Рисунок 2.8 - Залежність фазового зсуву між компонентами електричного поля з різними поляризаціями від амплітуди електричного поля у кристалі DKDP

2.4.2 Моделювання функціональності блоку генератора напруги електрооптичного модулятора на кристалі DKDP

На проміжному етапі розробки було проведено моделювання функціональності блоку генератора напруги електрооптичного модулятора на кристалі DKDP. У якості моделі використовували режим іскрового розрядника. Моделювання проводили у демо версії редактора САПР Proteus [41,42].

На рисунку 2.9. представлені результати моделювння [41,42].

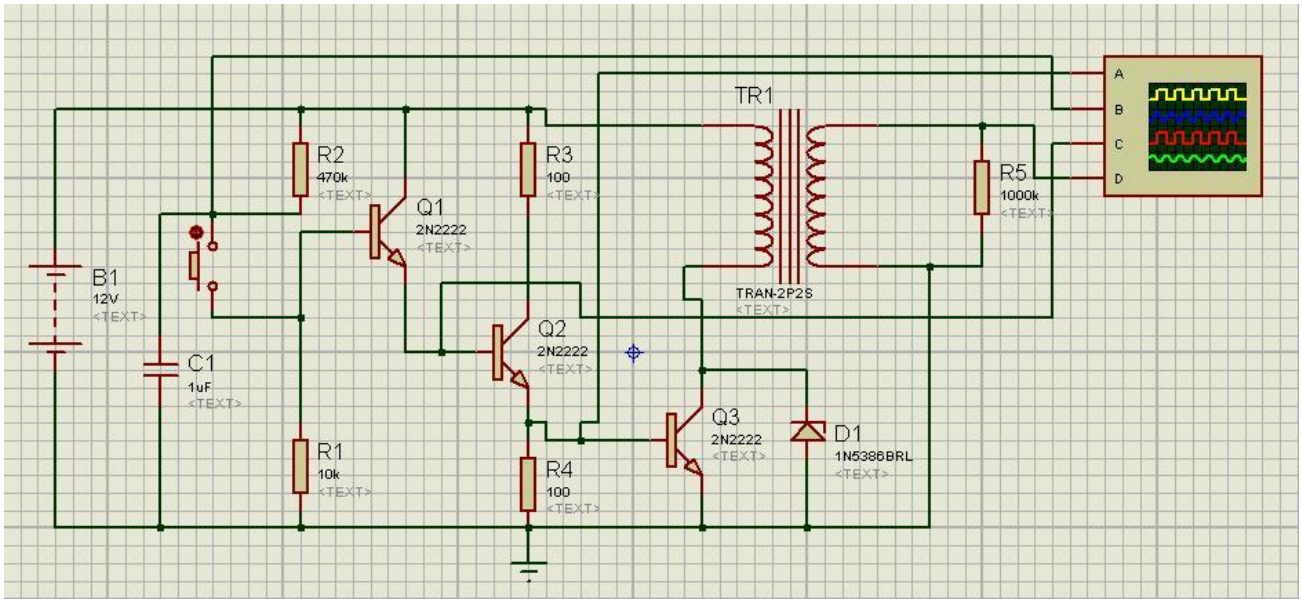


Рисунок 2.9 - Моделювання функціональності блоку генератора напруги

Як видно із діаграми, форма і параметри сигналу добре узгоджуються із результатами теоретичного розрахунку, представленими у п.п. 2.4.1.

2.5 Розрахунок параметрів фотодіода системи реєстрації

Виходячи із специфічних завдань розроблюваної системи - використання у пристроях та засобах квантової криптографії, у якості джерела випромінювання використовуємо лазерне випромінювання видимого та інфрачервоного діапазону 600 – 1100 нм [43,44]).

Тому, для ефективної реєстрації поляризованих фотонів використовуємо лавинні фотодіоди у режимі реєстрації одиночного фотона (режим Гейгера), коли робоча напруга перевищує величину пробійної [45,46].

Однак, при реалізації режиму Гейгера повинен існувати обмежуючий механізм, який контролює електронну лавину і сприяє поверненню в початковий стан, а також запобігає помилковому спрацьовуванні детектора. Такий механізм реалізується двома способами:

1) шляхом зменшення величини напруги нижче значення напруги пробою відразу після початку або під час реєстрації електронної лавини;

2) шляхом використання режиму роботи, коли повідомляє прибуття фотона і напруга зсуву стає більше напруги пробою тільки на короткий проміжок часу, достатній для реєстрації фотона.

Останній режим найбільш ефективний в боротьбі з темновими відліками, але він не вирішує проблеми посляімпульсів, коли відбувається спрацьовування фотодетектора при перевищенні робочої напруги вище напруги пробою в відсутності фотона. Явище послеімпульсів може бути викликано термічним збудженням, туннелюванням і ефектом емісії захоплюючих центрів. Для запобігання даного ефекту необхідно зниження температури приладу і збільшення часу релаксації [19, 31, 33, 45,46].

На рисунку 2.10 представлений принцип конструювання системи реєстрації на лавинному фотодіоді [31, 33, 45]. Типова схема включення лавинного фотодіода представлена на рисунку 2.11 [31, 33, 45].

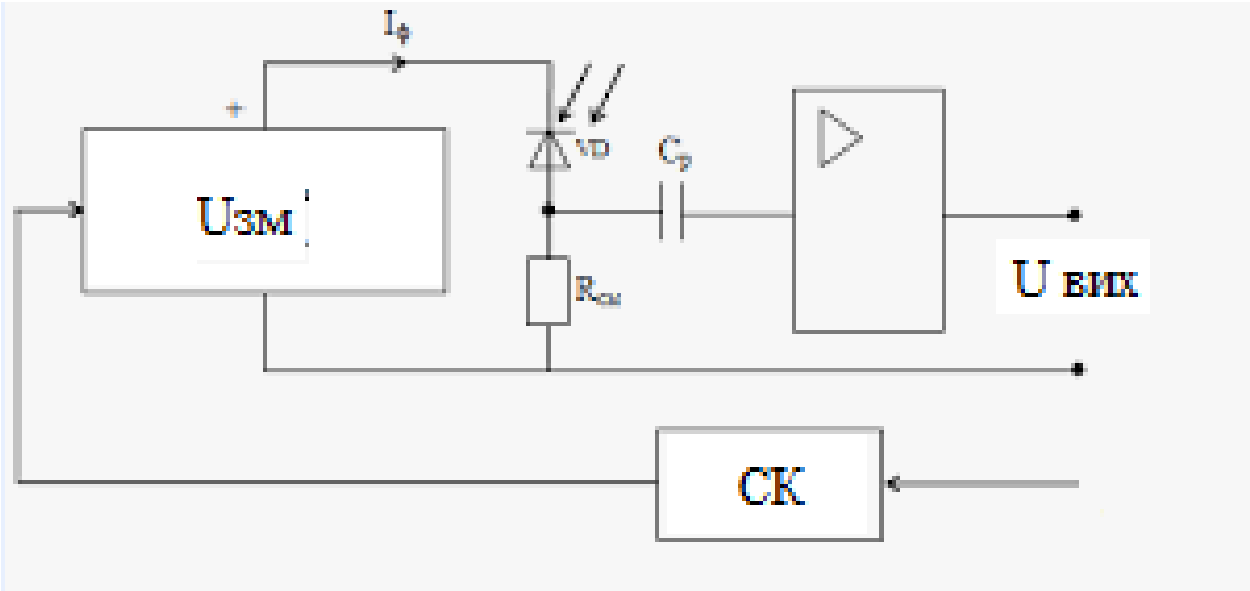


Рисунок 2.10 - принцип кнструювання системи реєстрації на лавинному фотодіоді: Uзм – регульоване джерело напруги зміщення, СК – схема керування

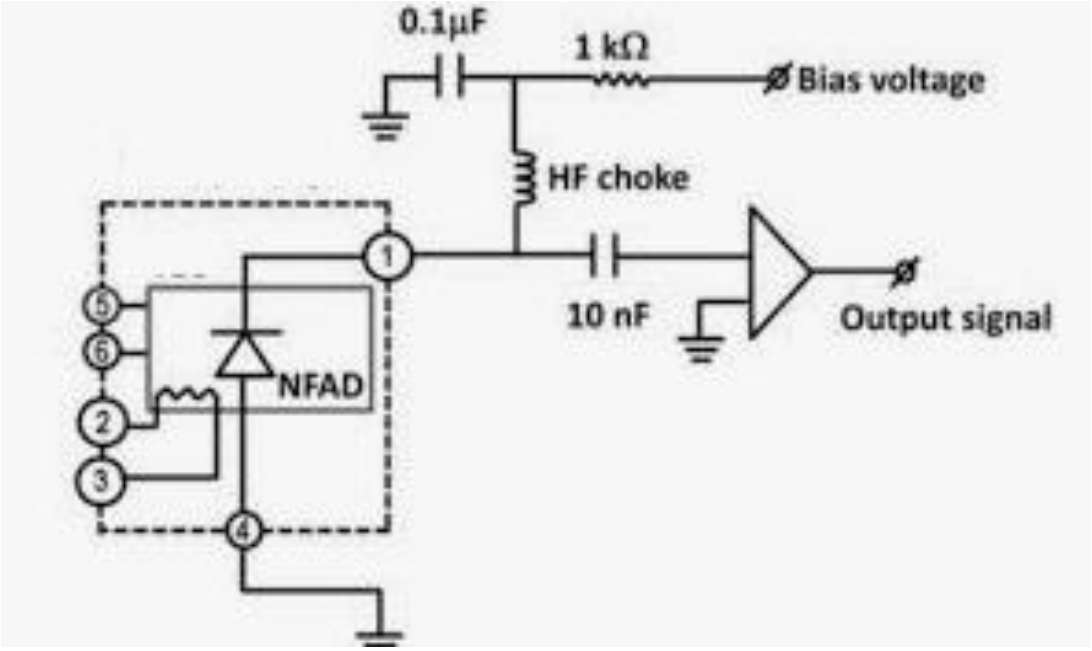


Рисунок 2.11 – Принцип включення лавинного фотодіода типова схема

У роботі використовуємо фотодіод серії S3590 фірми HAMAMATSU [47]. На рисунку 2.12 представлені спектральні характеристики фотодіодів виробника [47].

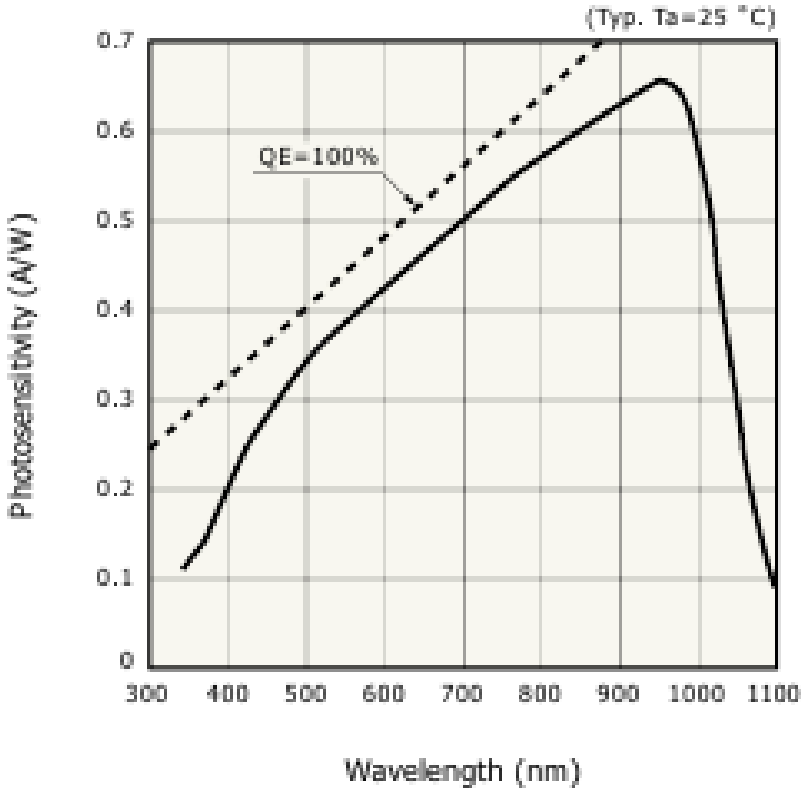


Рисунок 2.12 – Спектральні характеристики фтодіодів фірми HAMAMATSU

На рисунку 2.13 представлений зовнішній вигляд фотодіода S3590 Hamamatsu, а в таблиці 2.3 основні характеристики [47].

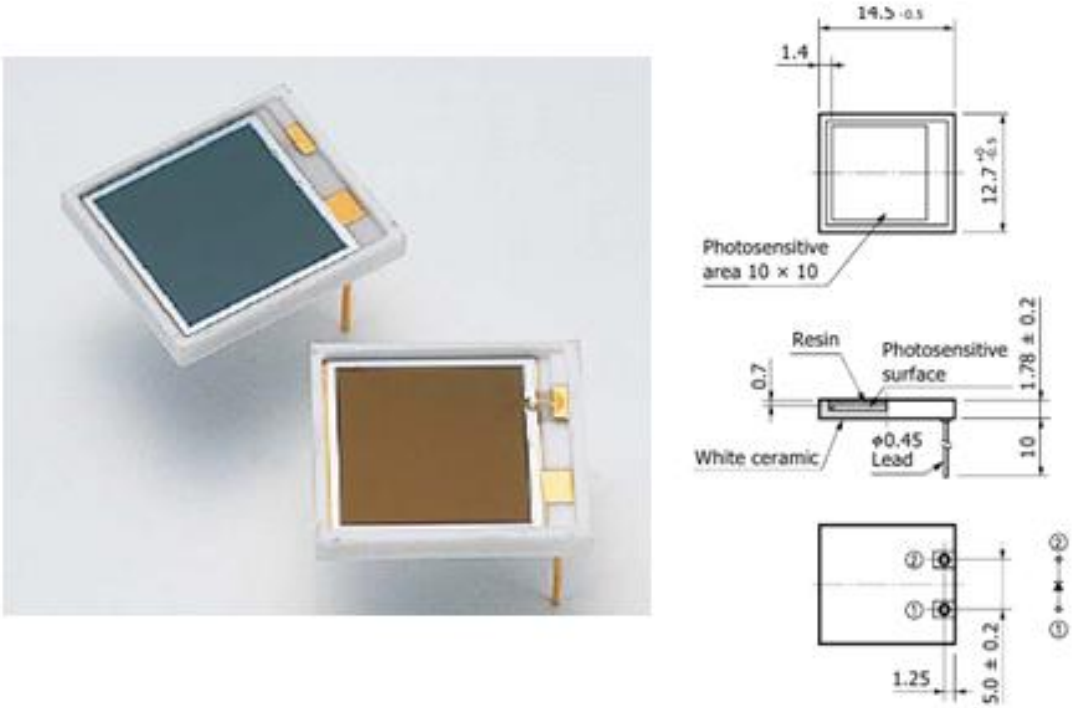


Рисунок 2.13 - Фотодіод S3590 Hamamatsu

Таблиця 2.3 - Основні характеристики фотодіода S3590 Hamamatsu

Матеріал / Тип	Si
Спектральний діапазон мін. нм	340 нм
Спектральний діапазон макс. нм	1100 нм
Корпус / Виконання	кераміка
Пік спектрального діапазону, нм	960 нм
Розмір фоточутливої поверхні	10 × 10 мм
Кількість елементів	1
Охолодження	без охолодження
Макс. зворотна напруга	100 В
Типова фоточутливість	0.66 А/Вт
Макс. темновий струм	6000 пА
Гранична частота (тип.)	40 МГц
Еквівалентна потужність шуму	3.8×10^{-14} Вт/Гц$^{1/2}$
Термінальна ємність	40 пФ

На рисунку 2.14 представлена рекомендована виробником схема підключення лавинних фотодіодів

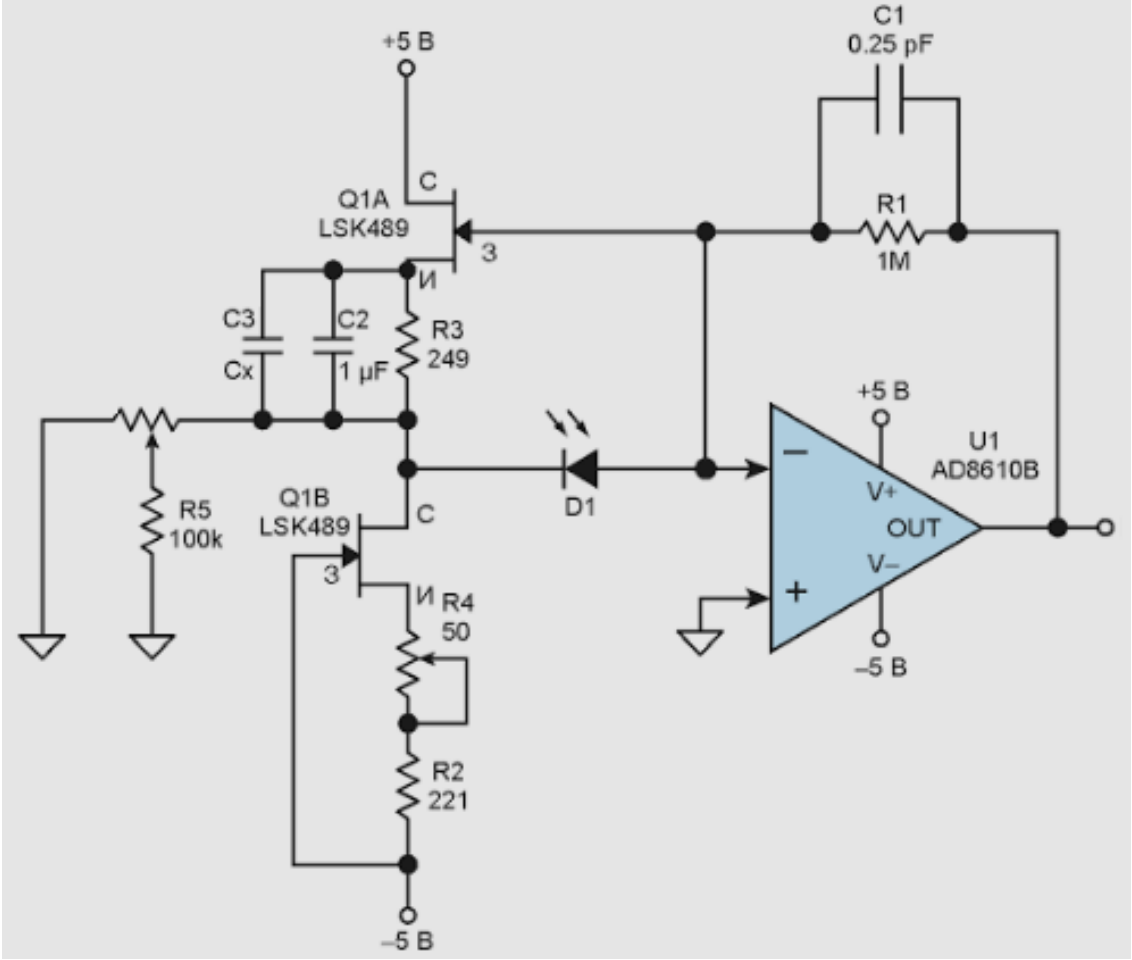


Рисунок 2.14 – Типова схема підключення лавинних фотодіодів

У роботі було проведено оделювання функціональності схеми підключення фотодіода S3590. Моделювання проводилось в on-linecимуляторі программи САПР електроніки Mltisim [48]. Результати моделювання представлені на рисунку 2.15.

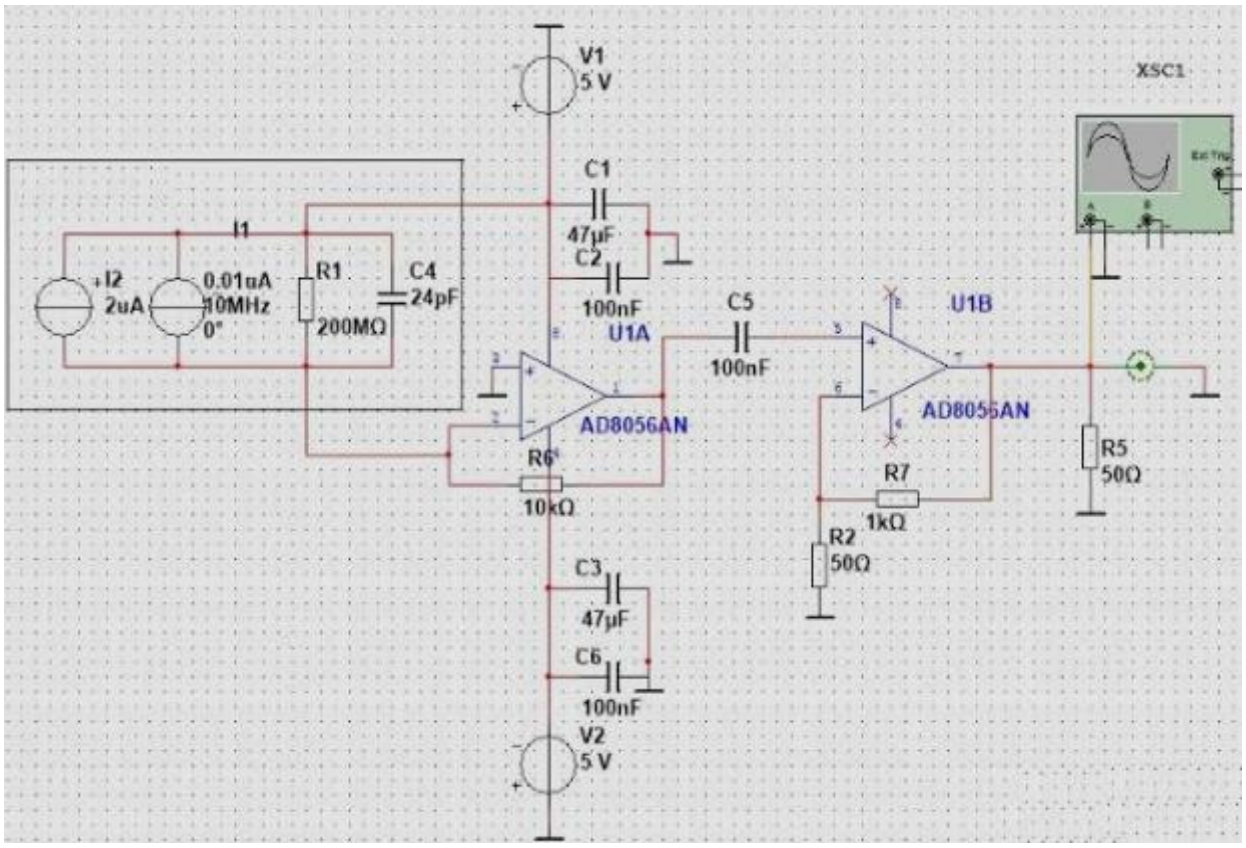


Рисунок 2.15 - Моделювання фотодіода S3590

Покази осцилографа фіксують наявність зареєстрованого сигналу.

2.6 Мікроконтролерний блок реєстрації і обробки сигналів однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Враховуючи те, що розроблювана система буде частиною квантово-інформаційного комплекса із величезним масивом даних, обчислень складного рівня, використання мікроконтролерного блоку реєстрації і обробки сигналів на малопотужних мікросхемах буде нераціональним. Тому, базою для мікроконтролерної системи пропонується використати мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 (на прикладі моделі B), побудованій на (SoC) Broadcom BCM2835з процесором ARM1176JZF-S з наступними характеристиками [49-56]:

Процесор: система Broadcom BCM2835, ARM1176JZF-S, 700 МГц

Оперативна пам'ять: 512 МБ

Мережа: 10/100 Ethernet

USB: 2 x USB 2.0

Відеовихід: HDMI

Аудіовихід: 3.5 мм аудіо/відео

Накопичувач: Картка MicroSD (до 16 ГБ)

Живлення: 5 В, до 1800 мА

Розміри плати: 85 × 54 мм.

На рисунку 2.16 представлений мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 моделі B з процесором ARM1176JZF-S [55,56].



Рисунок 2.16 - Мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 моделі B з процесором ARM1176JZF-S

На рисунку 2.17 преставлена архітектура процесора ARM1176JZF-S [56-58].

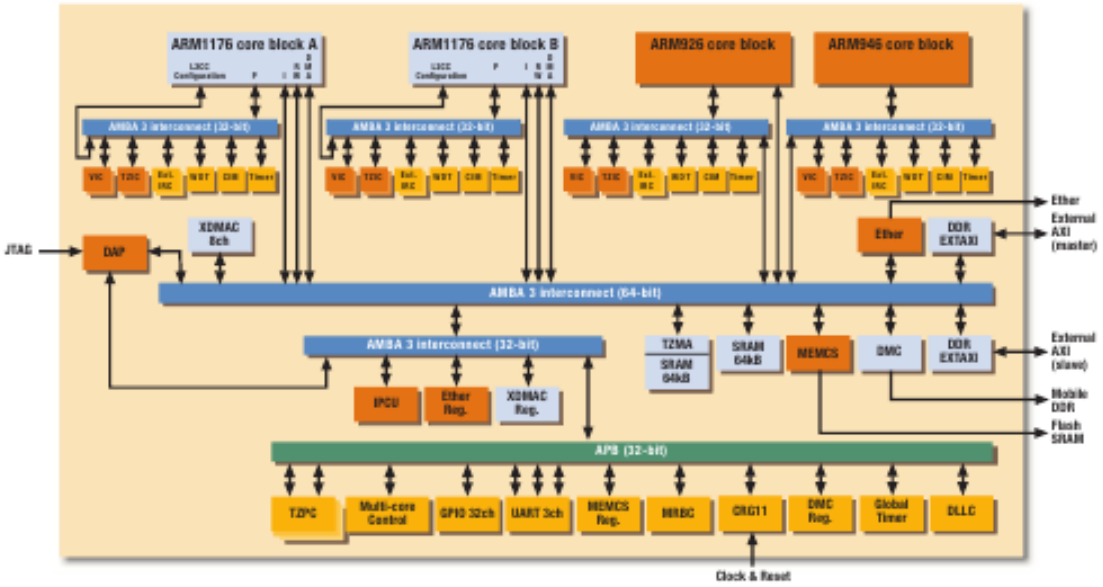


Рисунок 2.17 - Архітектура процесора ARM1176JZF-S

На рисунку 2.18 представлена схема мінікомп'ютера Raspberry Pi 1 на (SoC) Broadcom BCM2835з процесором ARM1176JZF-S [56-58].

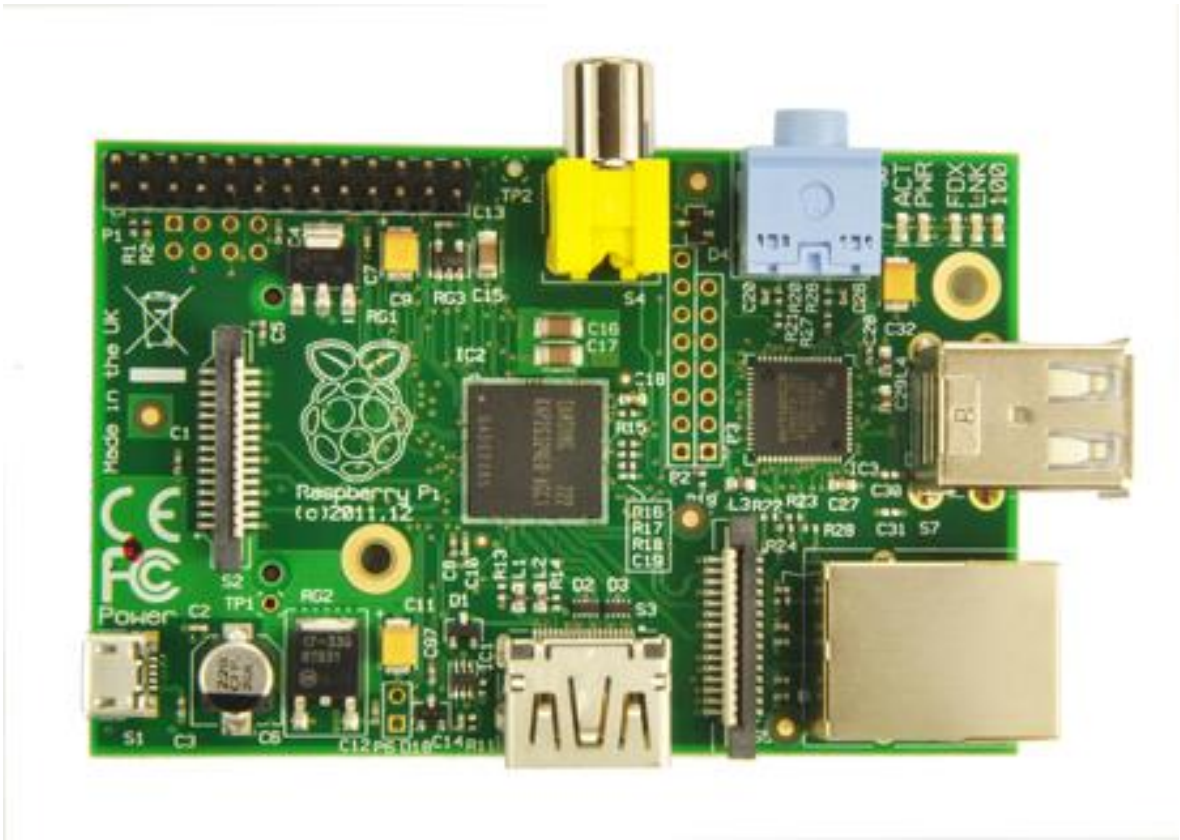


Рисунок 2.18 - Схема мінікомп'ютера Raspberry Pi 1 на (SoC) Broadcom BCM2835

На рисунку 2.19 представлена структурна схема з’єднь Broadcom BCM2835 із зовнішніми пристроями [56-58].

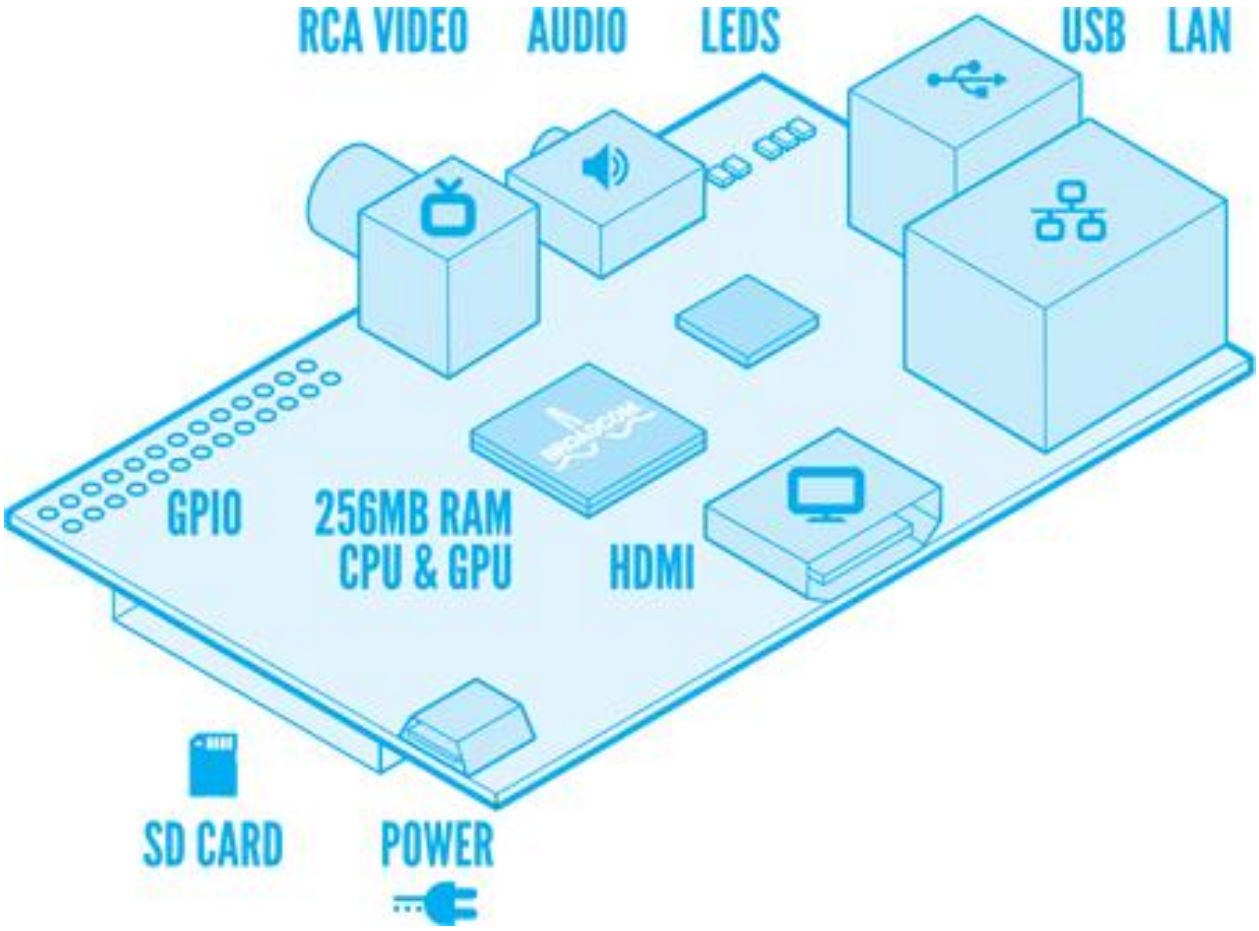


Рисунок 2.19 - Схема з’єднь Broadcom BCM2835 із зовнішніми пристроями

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) на підставі аналізу існуючих поляризаційних схем, обрано оптоволоконну поляризаційну систему однофотонної реєстрації в діапазоні випромінювання 300 – 1100 нм;

2) для забезпечення стабільного оптичного каналу у схемі використовується спеціальне одномодове волокно типу Panda;

3) для створення стійких станів поляризації у роботі застосовано електрооптичну модуляційну систему на нелінійно-оптичному кристалі дигідрофосфат калію KH_2PO_4 (DKDP), який має відповідні до завдань розробки параметри;

4) для забезпечення ефективного функціювання електрооптичного модулятора розроблено високовольтне джерело напруги із керуючим елементом на MOSFET транзисторі;

5) для ефективної реєстрації поляризованих фотонів використовуємо лавинний фотодіод серії S3590 фірми HAMAMATSU у режимі реєстрації одиночного фотона (режим Гейгера);

6) базою для мікроконтролерної системи пропонується використати мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 (на прикладі моделі B), побудованій на (SoC) Broadcom BCM2835з процесором ARM1176JZF-S;

7) у роботі було проведено моделювання функціональних блоків та параметрів системи за допомогою редакторів САПР електронної техніки – online-симуляторів Proteus, Multisim та математичного редактора Mathcad. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками.

3 Техніко-економічне обґрунтування розробки однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Для вибору технології виготовлення схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [59].

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою

Технологія		Короткий опис
A	Технологія печатних плат на фольгованому текстоліті	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано травленням фольгованого текстоліту.
B	Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з’єднання виконані у вигляді товстих композитних плівок.
C	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з’єднання виконані у вигляді тонкіх плівок провідних та резистивних матеріалів.
D	Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано у вигляді тонких плівок.

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.

Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (табл. 3.3) [59].

У матриці прийняті наступні позначення: *i* – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (табл. 3.3) *i* = 1, 2, 3, 4, 5, 6; X_i - локальний пріоритет, тобто відносна вага і-го критерію в глобальному критерії:

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^{6}\omega_i}$	X_i
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
∑							9,033	1,00

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (табл. 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію , то i = 1, 2, 3, 4.

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}},$$

де $\sum$ - сума по стовпці $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$.

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкодія»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	3	1/5	1	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
∑					6,07	1,00

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
∑					5,37	1,00

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
∑					6,41	1,00

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
∑					4,73	1,00

Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
∑					5,88	1,00

Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
∑					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (табл. 3.10) [59].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта реалізації схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання, з використанням технології печатних плат на фольгованому текстоліті.

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Печатних плат на фольгованому текстоліті	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

За допомогою методу аналізу ієрархій проведене порівняння чотирьох типів технологій реалізації схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (табл. 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології печатних плат на фольгованому текстоліті. Проте найбільший глобальний пріоритет мають технологія тонкоплівкових гібридних мікрозборок та печатних плат на фольгованому текстоліті. Саме технологія печатних плат на фольгованому текстоліті й буде використовуватися для виготовлення схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання.

3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Витрати на матеріали і напівфабрикати вказані в таблицях 3.11, 3.12. Витрати на матеріали і напівфабрикати склали 31751,50 грн.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів на виробництво однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Оптоволокно типу Panda	м	1	422,50	422,50
Лазерний поляризаційний фільтр	шт.	2	300,00	600,00
Дигідрофосфат калію (DKDP)	шт.	1	15000,00	15000,00
MOSFET транзистор IRF2807	шт.	2	77,00	154,00
фотодіод S3590 HAMAMATSU	шт.	1	12500,00	12500,00
Мінікомп'ютер Raspberry Pi 1	шт.	1	1450,00	1450,00
Високовольтні діоди	шт.	6	40,00	240,00
Польові транзистори	шт.	5	40,00	200,00
Високовольтні конденсатори	шт.	4	40,00	160,00
Резистори	шт.	15	10,00	150,00
Трансформатор інвертора	шт.	1	200,00	200,00
Всього				31076,50

Таблиця 3.12 – Розрахунок вартості напівфабрикатів

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Фольгований текстоліт 100 × 100	шт.	1	38,00	38,00
Припій паяльний	шт.	1	75,00	75,00
Флюс паяльний	шт.	1	70,00	70,00
Травильник	уп. (100 г)	1	55,00	55,00
Трафарет	шт.	2	63,00	126,00
Очищувач плат	шт.	1	70,00	70,00
Лак електроізоляційний	шт.	1	93,00	93,00
Вода дистильована	шт. (1 л)	1	28,00	28,00
Папір А4 для оформлення технічної документації	уп.	1	120,00	120,00
Всього				675,00

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці однофотонної системи реєстрації поляризованого випромінювання

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення ІННІ ім Ю.М. Потебні ЗНУ належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте використання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі небезпечній для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [60,61].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирково-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Тривала робота перед екраном монітора наводить до різних функціональних розладів організму, не говорячи вже про неймовірне навантаження на очі. Захворювання, викликані травмою навантажень, що повторюються, не виявляються відразу, це нездужання, що поступово накопичуються. У цьому їх небезпека. В основному страждають кисті, зап'ястя, плечі, шийна область [60,61].

У виникненні хвороб такого роду найчастіше винні: погана ергономіка робочих місць, дуже високо розташована клавіатура, непідходяще крісло, незнання основних правил роботи за комп'ютером. Правила, що стосуються освітлення в приміщенні і на робочому місці, мікроклімату, розташування клавіатури прості:

- повна тривалість робочого часу, проведеного за екраном монітора із захисним екраном, для дорослого користувача не повинна перевищувати 4 години за 8-годинний робочий день;

- не рекомендується працювати на клавіатурі безперервно більше 30 хвилин, кожну годину необхідно робити п'ятихвилинну перерву, а кожні дві години - 15-хвилинний, причому краще покинути робоче місце, влаштувати розминку для пальців, зробити просту гімнастику для очей;

- для устаткування робочого місця краще використовувати спеціальні столи і стільці, що дають можливість регулювати положення всіх вузлів, - висоти столу, полички для клавіатури, крісла користувача;

- висоту клавіатури слід відрегулювати так, щоб кисть розташовувалася прямо;

- спина має бути пряма, кут між стегнами і хребтом - теж прямий, для чого слід підібрати таке крісло, спинка якого здатна підтримувати спину користувача.

- монітор слід розташувати так, щоб нижній рівень екрану знаходився на 20…25 см нижче за рівень очей, а рівень верхньої кромки розташовувався на висоті лоба, від екрану монітора до очей має бути не менше 75…120 см.

- відстань між столами з комп'ютерами - не менше 1,5 метрів, між моніторами - не менше 2,2 метрів.

- екран комп'ютера краще розташувати під прямим кутом по відношенню до вікон, які необхідно завісити або закрити жалюзі.

4.3 Виробнича санітарія

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є допоміжною, температура, відносна вологість і швидкість руху повітря на робітниках повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень, що діють [60,61].

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є основною (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабінети і пости управління, зали обчислювальної техніки і ін.) повинні забезпечуватися оптимальні параметри мікроклімату відповідно до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Оптимальні норми мікроклімату для приміщень з відеотерміналами і персональними комп'ютерами

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С (не більше)	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Легка – 1а	22-24	40-60	0.1
	Легка – 1б	21-23	40-60	0.1
Теплий	Легка – 1а	23-25	40-60	0.1
	Легка – 1б	22-24	40-60	0.2

До категорії 1а відносяться роботи, вироблювані сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких витрата енергії складає до 120 ккал/ч. До категорії 1б відносяться роботи, вироблювані сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і такі, що супроводжуються деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/ч

При монтажі компонентів на плату і формуванні топологічного рисунка струмопровідного шару виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що обертаються в технологічному процесі, і матеріалів. Всі речовини, що забруднюють повітря, надають шкідливу дію, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину (ГДК). У виробництві плат застосовують певні речовини, які шкідливі для організму. Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюється залежно від гранично допустимої концентрації речовин в повітрі робочої зони. Це та концентрація яка переноситься без відхилень від нормального полягання в перебігу робочого дня при щоденному диханні. Згідно СН 245-71 встановлюють чотири класи шкідливих речовин: 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні; 2-й клас – речовини високо небезпечні; 3-й клас – речовини помірно небезпечні; 4-й клас – речовини мало небезпечні. Дія токсичних речовин виявляється в гострих і хронічних отруєннях.

При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

У таблиці 4.2 [60,61] приведені гранично допустимі концентрації небезпечних речовин, вживаних при монтажі елементів, згідно СН 245-71.

Таблиця 4.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Речовини	ГДК, мг/м^3
Ацетон	30
Каніфоль	150
Олово	90
Спирт	1000

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нервово-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливний витяжній вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рис. 4.1).

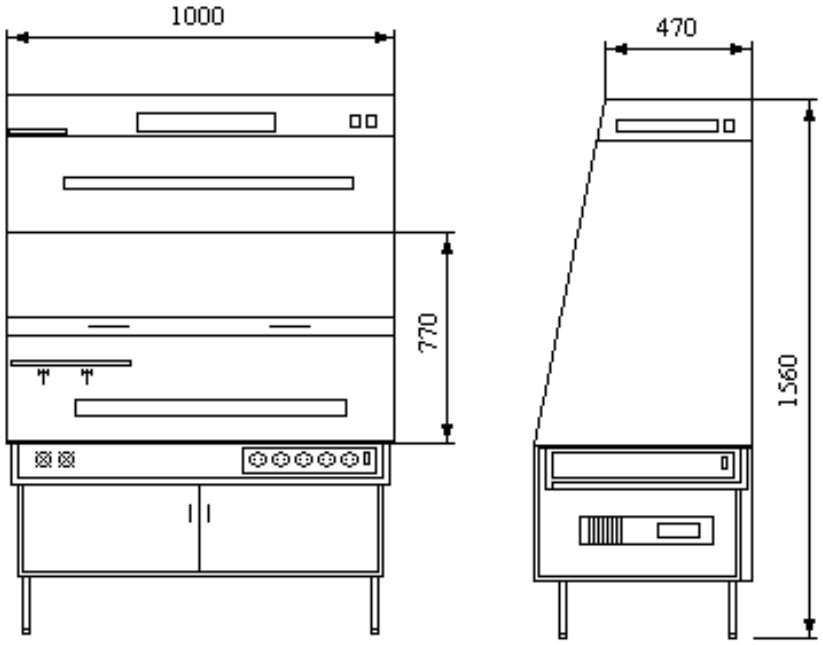


Рисунок 4.1 – Витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням

4.4 Електробезпека

Дія електричного струму на організм людини може бути теплова, хімічна і біологічна. При дії електричного струму на організм людини можуть бути два види поразки: електричні удари і електричні травми. Часто ці види супроводять один одному [60,61].

Захистом від дотику до струмопровідних частин електроустановок є ізоляція дротів, обгороджування, блокування і захисні засоби. Захистом від напруги, що з'явилася на корпусах електроустановок в результаті порушення ізоляції, є захисне заземлення, занулення і захисне відключення.

Захисне заземлення влаштовується в мережах з ізольованою нейтраллю. Воно є навмисним з'єднанням із землею неструмопровідних металевих частин електроустановок.

Захисне заземлення необхідне для зниження напруги відносно землі до безпечної величини на металевих корпусах електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але що виявилися під таким в результаті пошкодження ізоляції.

При зниженні напруги на корпусах відносно землі струм, що проходить через людину, що стосується корпусу, знижується до безпечної величини (10 мА).

На ділянці проведення експерименту в лабораторії застосовується електроустаткування до 220 В. Електроживлення здійснюється від розподільних щитів за допомогою комутуючих автоматів, що виробляють захист того або іншого об'єкту.

Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної безпеки.

Відповідно до ПЗП приміщення лабораторії відносять до класу по пожежобезпеці П-11 а. Міра захисту електроустаткування 1 Р44.

Прокладка сполучних дротів здійснюється в трубах, що забезпечує надійний захист від механічних пошкоджень дротів [60,61].

4.5 Пожежна безпека та техногенна безпека

Приміщення, де виробляється травлення печатних плат, відноситься до вибухонебезпечного, оскільки водень, що виділяється при травленні, з атмосферним киснем утворює вибухонебезпечну суміш. Проте це може статися лише при відключенні вентиляції, тобто при аваріях. Отже, приміщення відноситься до класу В-Іа. По мірі пожежної безпеки дане виробництво згідно СНіП 11-90-81 може бути віднесене до категорії Д, оскільки характеризується наявністю речовин, що лише не згорають, і матеріалів в холодному стані [60,61].

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні

електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться лабораторія, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно СНіП 11-90-81, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість просування людей при евакуації – 16 м/хв [61].

Згідно ПУЕ, будівля, в якій знаходиться лабораторія по захисту від блискавки, відноситься до категорії С і захищається від прямих ударів блискавок, і від занесення високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації, їх приєднують при введенні в захищаємий об'єкт до заземлення електроустаткування. Отже, грозозахист засновано на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж в лабораторії необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж при на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафках, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожежі горючих матеріалів, що починається, а також горючих рідин використовується ручний пінний вогнегасник ОХП-10. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8, в кількості двох вогнегасників на кожну установку. Існують пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожеж-

ної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації.

Визначимо технічні і організаційні заходи в лабораторії того, що труїть печатних плат. До технічних заходів відносяться протипожежні заходи, вживані лабораторії:

- територію лабораторії необхідно постійно містити в чистоті, горюче сміття повинне систематично віддалятися на спеціально відведені ділянки і у міру накопичення вивозитися;

- всі струмопровідні частини, розподільні пристрої, рубильники і інші пускові апарати вмонтовуються на негорючих підставах (мармур, текстоліт, гетинакс, азбест, і тому подібне);

- вимір опору ізоляції електромережі проводиться не рідше два раз на рік. Несправні ділянки знеструмлюються і замінюються новими;

- вся електрична апаратура, встановлена в лабораторії, виконується вибухозахищеною;

- для усунення можливості проникнення пари і газів з цеху в сусідні приміщення виводи дротів крізь стіни робляться із застосуванням фарфорових трубок, отвори яких закриваються кислотностійкою мастикою;

- куріння в приміщенні строго забороняється;

- на випадок виникнення пожежі необхідно передбачити можливість евакуації людей. Евакуаційні дороги повинні забезпечувати евакуацію всіх людей, що знаходяться в приміщенні лабораторії протягом необхідного часу. Число евакуаційних доріг не менше два. Кількість та розміри евакуаційних виходів з будівель і приміщень, їхні конструктивні й планувальні рішення, умови освітленості, забезпечення незадимленості, протяжність шляхів евакуації, їх облицювання (оздоблення) повинні відповідати протипожежним вимогам будівельних норм.

- евакуаційні шляхи і виходи повинні утримуватися вільними, нічим не захаращуватися і в разі виникнення надзвичайної ситуації забезпечувати безпеку під час евакуації всіх людей, які перебувають у приміщеннях будівель

та споруд, двері на дорогах евакуації навішуються так, щоб відкривалися по направленню виходу з будівлі;

- мінімальна ширина дверей на дорогах евакуації не менше 0,8 м;

- висота переходу на дорогах евакуації не менше 2 м;

- пристрій гвинтових сходів і змінних рівнів на дорогах евакуації не допускається;

- схема евакуації людей ретельно розробляється і вивішується на видних місцях;

- весь трудовий колектив проходить навчання заходам пожежної безпеки.

- у разі розміщення технологічного, експозиційного та іншого обладнання в приміщеннях повинні бути забезпечені евакуаційні проходи до сходових кліток та інших шляхів евакуації відповідно до будівельних норм.

Не допускається:

- влаштовувати на шляхах евакуації пороги, виступи, турнікети, розсувні, підйомні двері, такі двері, що обертаються, та інші пристрої, які перешкоджають вільній евакуації людей;

- захаращувати шляхи евакуації (коридори, проходи, сходові марші і площадки, вестибюлі, холи, тамбури тощо) меблями, обладнанням, різними матеріалами та готовою продукцією, навіть якщо вони не зменшують нормативну ширину;

- забивати, заварювати, замикати на навісні замки, болтові з'єднання та інші запори, що важко відчиняються зсередини, зовнішні евакуаційні двері будівель;

Для оптимального здійснення евакуації з будівель та споруд різного призначення створюються відповідні комісії. Вони скеровуються з Міністерства з надзвичайних ситуацій України.

Основними завданнями комісій з евакуації відповідних суб'єктів господарської діяльності є: розроблення планів евакуації, на випадок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру; організація та

проведення у евакуації; установи чи організації щодо забезпечення проведення евакозаходів; визначення основних напрямів роботи щодо проведення евакозаходів; підготовка і перепідготовка особового складу евакокомісії.

Забезпечення техногенної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності суб'єктів господарювання. Забезпечення техногенної безпеки покладається на відповідних посадових осіб, керівників і уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідними нормативно-правовими або цивільно-правовими актами. Заходи щодо забезпечення техногенної безпеки враховуються органами архітектури, замовниками, забудовниками, проектними та будівельними організаціями при проектуванні та забудові населених пунктів, будівництві, розширенні, реконструкції та технічному переоснащенні потенційно небезпечних об'єктів, установ та організацій.

Відповідні заходи, які обумовлюють стан захищеності населення і об'єктів від негативних наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, повинні виконуватись як окремі розділи або визначатись у розділах інженерно-технічних заходів цивільного захисту та техногенної безпеки до проектів планування та забудови проектів (робочих проектів) ПНО або ОПН, їх будівель та споруд, погоджених зі спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади з питань цивільного захисту і затверджених у порядку, установленому спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади з питань будівництва і архітектури.

У разі оголошення сигналу «Увага! Повітряна тривога!» під час здійснення освітнього процесу (очний формат) дії здобувачів освіти та працівників здійснюються за наступним алгоритмом:

1. При оголошенні сигналу «Увага! Повітряна тривога!» викладач перериває заняття, оголошує маршрут руху та спрямовує всіх здобувачів до укриття в навчальному корпусі. Після виходу всіх здобувачів з аудиторії, закриває її і слідує в укриття.

2. Після надходження сигналу «Увага! Відбій повітряної тривоги!» навчальні заняття відновлюються згідно графіку (розкладу) у запланованому форматі.

При загрозі винекнення надзвичайних ситуацій дотримуватись норм та положень «Інструкції щодо дій в умовах надзвичайних ситуацій в Запорізькому національному університеті»

4.6 Розрахунок електромагнітного випромінювання від моніторів в приміщенні лабораторії

При роботі з ЕОМ на електронно-променевій трубці накопичується статичний заряд. Особливо великий його вплив у момент включення і виключення. При цьому напруженість поля інтенсивно зростає до максимуму, а потім з часом зменшується до умовної стабілізації.

Величина електростатичного поля визначається за формулою [60,61]:

$$E = \frac{(V_E + V_K)}{r} \qquad (4.1)$$

де – Е – напруженість електростатичного поля, V_E – потенціал екрану, V_K – потенціал користувача, r – відстань до монітора.

Згідно з [60,61], розраховуємо напруженість електростатичного поля при V_E=11 кВ, V_K=0,9 кВ на відстані від 0,3 м до 0,7 м.

Розрахунки виконано за допомогою редактора Microsoft Excel. В таблиці 4.3 представлено результати розрахунку залежності напруженості електростатичного поля Е від відстані до монітора r

Таблиця 4.3 – Залежність напруженості електростатичного поля Е від відстані до монітора r

№ п/п	Е, кВ/м	r, м
1	39,67	0,3
2	29,75	0,4
3	23,80	0,5
4	19,83	0,6
5	17,00	0,7

Побудуємо залежність напруженості електростатичного поля від відстані до монітора (рис. 4.2)

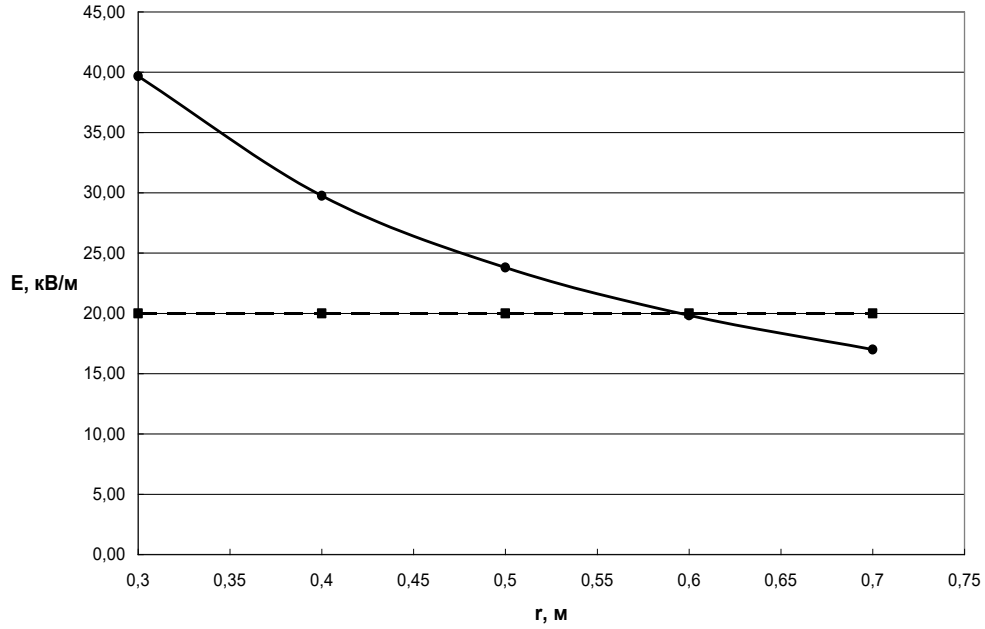


Рисунок 4.2 – Залежність напруженості електростатичного поля від відстані до монітора

Згідно з [60,61], допустимі рівні напруженості електростатичних полів не повинні перевищувати 20 кВ/м протягом години.

За результатами розрахунку визначено за допомогою графічної залежності, що допустима відстань від монітора не повинна бути менше, ніж 0,6 м.

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) на підставі аналізу існуючих поляризаційних схем, обрано оптоволоконну поляризаційну систему однофотонної реєстрації в діапазоні випромінювання 300 – 1100 нм;

2) для забезпечення стабільного оптичного каналу у схемі використовується спеціальне одномодове волокно типу Panda;

3) для створення стійких станів поляризації у роботі застосовано електрооптичну модуляційну систему на нелінійно-оптичному кристалі дигідрофосфат калію KH_2PO_4 (DKDP), який має відповідні до завдань розробки параметри;

4) для забезпечення ефективного функціювання електрооптичного модулятора розроблено високовольтне джерело напруги із керуючим елементом на MOSFET транзисторі;

5) для ефективної реєстрації поляризованих фотонів використовуємо лавинний фотодіод серії S3590 фірми HAMAMATSU у режимі реєстрації одиночного фотона (режим Гейгера);

6) базою для мікроконтролерної системи пропонується використати мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 (на прикладі моделі B), побудованій на (SoC) Broadcom BCM2835з процесором ARM1176JZF-S;

7) у роботі було проведено моделювання функціональних блоків та параметрів системи за допомогою редакторів САПР електронної техніки – online-симуляторів Proteus, Multisim та математичного редактора Mathcad. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках квантово-оптичних інформаційних системах;

2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Перелік посилань

1. Курс загальної фізики. Оптика : хвилі, промені, кванти : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Б. К. Остафійчук [та ін.] ; за ред. чл.-кор. НАН України, проф. Б. К. Остафійчука. Вид. 3-е, переробл. і допов. Івано-Франківськ : Прикарпат. нац. ун-т ім. В. Стефаника, 2011. 664 с.

2. Лопатинський І. Є. та ін.. Фізика. Фізика для інженерів. Підручник Львів : Афіша, 2009, 386 с.

3. Яворський Б. М., Детлаф А. А., Лебедєв А. К. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів / Пер. з 8-го, переробл. і випр., рос. вид. Тернопіль : Навчальна книга Богдан, 2007. 1040 с.

4. Yin, Juan; Cao, Yuan; Li, Yu-Huai; Liao, Sheng-Kai; Zhang, Liang; Ren, Ji-Gang; Cai, Wen-Qi; Liu, Wei-Yue; Li, Bo (16 червня 2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. Science (англ.). Т. 356, № 6343. с. 1140 - 1144.

5. Wang, Xi-Lin 18-Qubit Entanglement with Six Photons' Three Degrees of Freedom. Physical Review Letters. Т. 120, № 26.

6. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : Навч. посібник. За ред. І.М. Кучерука / У трьох томах / Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ : Техніка, 2006, 532 с.

7. Чолпан П. П. Фізика. / Підручник / Київ : Вища школа, 2004, 567 с.

8. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С., Семенець В. В., Курський Ю. С., Неофітний М. В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення: монографія. Харків, 2019. 156 с.

7. Laskin A. V., Bae H., Laskin V. V., Ostrun A. Beam shaping of focused beams for microprocessing applications: conference paper. Icaleo 2014. Paper P 136.

8. Dickey F. M. Laser Beam Shaping. // Optics and Photonics News. 2003. Vol. 14, Issue 4. P. 30 – 35.

9. Andrianov A. V., Kim A. V., Khazanov E. A. A method for measuring the amplitude and phase of ultrashort laser pulses using self-modulation in a Kerr medium and spectral interferometry. // Kvantovaya Elektronika. 2017. Vol. 47, № 3. P. 236 – 244.

10. P. Kohns, J. Schirmer, A. Muravski, S. Yakoverko et al. Birefringence Measurements of Liquid Crystals and an application: An Achromatic waveplateLiq. Crys. 1996. Vol. 21. P. 841 – 846.

11. Tsang W. T. Semiconductors and Semimetals. T. 22, Part D "Photodetectors". Academic Press.

12. Tarof L. E. Planar InP/GaAs Avalanche Photodetector with Gain-Bandwidth Product in Excess of 100 GHz. Electronics Letters. 27 (1) : 34-36.

13. Wu W. Hawkins A. R. Bowers J. E. Park, Yoon-Soo Ramaswamy, Ramu V (ред.). Design of InGaAs/Si avalanche photodetectors for 400-GHz gain-bandwidth product. Proceedings of SPIE. Optoelectronic Integrated Circuits. 3006: 36-47.

14. Campbell J. C. (2007). Recent advances in Telecommunications Avalanche Photodiodes. Journal of Lightwave Technology. 25 (1): 109-121.

15. Kagawa S. Fully ion-implanted p+-n germanium avalanche photodiodes. Applied Physics Letters. 38 (6): 429-431.

16. Hyun Kyung-Sook Park, Chan-Yong Breakdown characteristics in InP/InGaAs avalanche photodiode with p-i-n multiplication layer structure. Journal of Applied Physics. 81 (2): 974.

17. O. I. Yuzephovich, M. Yu. Mikhailov, S. V. Bengus et al. Interfacial superconductivity in bilayer and multilayer IV–VI semiconductor heterostructures Available to Purchase Phys. Rev. B 66, 174513 (2002).

18. Hansard Miles, Lee Seungkyu, Choi Ouk, Horaud Radu (). Time-of-flight cameras: Principles, Methods and Applications (PDF). Springer Briefs in Computer Science 2012.

19. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – Кн. 2. – 436 с.

20. Стронський О. В., Венгер Є. Ф., Олексенко П. Ф., Мельничук О. В. Халькогенідні склоподібні напівпровідники: властивості та практичні застосування : монографія / О. В. Стронський, Є. Ф. Венгер, П. Ф. Олексенко, О. В. Мельничук. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2016. 236 с.

21. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain / F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco, S. Campopiano // Opt. & Laser Technol. 2019.Vol. 113. P. 198–203.

22. Monitoring the failure forms of a composite laminate system by using panda polarization maintaining fiber Bragg gratings / X. Zhang, R. Chen, A. Wang, Y. Xu, Y. Jiang, H. Ming, W. Zhao // Opt. Exp. 2019. Vol. 27 (13). P. 17571–17580.

23. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing / X. He, C. Ma, X. Wang, Z. Wang, F. Jiang, L. Yuan // Appl. Opt. 2020. Vol. 59 (16). P. 4880-4887.

24. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics. New York : John Wiley and Sons, 1991.

25. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7 ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.

26. Кушнір О., Луців-Шумський Л., Корчак Ю. Практикум з фізики кристалів : Навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 240 с

27. Влох О. Г., Клепач М. І., Кушнір О. С., Луців-Шумський Л. П., Шопа Я. І. Дисперсія оптичної активності кристалів групи KDP // Вісн. Львів. ун-ту, сер. фіз. 1993. №26. С. 84–87.

28. Кушнір О. С., Шопа Я. І. Методичні вказівки до лабораторних робіт зі спецкурсу “Параметрична кристалооптика” для студентів фіз. ф-ту. Львів : ЛДУ ім. І. Франка, 1998. 35 с.

29. Growth of large-size KDP single crystals with high laser damage threshold / I. M. Pritula, M. I. Kolybayeva, V. I. Salo, V. M. Puzikov, K. N. Belikov // Functional Materials. 2005. 12, № 4. С. 663-668.

30. Growth and characterization of urea-doped KDP crystals / I. Pritula, A. Kosinova, M. Kolybayeva, V. Puzikov, S. Bondarenko, V. Tkachenko, V. Tsurikov, O. Fesenko // Functional Materials. 2007. 14, № 3. С. 295-301.

31. Однодворець Л. В. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. Суми : Сумський державний університет, 2022. 127 с.

32. Григорук В. І., Коротков П. А., Хижняк А. І. Лазерна фізика: Підручник. Київ : «МП Леся», 1997. 480 с.

33. Колесник Ю. І., Кіпенський А. В. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 318 с.

34. Baranov M. I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 42: Electronics: retrospective view, successes and prospects of its development. Електротехніка і Електромеханіка. Харків : 2018. №1 с. 3 – 16.

35. Системи електроживлення електронної апаратури. Конспект лекцій для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації 8(7).050802 «Електронні системи». – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. 180 с.

36. Матеріали сайту компанії International Rectifier URL : https:// www.irf.com (дата звернення 01.03.2025).

37. Пететворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В.С. Руденко. За ред. В.С. Руденка. Харків : Фоліо, 2000. 360 с.

38. Жуйков В. Я., Рогаль В. В., Будьонний О. В., Пілінський В. В. Енергетична електроніка. Електронний підручник. / Київ : 2008. URL : https:// http://fel.kpi.ua/lib/pidruchniki (дата звернення 01.03.2025).

39. Step-Up Switching-Mode Converter With HighVoltage Gain Using a Switched-Capacitor Circuit. Oded Abutbul, Amir Gherlitz, Yefim Berkovich, and Adrian Ioinovici. IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications, Vol. 50, № 8, 2003. p. 1098-1102.

40. Brain Rush. Power Supply Sequencing for Low Voltage Processors // EDN. 2000.

41. Мікропроцесорні та мікроконтролерні системи : Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. : А.О. Новацький. – Електронні текстові дані (1 файл: 18.983 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 247 с.

42. On-line симулятор програми САПР Proteus URL: https://www.labcenter.com/buy-vsm (дата звернення 01.08.2025).

43. Ekert, A. K. Practical quantum cryptography based on two-photon interferometry / A. K. Ekert, J. G. Rarity, P. R. Tapster, G. M. Palma // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 69. P. 1293.

44. Gisin N. Towards practical and fast quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, H. Zbinden et al. // arXiv:quantph/0411022. 2004.

45. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В. І., Лисенко В. П., Юрченко О. М., Лукін В. Є., Руденський А. А. — Київ : «Агроосвіта», 2015. 676 с.

46. Методичні рекомендації до курсу Експериментальні методи у фізиці високих енергі й / Упорядники : Ю. М. Оніщук, В. Є. Аушев Київ : 2016. 201 с.

47. Матеріали сайту компанії HAMAMATSU URL: https://www.hamamatsu.com (дата звернення 01.08.2025).

48. On-line симулятор програми Multisim https://www.multisim.com (дата звернення 01.08.2025).

49. A. V. Brusko, O. Yu. Myronchuk Features of the Implementation of Multitasking on the Raspberry Pi and Arduino Platforms Вінниця : Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 5. с. 80-84.

50. D. Bovet, and M. Cesati, Understanding the Linux Kernel, Janaury 2001. OŔeally & Associates, Sebastopol (2001).

51. B. J. Catanzaro, Multiprocessor system architectures. Englewood Cliffs, N.J : PTR Prentice Hall, 1994.

52. G. P. Duggan, and P. Young, “Precision timing on low-cost Linux microcomputers,” in 2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings, 2015, pp. 469-471, https://doi.org/ 10.1109/SYSCON.2015.7116795.

53. A. Martelli, and D. Ascher, Eds., 2002. Python Cookbook. Sebastopol: O'Reilly. ISBN: 0-596-00167-3.

54. D. Saito, H. Washizaki, Y. Fukazawa, T. Yoshida, I. Kaneko, and H. Kamo, “Learning Effects in Programming Learning Using Python and Raspberry

Pi: Case Study with Elementary School Students," in 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE), 2019, pp. 1-8, https://doi.org/10.1109/TALE48000.2019.9225866.

55. Матеріали сайту robo-education URL : https://robo-education.com.ua/sravnenie-platform-arduino-i-raspberry-pi-cto-vybrat-dlia-svoix-proektov (дата звернення 01.08.2025).

56. Сайт компанії raspberrypi URL : https://pip.raspberrypi.com (дата звернення 01.08.2025).

57. Матеріали сайту компанії Fujitsu URL : http://emea.fujitsu.com/microelectronics (дата звернення 01.08.2025).

58. W. Wang, M. Zwolinski /An Improved Instruction-Level Power Model for Електронний ресурс URL : https://eprints.soton.ac.uk/361481/ (дата звернення 01.08.2025).

59. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / за заг. ред. Т. В. Гончарук. Тернопіль, 2014. 272 с.

60. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запоріїжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf.

61. Бєлоконь К. В., Суржицька Л. А., Цимбал В. А., Карнаух А. А. Цивільний захист : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 69 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356329.pdf.

Додаток 1

ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Матеріали
ІІ Міжнародної науково-практичної конференції
Інженерного навчально-наукового інституту
ім. Ю. М. Потебні

15–16 травня 2025 року

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

УДК 330.341.1-027.542(062.552)
І-62

Редакційна колегія:

В. В. Храпкіна, доктор економічних наук, професор, професор кафедри маркетингу та управління бізнесом, Національний університет «Києво-Могилянська академія» (м. Київ);

О. Г. Вагонова, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної економіки, підприємництва та публічного управління, НТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро)

Рекомендовано до друку
Рішенням Вченої ради Запорізького національного університету
(протокол № 12 від 01 липня 2025 року)

І-62 **Інженерні інновації та розбудова національної економіки** : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні (15–16 травня 2025 року, м. Запоріжжя) / наук. ред. Н. Г. Метеленко ; Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету. – Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. – 960 с.

ISBN 978-617-554-649-9

У виданні представлені тези доповідей учасників II Міжнародної науково-практичної конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні «Інженерні інновації та розбудова національної економіки» (15–16 травня 2025 року), які підготовлені за такими базовими тематичними напрямами, що охоплюють всі спеціальності підготовки ЗдВО І–ІІІ рівня вищої освіти: Цифрова трансформація: маркетинг; бізнес-середовища, публічне управління та адміністрування, право; Європейські інтеграційні процеси розбудови національної економіки: облік, фінанси, оподаткування, аудит; страхування, фондовий ринок; Фізична електроніка та біоінженерія: тренди розвитку; Інженерна екологія; Сучасні технології та тренди кольорової і чорної металургії; Інновації в інженерії програмного забезпечення; Електрична інженерія: відновлювані джерела енергії, «зелена» воднева енергетика, інтеграція в енергетичну інфраструктуру Європи; Архітектура та будівництво: фундатор сучасних будівельних технологій; Механічна інженерія: сучасне обладнання та новітні технології в галузях промисловості; Філософія управління та адміністрування: ризик-менеджмент, екологічний менеджмент; сталий розвиток; Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка: сучасні виклики та перспективи.

Для науковців, держслужбовців, представників бізнесу, аспірантів, студентів закладів вищої освіти та зацікавлених організацій.

УДК 330.341.1-027.542(062.552)

© Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, 2025
© Автори статей, 2025

ISBN 978-617-554-649-9

СЕКЦІЯ 1
ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ: МАРКЕТИНГ, БІЗНЕС-СЕРЕДОВИЩЕ, ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ, ПРАВО

Ажажа М. А., Дашков А. О.
Економічні, соціальні та демографічні аспекти, що впливають на якість людського капіталу в регіонах України 24

Ажажа М. А., Цикін Д. С.
Інноваційно-цифрові методики оцінки моделей регіонального розвитку 28

Бак Н. А., Українець І. З.
Цифрові інструменти вдосконалення механізму справляння податку на додану вартість 32

Брюховецька Н. Ю., Булєєв І. П.
Управління людським капіталом підприємств в умовах цифрової трансформації, воєнного та повоєнного відтворення 35

Ващенко А. А.
Розвиток інформаційного маркетингу як інструмент удосконалення маркетингової діяльності підприємства в умовах цифрової економіки та турбулентного середовища 39

Венгер О. М., Жихар Г. Д.
Сутність механізмів інформаційно-аналітичного забезпечення управлінських процесів у публічній сфері 41

Голомб В. В., Голомб В. В.
Аналіз сучасних тенденцій розвитку електронної комерції 45

Голомб В. В., Селезньов К. О.
Роль цифрових технологій у розвитку біржових торгів 49

Десна А. М.
AI MAP як складова інноваційної екосистеми України 52

Драчук Ю. З., Панькова О. В.
До проблем управління вітчизняного бізнес-середовища в умовах глобалізації та ймовірного захисту 54

Дуда Г. Б., Купчинська Т. А.
Інструменти візуалізації даних у маркетингу 58

Дятлова Ю. В., Карпелянський А. Р.
Аналітичний огляд сучасного стану металургійної галузі східного регіону України 61

Биткін С. В., Критська Т. В.
Моделювання та прогнозування нелінійного впливу концентрації носіїв заряду на щільність дислокацій у ізовалентно легованому кремнії (SiGe) . . . 347
Виноградов Д. Д., Небеснюк О. Ю.
Мікроелектронний пристрій на сонячних панелях для живлення гаджетів . . . 351
Гурін М. Р., Ніконова А. О.
Методи реалізації моніторингу сердечного ритму . . . 353
Душко Д. В., Ніконова А. О.
Дослідження та розробка системи контролю функціональних показників для реабілітаційного приладу . . . 357
Клімашин С. І., Ніконова А. О.
Дослідження ефективних методів передачі енергії та розробка бездротового зарядного пристрою для мобільних роботів . . . 359
Ключко А. В., Ніконова А. О.
Розробка системи контролю вологості та іонізації повітря у довкіллі . . . 362
Nebesniuk O., Nikonova Z.
Electrical stimulator for visual analyzer . . . 365
Оглобліна В. О., Плиска О. В., Безрукова В. С.
Інтеграція української енергосистеми в енергетичну інфраструктуру Європи в контексті глобальних екологічних викликів . . . 367
Павленко Д. В., Янченко Д. Р., Світанько М. В., Верьовкін Л. Л.
Однофотонна система реєстрації поляризованого випромінювання . . . 370
Світанько М. В., Верьовкін Л. Л., Маренгольц К. В.
Розробка портативної мікроелектронної системи знезараження питної води . . . 373
Стрункін Г. М.
Використання регресійних моделей в електромеханічних системах та перетворювальній техніці . . . 375

СЕКЦІЯ 4
ІНЖЕНЕРНА ЕКОЛОГІЯ. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТРЕНДИ КОЛЬОРОВОЇ І ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Bielokon K., Pirohova I., Malovanyy M.
The problematic issues of the regulatory framework for the functioning of regional environmental monitoring centers . . . 379

information-materials/2025/on-the-electricity-market-in-ukraine-national-plan-until-2030 (дата звернення: 01.05.2025).
3. Україна може стати надійним постачальником зеленого водню до ЄС. *UkraineInvest*. (URL: https://ukraineinvest.gov.ua/news/06-06-22-2/ (дата звернення: 02.05.2025).
4. ENTSO-E. *НЕК «Укренерго»*. URL: https://ua.energy/entso_e.html (дата звернення: 30.04.2025).

УДК621.396

Павленко Денис Володимирович
магістрант 1курсу,
кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

Янченко Дмитро Романович
магістрант 1курсу,
кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

Світанько Микола Вікторович
кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент
кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

Верьовкін Леонід Леонідович
к. т. н., доцент, доцент
кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

ОДНОФОТОННА СИСТЕМА РЕЄСТРАЦІЇ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Успіхи інтегральної електроніки та лазерної техніки сприяли появі інтегральної оптики. У 1970-х роках з'явився напрям досліджень під назвою «оптична бістабільність» (керування світлом за допомогою світла). Для побудови цифрового оптичного процесора треба було створити оптичний тригер – пристрій із двома стійкими станами (низької та

високої прозорості). За перше десятиліття після демонстрації у 1974 р. оптичної бістабільності у парах Na було запропоновано декілька сотень варіантів оптичних пристроїв із гістерезисним характером залежності вихідної потужності світла від вхідної [1–3]. Зазвичай, оптичну бістабільність пов'язують із двома рівнями інтенсивності на виході пристрою, але так само можна створити пристрій з перемиканням стану поляризації. Із появою перетворювачів частоти лазерного випромінювання такий пристрій був реалізований на базі нелінійних кристалів [4–7].

У роботі пропонується розробка однофотонної системи реєстрації полязованого випромінювання, яка, фактично, є пристроєм із перемиканням стану поляризації. Основним матеріалом перетворення випромінювання АІГ лазера в УФ було обрано матеріали $RbTiOPO_4$ (RTP) та β-BaB_2O_4 (BBO), як найбільш привабливі за своїми фізико-оптичними характеристиками [8–10]. Фізичні і поляризаційні характеристики системи представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Фізичні і поляризаційні характеристики однофотонної системи реєстрації полязованого випромінювання [8–10]

Довжина хвилі, мкм	Показник заломлення		Тип взаємодії	Кут синхронізму, °
	n_0	n_e		
Друга гармоніка				
$\lambda_1 = 1{,}064$ $\lambda_2 = 0{,}532$ $\lambda_3 = 0{,}532$	1,6545 1,6545 1,6742	1,5392 1,5392 1,5547	OOE EOE OEE	22,73 32,18 32,18
Четверта гармоніка				
$\lambda_1 = 0{,}532$ $\lambda_2 = 0{,}532$ $\lambda_3 = 0{,}266$	1,6742 1,6742 1,7585	1,5547 1,5547 1,6126	OOE EOE OEE	47,63 80,85 80,85
П'ята гармоніка (I +IV)				
$\lambda_1 = 1{,}064$ $\lambda_2 = 0{,}266$ $\lambda_3 = 0{,}212$	1,6545 1,7585 1,8518	1,5392 1,6126 1,6740	OOE EOE	51,14 56,98

Схема експериментальної установки по дослідженню генераційних і поляризаційних властивостей системи представлено на рисунку 1 [8–10].

Подальші дослідження показали можливість розширення спектрального діапазону випромінювання аж до вакуумного ультрафіолету [8–10].

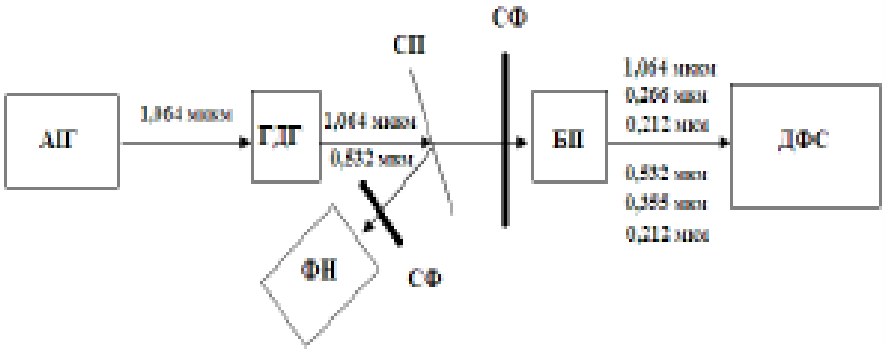


Рисунок 1. Схема експериментальної установки для дослідження генераційних і поляризаційних властивостей однофотонної системи реєстрації полязованого випромінювання:
ГДГ – генерація другої гармоніки; СП – світловідбиваюча пластина; ФН – фотометр наносекундний; СФ – світлофільтри; БП – блок перетворювачів у п'яту гармоніку; ДФС – диференційний спектрометр (ДФС-452)

Список використаних джерел

1. Vander Lugt A. B. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Information Theory*. 1964. Vol. 10. N 2. P. 139–145.
2. Appeltant L., Soriano M. C., Van der Sande G. et al. Information processing using a single dynamical node as complex system. *Nature Communications*. 2011. Vol. 2. Article N 468. P. 1–6.
3. Paquot Y., Duport F., Smerieri A. et al. Optoelectronic reservoir computing. *Scientific reports*. 2011. Vol. 2. Article N 287. P. 1–6.
5. Bierlein J. D. and H.Vanherzeele H. *J. Opt. Soc. Am*. B 6. 1989. P. 622.
6. Eimerl D., Davis L., Velsko S. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate. *J. Appl. Phys*. 1987. Vol. 62. P. 1968–1983.
7. Wu Y., Sasaki T., Nakai S. CsB_3O_5:A new nonlinear optical crystal. *Appl. Phys. Lett*. 1993. Vol. 62. P. 2614–2615.
8. Mori Y., Kuroda I., Nakajima S. New nonlinear optical crystal: Cesium lithium borate. *Appl. Phys. Lett*. 1995. V. 67. P. 1818–1820.
9. Oseledchik Yu. S., Prosvirnin A. L., Pisarevsky A. I. et al. Sum friquensy radiation in RTP cristals. In *Proc. Laser Optics*. 90. Leningrad. 1990. P. 440.
10. Yu.S.Oseledchik Yu.S., Osadchuk V. V., Prosvirnin A. L., Selevich A. F. Growth of BBO from Na_2O-NaF solution. *J. Crystal Growth*. 1993. V. 131. P. 199–203.
11. Oseledchik Yu.S, Pisarevsky A. I., Prosvirnin A. L. et al. Nonlinear optical properties of the flux growth RTP cristal. *Optical Materials*. V. 3. 1994. P. 237–242.

Наукове видання

ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Матеріали
ІІ Міжнародної науково-практичної конференції
Інженерного навчально-наукового інституту
ім. Ю. М. Потебні

15–16 травня 2025 року

Відповідальний редактор О. Побережець
Дизайн обкладинки А. Юдашкіна
Технічне редагування О. Гринюк
Верстка Ю. Семенченко

ГЕЛЬВЕТИКА
ВИДАВНИЧИЙ ДІМ
WWW.HELVETICA.UA

Підписано до друку 18.08.2025 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Cambria. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 56,03. Наклад 300. Замовлення № 1025-221.
Віддруковано з готового оригінал-макета

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Тел.: +38 (097) 723 06 08, +38 (095) 934 48 28
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach (WSZOP)
Департамент захисту довкілля Запорізької обласної державної адміністрації
ДУ «Запорізький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова
Національний університет «Києво-Могилянська Академія» Київський національний університет будівництва і архітектури Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
Національний транспортний університет
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

28-30 жовтня 2025 року

ЗАПРОШУЄМО ДО УЧАСТІ У

Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти

«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СУСПІЛЬСТВА У СФЕРАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, МЕНЕДЖМЕНТУ ТА ЕКОНОМІКИ»

(режим роботи – дистанційний)

Запоріжжя, 2025

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Шило Г.М. – голова оргкомітету, доктор технічних наук, професор, ректор ЗНУ.
- Метеленко Н.Г. – заступник голови оргкомітету, доктор економічних наук, професор, директор ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
- Бєлоконь К.В. – заступник голови оргкомітету, кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Члени оргкомітету:
- Bohdan Mochnacki – prof. drhab. ing., Rektor WSZOP;
- Амінов Р.Ф. – кандидат біологічних наук, старший викладач кафедри фізіології, імунології і біохімії з курсом цивільного захисту та медицини біологічного факультету ЗНУ, голова Ради молодих вчених ЗНУ;
- Барабаш О.В. – доктор технічних наук, професор, в.о. завідувача кафедри екології та ТЗНС Національного транспортного університету;
- Білоскурський Р.Р. – доктор економічних наук, ректор Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;
- Воронкова В.Г. – доктор філософських наук, професор, завідувач кафедри управління та адміністрування ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Клопов І.О. – доктор економічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Коваленко В.Л. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Мальований М.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка»;
- Пірогова І.М. – заступник директора Департаменту захисту довкілля Запорізької обласної державної адміністрації;
- Степова О.В. – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової та міжнародної роботи Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;
- Глущевська В.В. – здобувач, голова наукового товариства студентів, аспірантів та докторантів Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Ткаченко Т.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури;
- Трохименко Г.Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій *Національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*;
- Тулушев Є.О. – завідувач відділу моніторингу та реагування на небезпеки ДУ «Запорізький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»;
- Храпкіна В.В. – доктор економічних наук, професор, кафедра маркетингу та управління бізнесом, Національний університет «Києво-Могилянська Академія»;
- Шмандій В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та біотехнології Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

УДК621.396

Павленко Денис Володимирович
здобувач вищої освіти спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
Янченко Дмтро Романович
здобувач вищої освіти спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
Світанько Микола Вікторович
кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедра Електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ

РОЗРОБКА ОПТОВОЛОКОННОЇ ЗНЕЗАРАЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

У системі протиепідемічних заходів саме створення несприятливості населення до інфекційних хвороб займає одне з найбільш важливих місць. Стратегія ВООЗ щодо зниження смертності та захворюваності на інфекційні хвороби, насамперед серед дітей, передбачає обов'язкове впровадження ефективної специфічної імунізації населення. Виконання програм імунізації привело до значних успіхів у боротьбі з інфекційними хворобами.[1,2].

Сьогодні одним з найбільш поширених методів знезараження вважається ультрафіолетове (УФ) знезаражування [1]. У будь-якому відкритому джерелі можуть жити хвороботворні бактерії. Всі хвороботворні мікроорганізми, бактерії і віруси, що містяться у воді, тільки тоді зможуть завдати шкоди людському організму, якщо будуть інтенсивно розмножуватися. Але ультрафіолетове знезараження позбавляє їх такої можливості, тому негативний вплив мікроорганізмів зводиться до нуля. Для УФ знезараження сьогодні застосовуються хвилі досить вузького діапазону – від 250 до 270 нм. У цих рамках бактерицидна дія ультрафіолету набуває своє максимальне значення. Велика частина установок по знезараженню води ультрафіолетом використовує лампи низького ртутного тиску, які виробляють випромінювання довжиною в 260 нм, тобто оптимальну довжину хвилі [3,4].

Але, використання таких систем для знезараження невеликих за розмірами об’єктів є нераціональним, і навіть небезпечним. Тому актуальною є потреба у системах знезараження із невеликими габаритами та ефективним джерелом УФ випромінювання [1,5].

У роботі представлена оптоволоконна знезаражувальна система, яка має джерело випромінювання потрібного спектрального діапазона – напівпровільниковий УФ світлодіод LED260W з довжиною хвилі випромінювання λ=265 нм, та світловипромінюючу систему, яка складається із кварцевого овтоволокна та ділянки із нанесеним спеціальним імерсійним покриттям, що забезпечує безпосередній

транспорт УФ випромінювання до місця знезараження. На рисунку 1 представлена структурна схема, розроблюваної системи.

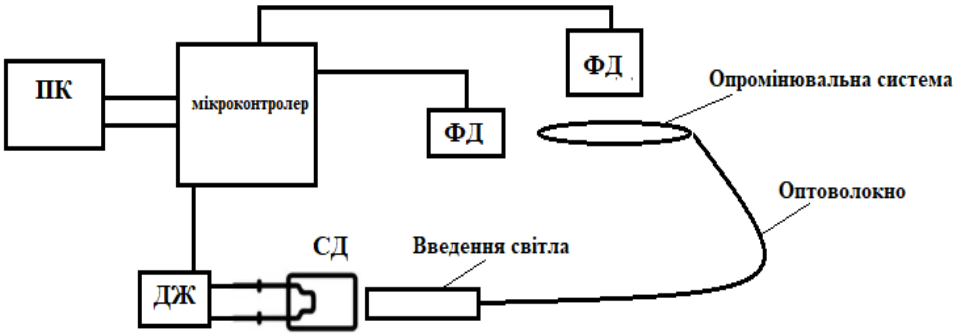


Рисунок 1 - Структурна схема оптоволоконної знезаражувальної системи

Схема складається із УФ світлодіода (СД), джерела живлення світлодіода (ДЖ), системи введення світла у оптоволокно, кварцевого оптоволокна, системи безпосередньої обробки (опромінювальна система), безпосередній контроль параметрів світлового потоку здійснюється фотоприймачами (ФД), для забезпечення автоматизації роботи схеми використовується мікроконтролер сумісно із персональним комп'ютером.

Використання розроблюваної системи має більш ефективне застосування, ніж у раніше розроблюваних аналогічних пристроях [6].

Список використаних джерел

1. Інфекційні хвороби (підручник) / за ред. О. А. Голубовської. Київ : ВСВ «Медицина» (4 видання, перероблене і доповнене). 2022. 464 С.

2. Закон України «Про захист населення від інфекційних хвороб» N 1645-III від 6 квітня 2000 м. Київ [1645-14]; остання редакція від 11.06.2009 (чинний).

3. Матеріали сайту компанії Трейдінг URL: https://ctrading.com.ua (дата звернення 01.03.2025).

4. Ультрафіолетове випромінювання. Гігієнічні аспекти його використання в медицині: навч. - метод. посіб. до практ. занять та самостійної роботи студентів III курсів медичних факультетів з навчальної дисципліни «Гігієна та екологія» для спеціальності 222 «Медицина» / А. І. Севальнєв, М. П. Гребняк, Р. А. Федорченко, А. В. Куцак, О. В. Кірсанова, Л. П. Шаравара, І. А. Соколовська, Ю. В. Волкова. – Запоріжжя : ЗДМУ, 2020. 114 с.

5. Терещенко М.Ф. Біофізика : підручник / М. Ф.Терещенко, Г. С. Тимчик, І. О. Яковенко. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. 444 с.

6. Сколоздра С. В., Чайковський Б. П., Лецик О. С. Розрахунок і проєктування комбінованого ультрафіолетового випромінювача для опромінення тварин Львів : Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Ґжицького Том 11 № 3(42) Частина 2. 2009.