

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**Гнатенко Олександр Сергійович**



УДК 535.33:621.373.8; 535.568

**СИНХРОНІЗАЦІЯ МОД ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА  
ЗА ДОПОМОГОЮ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ КОМІРОК**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Мачехін Юрій Павлович,**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, завідувач кафедри  
фізичних основ електронної техніки

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Кадан Віктор Миколайович,**  
Інститут фізики НАН України,  
відділ фотонних процесів,  
провідний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук,  
професор  
**Сльотов Михайло Михайлович,**  
Чернівецький національний університет  
ім. Ю. Федьковича, науково-дослідна частина,  
старший науковий співробітник

Захист відбудеться « 03 » вересня 2020 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розісланий « 29 » липня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
д.ф.-м. н., с.н.с.

Є. М. Одаренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Волоконні лазери з генерацією ультракоротких імпульсів використовуються у багатьох сферах науки і техніки, таких як оптична генерація сигналів довільної форми, генерація суперконтинуума, прецизійні метрологічні пристрої, високошвидкісна оптична передача інформації, квантовий захист інформації, біомедицина і далекометрія та інші сфери використання лазерів [1].

Для створення компактних волоконних фемтосекундних лазерних резонаторів успішно застосовується пасивна синхронізація мод з насиченим бреггівським відбивачем у поєднанні з формуванням солітонних імпульсів (вперше її реалізував Н. А. Haus у 1975 році) і синхронізація мод на основі методу нелінійної поляризації мод. Однак, при використанні напівпровідникових насичуючих поглиначів (SESAM), виникають теплові ефекти, які обмежують довготривалу стабільність режиму синхронізації мод. Як правило, такі лазери виходять з ладу після короткого періоду роботи. Вирішенням даної проблеми наразі займається група вчених на чолі з J. J. McFerran, в результаті чого тривалості імпульсів досягаються в межах 100 фс. При цьому у таких лазерах використовуються коштовні оптичні волокна: з підтримкою поляризації, фотонно-кристалічні волокна. Всі ці недоліки викликають необхідність розвитку синхронізації мод із застосуванням методу нелінійної еволюції стану поляризації, при якому тривалість імпульсів досягається близько 10 фс. Вперше про такі лазери були опубліковані роботи тієї ж групи вчених на чолі з Н. А. Haus в 1991 році і групою вчених на чолі з N. N. Akhmediev в 1996 році. Але будь-який температурний або вібраційний дрейф веде до зриву синхронізації мод таких лазерів, і кожного разу режим потрібно налаштовувати, обертаючи хвильові пластини вручну, за допомогою моторизованих тримачів або ж використовуючи в якості контролерів поляризації механічний вплив на оптичне волокно, що є істотним недоліком даного методу. Останнім часом спостерігаються спроби використання немеханічних методів управління поляризацією мод, застосовуючи оптичні волокна з підтримкою поляризації, але це дорога методика, яка не дає отримати імпульси порядку десятка фемтосекунд.

З вищевикладеного можна зробити висновок, що на даний момент актуальними стають модифіковані немеханічні методи управління поляризацією мод в волоконних лазерах, що забезпечують синхронізацію мод і генерацію ультракоротких імпульсів.

**Актуальність роботи** полягає в розвитку немеханічних методів синхронізації мод волоконного лазера з використанням рідкокристалічних (РК) комірок.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі фізичних основ електронної техніки (ФОЕТ) Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) у рамках виконання державних науково-дослідних робіт: «Розвиток нових оптичних стандартів частоти з використанням фотонних кристалів, як

основа прецизійних приладів» (№ державної реєстрації 0115U002434, виконавець); спецтема «Промінь» (виконавець); «Лазерний напівпровідниковий модуль для систем високоточного наведення протитанкових ракет» (№ державної реєстрації 0120U102125, відповідальний виконавець); науково-дослідної роботи за держзамовленням: «Розроблення конструкторської документації лазерної системи реєстрації оптики» № ДЗ/38-2018 (№ державної реєстрації 0118U002239, відповідальний виконавець); госпдоговірної роботи: «Розроблення конструкторської та технічної документації на волоконно-оптичний гіроскоп» (номер державної реєстрації 0120U100323, відповідальний виконавець).

**Мета роботи** – розвиток методу синхронізації мод в волоконному лазері на основі використання керованих РК комірок.

Для досягнення мети були вирішені наступні завдання:

- розвинуто теоретичну модель синхронізації мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок;
- досліджено стабільність поляризації поздовжніх мод в кільцевому волоконному лазері з використанням рідкокристалічних комірок;
- розроблено експериментальний макет волоконного лазера з забезпеченням синхронізації мод за допомогою рідкокристалічних комірок.

**Об'єктом дослідження** є синхронізація поздовжніх мод випромінювання волоконного лазера.

**Предметом досліджень** є метод керування синхронізацією мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок.

**Методи дослідження:** моделювання процесу забезпечення стабільності поляризації мод в кільцевому волоконному лазері виконувалося з використанням аналітичного методу і методу розкладання за фізичними величинами із швидким перетворенням Фур'є; чисельне моделювання з використанням рівняння Озеєна-Франка процесу керування поляризацією лазерного випромінювання за допомогою РК комірок; експериментальні дослідження забезпечення синхронізації мод волоконного лазера з використанням РК комірок.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Отримала подальший розвиток теоретична модель синхронізації мод волоконного лазера. Це дозволило врахувати механізми керування поляризацією на основі використання РК комірки.

2. Експериментально досліджено умови стабільності поляризації поздовжніх мод в кільцевому волоконному лазері з використанням рідкокристалічних комірок. Результати дослідження підтверджують коректність побудованої теоретичної моделі і ефективного використання рідкокристалічних комірок в якості контролерів поляризації.

3. Розроблений експериментальний макет волоконного лазера дозволив отримати лінійно-поляризоване випромінювання на довжині хвилі 1,55 мкм з тривалістю імпульсів фемтосекундного порядку. Показано, що розроблена система має значно поліпшені експлуатаційні якості за рахунок підвищення

ефективності налаштування кута повороту поляризації з використанням РК комірок.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати роботи складають підґрунтя для подальшого розвитку немеханічних методів та оптимізації механізмів формування ультракоротких імпульсів випромінювання в лазерних системах з синхронізацією мод.

Отримані в роботі результати сприяють створенню нових типів випромінювачів з фемтосекундною тривалістю імпульсів та довжиною хвилі випромінювання 1550 нм, для високошвидкісної передачі інформації, систем кодування інформації, а також дозволяють забезпечити більш надійну роботу телекомунікаційних систем.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі ХНУРЕ при вивченні принципів роботи нових конструкцій волоконних лазерів.

**Особистий внесок дисертанта.** Публікації, які складають основу дисертаційної роботи, виконано самостійно та у співавторстві. В праці [1] автор дисертації описав застосування фемтосекундних лазерів в далекометрії та охолодженні лазерами частинок. В праці [2] дисертантом проведено опис фізичного принципу роботи кільцевого фемтосекундного лазера з застосуванням РК комірок, основна ідея, винаходу належить науковому керівнику Мачехіну Ю.П. В працях [3, 6] дисертантом розраховано дисперсійні характеристики оптичних волокон для проектування резонаторів волоконних лазерів та проведено фізичний аналіз результатів. В працях [4, 9] автором дисертації розраховано стабільність поляризації для забезпечення синхронізації мод методом НЕП в схемі кільцевого волоконного лазера та розв'язано рівняння Гінзбурга-Ландау. В праці [5] дисертантом розроблено систему живлення і стабілізації діодів накачування, управління РК комірками та макет лазера. В працях [7, 8] автором дисертації описано використання нелінійних поляризаторів для забезпечення контролю поляризації всередині кільцевого резонатора волоконного лазера, як складної нелінійної динамічної системи. В праці [11] дисертантом запропоновано і досліджено схему кільцевого волоконного лазера з випромінюванням фемтосекундних імпульсів, для забезпечення яких реалізовано синхронізацію мод із застосуванням РК комірок та проведено розрахунки залежності кута повороту поляризації РК коміркою від прикладеної до неї напруги. В працях [10, 12] дисертант особисто виконав експериментальні та теоретичні дослідження, а також брав участь в аналізі отриманих результатів. Основну частину одержаних наукових результатів дисертант особисто доповів на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях [13-34].

**Апробація результатів.** Результати досліджень апробовано на наступних конференціях, форумах та симпозіумах: 5-й Міжнародний форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2014), Харків, Україна, 14–17 жовтня 2014; VIII Міжнародна наукова конференція «Функціональна база наноелектроніки», Одеса, Україна, 28 вересня – 2 жовтня 2015; International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSC-2015), Dnipro, 29 September – 02 October 2015; XI International Scientific Conference «Electronics

and Applied Physics», Kyiv, Ukraine, 21–24 October 2015; 5-та Міжнародна науково-практична конференція «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», Одеса, Україна, 29–30 жовтня 2015; Науково-технічна конференція «Фізика, Електроніка, Електротехніка», Суми, Україна, 18–22 квітня 2016; Науково-технічна конференція «Фізика, Електроніка, Електротехніка», Суми, Україна, 17–21 квітня 2017; II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем», Дніпро, Україна, 22-24 листопада 2017; I Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування», Харків, Україна, 7, 8 грудня 2017; Науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика», Суми, Україна, 05–09 лютого 2018; Науково-технічна конференція «Фізика, Електроніка, Електротехніка», Суми, Україна, 05–09 лютого 2018; Науково-технічна конференція «Фізика, Електроніка, Електротехніка», Суми, Україна, 23-26 квітня 2019; 10-та Всеукраїнська науково-практичної конференції молодих учених і студентів, Одеса, Україна, 16-17 травня 2019 р; IEEE confence, 8<sup>th</sup> International Conference Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL\*2019), Sozopol, Bulgaria, 06–08 September, 2019; International Conference on Natural Science and Technology (ICONAT 2019), Kharkiv, Ukraine, September 18–20, 2019.

**Публікації.** Основні результати, що отримані в дисертації, відображено в 34 друкованих роботах, з них розділи колективної монографії, 1 патент на винахід, 10 статей (з яких 6 - у наукових фахових виданнях України та 4 включено до наукометричної бази Scopus), 22 тези доповідей на міжнародних конференціях, форумах та симпозиумах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання та додатку. Повний обсяг складає 145 сторінок, з яких 111 основного тексту. Всього в дисертації 67 рисунків, 1 таблиця, 1 додаток і 131 джерело посилань на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок даної роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та задачі роботи. Наведені основні наукові результати, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача в опублікованих, разом зі співавторами, наукових працях, та апробацію результатів, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому** розділі розглянуто сучасний стан забезпечення синхронізації мод в волоконних лазерах з фемтосекундною тривалістю імпульсів. Розглянуто методи синхронізації мод в волоконних лазерах: активні – з використанням електрооптичних, акустооптичних та електроабсорбційних модуляторів. Але з описаного можна зробити висновок, що волоконні лазери, з активною

синхронізацією мод, за характеристиками цілком можуть забезпечити тривалість імпульсів фемтосекундного порядку. Однак, вартість електрооптичних затворів (модуляторів), що забезпечує надшвидкий час релаксації залишається вкрай високою; пасивні – з використанням SESAM. До мінусів використання SESAM можна віднести вузький робочий діапазон по інтенсивності, а також їх деградацію при тривалому використанні. З порівняння різних методів синхронізації мод волоконних лазерів, можна зробити висновок, що для розробки кільцевого волоконного лазера з надкороткою тривалістю імпульсів, найкраще підходить метод нелінійної еволюції стану поляризації, як привабливий простотою налаштування виходу на режим і стабільною синхронізацією мод, крім цього, за допомогою даного методу було отримано найкоротшу тривалість імпульсів волоконних лазерів близько 20 фс<sup>1</sup>.

У **другому** розділі описано фізичні принципи методу нелінійної еволюції стану поляризації мод в волоконних лазерах для забезпечення синхронізації мод. Фізичний процес нелінійного обертання поляризації показаний на рис. 1.

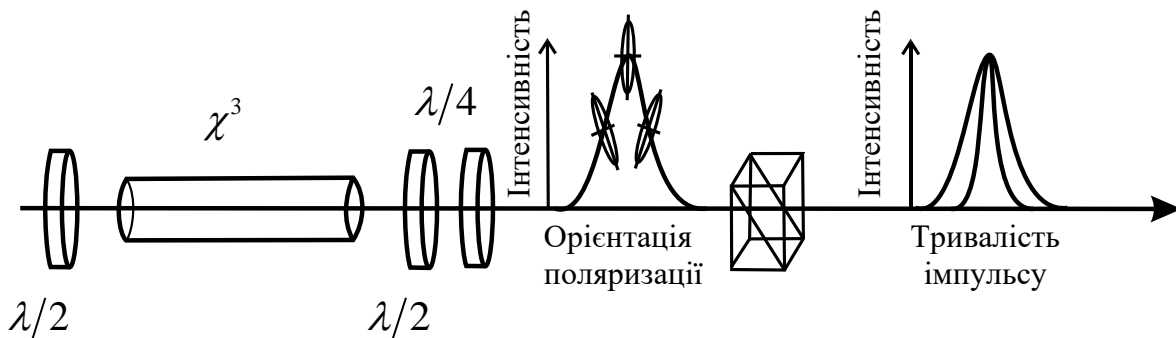


Рис. 1. Схема принципу роботи нелінійного обертання поляризації

На рис. 1 контролери поляризації замінені на двопротозаломлюючі пластини, оптичне волокно представлено у вигляді нелінійного середовища. При обертанні хвильових пластин на певний кут, можливо змінювати стан поляризації випромінювання, причому таким чином, щоб вона мала чітко вертикальну орієнтацію і поляризаційний поділювач мав змогу пропускати максимальне випромінювання; при цьому крила імпульсу матимуть іншу орієнтацію поляризації і будуть обрізатися, що призведе до скорочення тривалості імпульсу. При цьому, інтерференція, що виникає в резонаторі лазера, сприяє утворенню областей з більшою чи меншою концентрацією випромінювання в оптичному волокні. Таким чином, виникає особливий ефект: кожен раз, проходячи по кільцю резонатора, поляризація кожної моди змінює свій стан, при цьому також відбувається зміна фази кожної моди. Хвильові пластини орієнтуються в просторі таким чином, щоб перед поляризатором виникала лінійна поляризація, яка відповідає максимуму випромінювання. Внаслідок чого, моди, синхронізовані за поляризацією, відповідно будуть

<sup>1</sup> Zhao L.M., Lu C., Tam H. Y., Wai P. K. A., Tang D.Y. High fundamental repetition rate fiber lasers operated in strong normal dispersion regime. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2009. Vol.21, No. 11. P. 724–726.

синхронізовані за фазою. Але використання хвильових пластин в якості контролерів поляризації не зовсім коректно з точки зору стабільності забезпечення синхронізації мод. За рахунок дрейфу і зовнішнього впливу такі системи потребують постійного налаштування режиму. Для реалізації синхронізації мод в даній роботі запропоновано в якості контролерів поляризації використовувати РК комірки, що управляються низьковольтним сигналом і дають можливість швидкого налаштування режиму синхронізації мод в волоконному лазері.

У третьому розділі отримала розвиток теоретична модель синхронізації мод волоконного лазера за допомогою РК комірок, яка дозволяє отримати генерацію фемтосекундних імпульсів випромінювання. Типову схему кільцевого лазера з синхронізацією мод методом нелінійної еволюції стану поляризації (НЕСП) приведено на рис. 2.

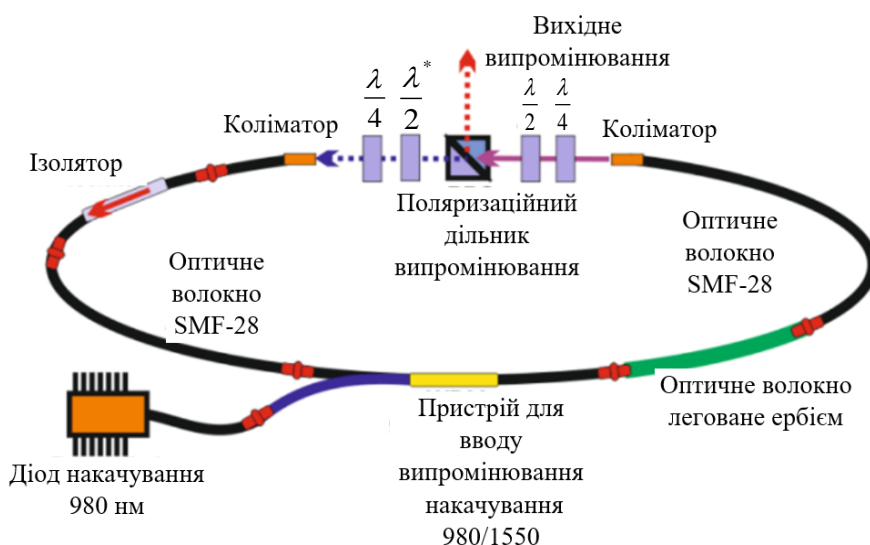


Рис. 2. Типова схема кільцевого волоконного лазера з НЕСП

Щоб позбутися недоліків обумовлених використанням в схемі лазера хвильових пластин (рис.2), пропонується використовувати в якості контролерів поляризації РК комірки (рис. 3) [11, 12, 14, 17, 31]. Для досягнення бажаного рівня контролю поляризації використовується комбінація РК комірки з фіксованими чвертьхвильовими пластинами. РК комірка № 2 не обов'язкова і може бути використана для додаткового налаштування, тому в роботі теоретично описується схема з однією РК коміркою. В даному випадку РК комірка замінює напівхвильову пластину. Чвертьхвильові пластини, необхідні для забезпечення можливості роботи РК комірки, перебувають у фіксованому положенні (без обертання). Сучасний стан розвитку елементної бази дозволяє використовувати РК комірки, що випускаються промисловістю (наприклад, фірми Thorlabs). Тоді схема лазера може мати в своєму складі тільки РК комірки для контролю і забезпечення синхронізації мод (рис. 4). Дана ідея засвідчена патентом на винахід [2].



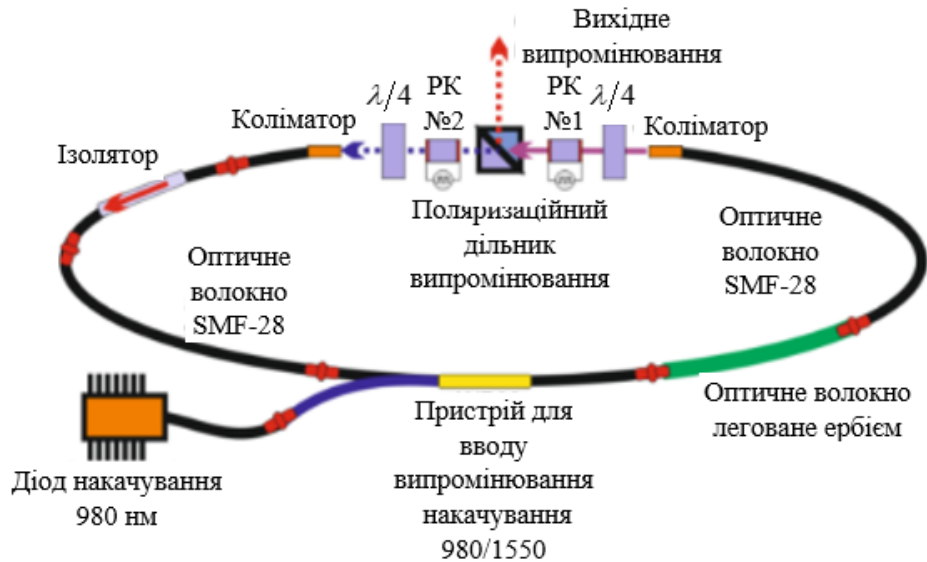


Рис. 3. Схема кільцевого волоконного лазера з РК комірками

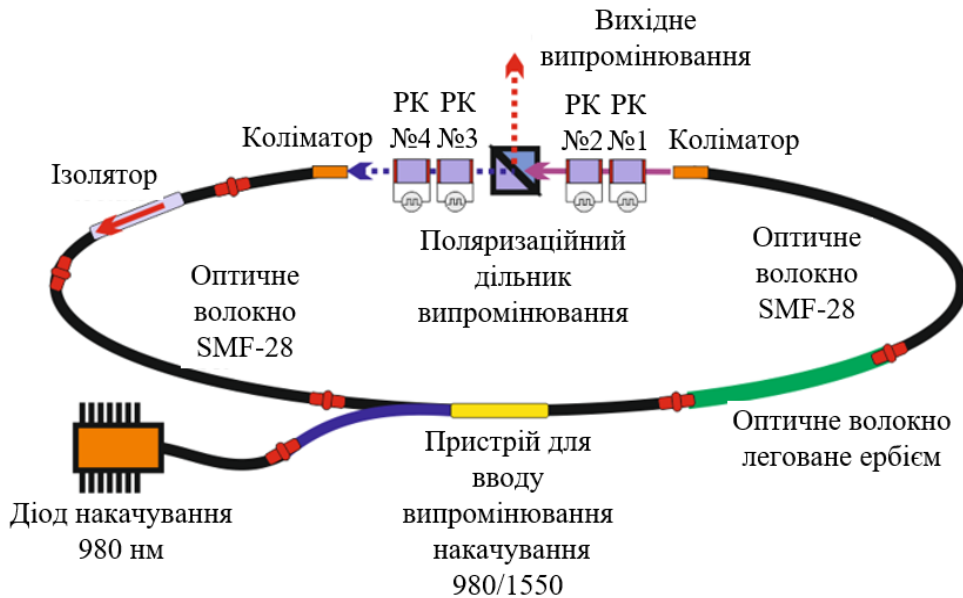


Рис. 4. Схема кільцевого волоконного лазера з використанням тільки ЖК поляризаторів

При розповсюдженні імпульсів по оптичному волокну, на їх форму та тривалість впливає дисперсія. Тому в роботі було проведено дослідження дисперсійних характеристик оптичних волокон резонатора лазера [3, 6, 16].

Вираз для хроматичної дисперсії можна представити таким чином:

$$D = -2\pi \cdot c \cdot \beta_2 / \lambda^2, \quad (1)$$

де  $c$  – швидкість світла;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\beta_2$  – дисперсія групової швидкості (ДГШ).

Відповідно до основних положень електродинаміки та формули Селмеєра було отримано основне співвідношення ДГШ:

$$\beta_2(\lambda) = \frac{\lambda^3}{2\pi \cdot c^2} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \left( 1 + \lambda^2 \sum_{i=1}^3 \frac{A_i^2}{(\lambda^2 - I_i^2)} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання, що розповсюджується в середовищі;  $A$  і  $I$  – довідкові коефіцієнти Селмеєра, що характеризують матеріальні властивості середовища.

На рис. 5,а представлено залежність дисперсії групової швидкості для одномодового волокна SMF-28 і на рис. 5,б – для волокна, легованого ербієм.

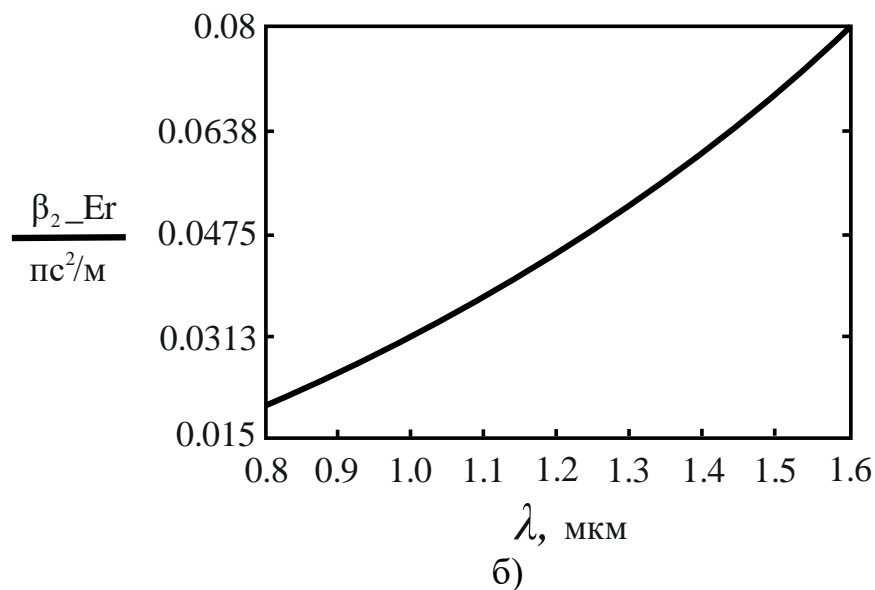
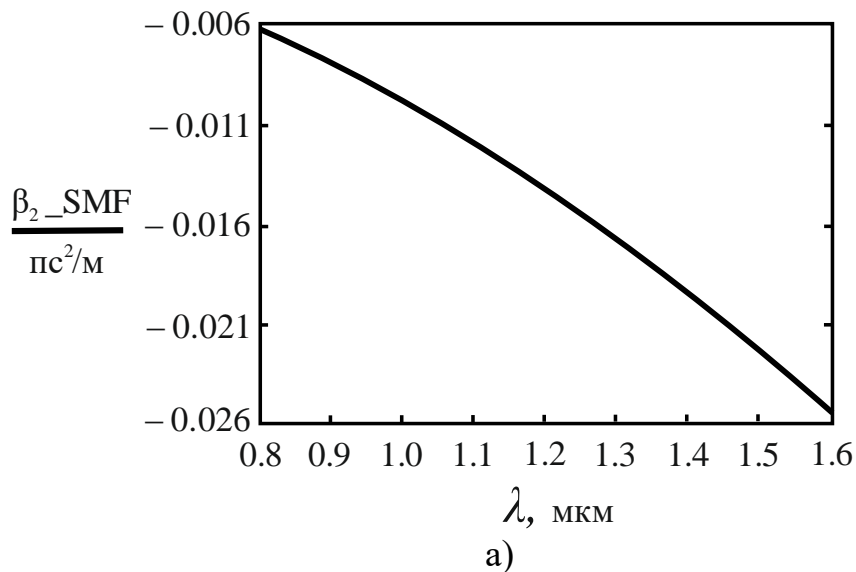


Рис. 5. Залежність дисперсії групової швидкості від довжини хвилі: а) оптичне волокно SMF-28; б) оптичне волокно леговане ербієм

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для 1м одномодового волокна SMF-28 ДГШ для довжини хвилі 1,55 мкм відповідає значенню:  $-0,028$  пс<sup>2</sup>/м, а для ербієвого волокна відповідно  $0,075$  пс<sup>2</sup>/м.

Значення хроматичної дисперсії волокон також можна визначити із залежностей на рис. 6. Для волокна легованого ербієм хроматична дисперсія відповідає значенню:  $-0,058$  пс/нм·м, а для волокна SMF-28 відповідно  $0,018$  пс/нм·м. Для схем лазера, рис. 2 - 4, при виконанні умови стабільності синхронізації мод [9], загальна ДГШ має бути негативною. Тоді за умови наявності в резонаторі лазера з довжиною 1м оптичного волокна, легованого ербієм, потрібно не менше 3,2 м оптичного волокна SMF-28:  $0,075 + 3,2 \times (-0,028) = 0,075 - 0,0896 = -0,0146$  пс/нм·м. Таким чином, повна хроматична дисперсія кільцевого волоконного лазера (ербієвого) складає:  $-0,058 + 3,2 \cdot (0,018) = -0,058 + 0,0576 = -0,0004$  пс/нм·м.

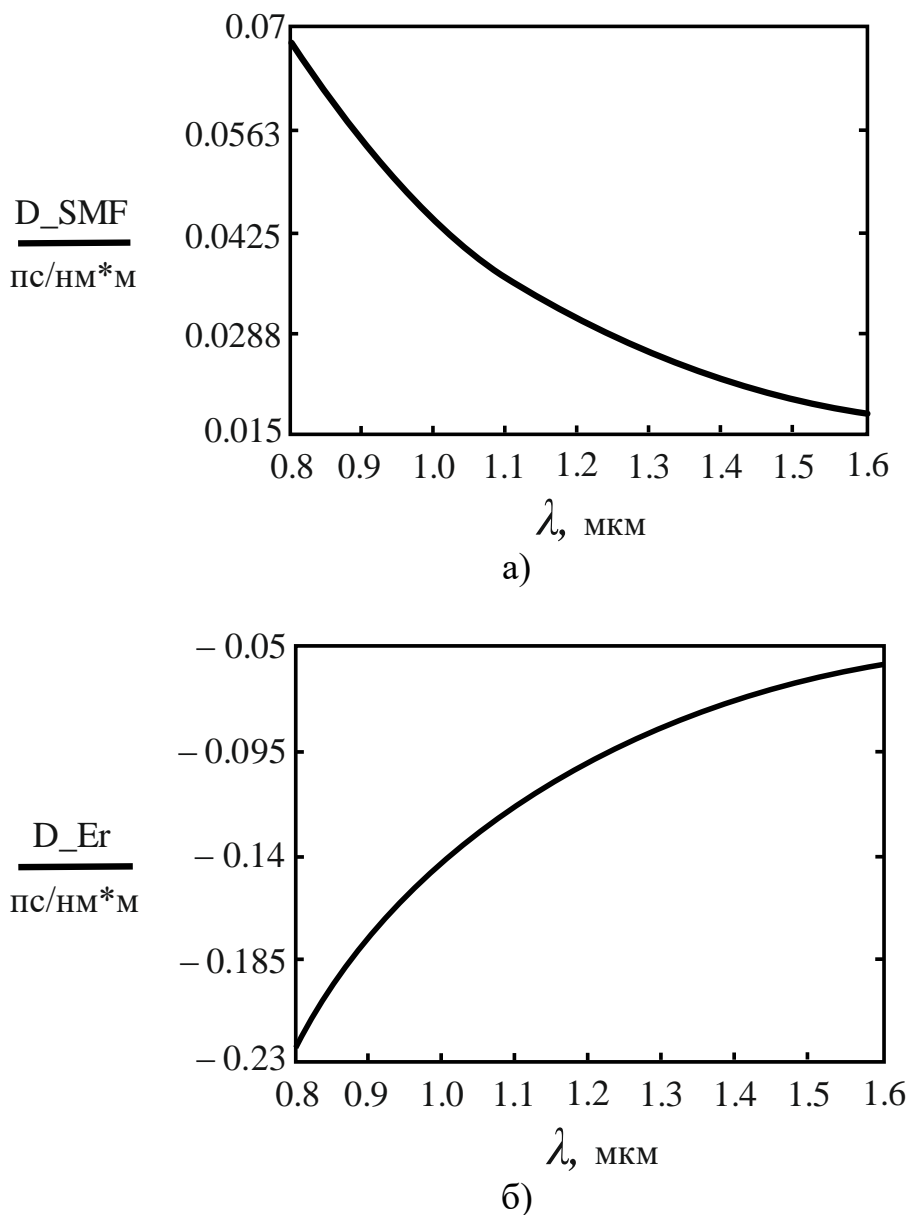


Рис. 6. Залежність хроматичної дисперсії від довжини хвилі випромінювання:  
а) оптичне волокно SMF-28; б) оптичне волокно леговане ербієм

Як показали розрахунки, повна хроматична дисперсія схеми лазера, має негативний знак. При цих умовах, виходячи з рівняння (1) загальна ДГШ матиме позитивний знак, що призводить до невиконання умови для стабільності генерації імпульсів згідно виразу (9). Отже, при довжині 1 м оптичного волокна, легованого ербієм, в резонаторі лазера повинно бути не менше 3,3 м оптичного волокна SMF-28.

Для дослідження стабільності поляризації при забезпеченні синхронізації мод в кільцевих волоконних лазерах в залежності від її орієнтації в просторі, при застосуванні хвильових пластин, в роботі було розв'язано рівняння Гінзбурга-Ландау [4, 7, 9, 13, 19]:

$$i \frac{\partial F(t, \zeta)}{\partial \zeta} = i g_1 F(t, \zeta) + \left( \frac{\beta_2}{2} + i \rho \right) \frac{\partial^2 F(t, \zeta)}{\partial t^2} + (D_r + i D_i) F(t, \zeta) |F(t, \zeta)|^2, \quad (3)$$

де  $F(t, \zeta)$  – амплітуда імпульсу;  $g_1$  – лінійне посилення;  $\rho$  – спектральна фільтрація,  $\beta_2$  – коефіцієнт дисперсії групової швидкості;  $D_r$  – ефективна самофазова модуляція;  $D_i$  – нелінійне підсилення.

Рішення рівняння (3) має вигляд:

$$a(t) = \sqrt{\left( \frac{g_1}{\rho d^2 - \rho - \beta_2 d} \right) \left( \frac{3d(4\rho^2 + \beta_2^2)}{2(\beta_2 D_i - 2\rho D_r)} \right)} \operatorname{sech} \left( \sqrt{\frac{g_1}{\rho d^2 - \rho - \beta_2 d}} t \right). \quad (4)$$

Таким чином, з отриманого виразу (9) можна визначити умови стабільності поляризації в кільцевому волоконному лазері:

1.  $g_1$  і  $(\rho d^2 - \rho - \beta_2 d)$  повинні мати однаковий знак;

2.  $D_r$  завжди негативна, а  $\beta_2$  ербієвого волокна позитивна, тому  $D_r \beta_2 < 0$ , що веде до розширення імпульсу. Вираз (4) за цієї умови ніколи не буде стабільним, але якщо компенсувати дисперсію в лазері на всіх ділянках, то отримаємо умову для стабільності:  $D_r \beta_2 > 0$ , при  $\beta_2 < 0$ ;

3. якщо розглядати імпульс в формі Гаусса, то за умови  $g_1 > 0$  дно імпульсу збільшується, а при умові  $D_i < 0$  зменшується амплітуда імпульсу, тому при таких умовах спостерігається повна нестійкість імпульсу, але при  $g_1 < 0$  і  $D_i > 0$  амплітуда імпульсу збільшується, його дно зменшується, іншими словами відбувається звуження імпульсу, він стає стабільним. На рис.7 представлені нормовані часові залежності амплітуди імпульсу, що ілюструють ці процеси.

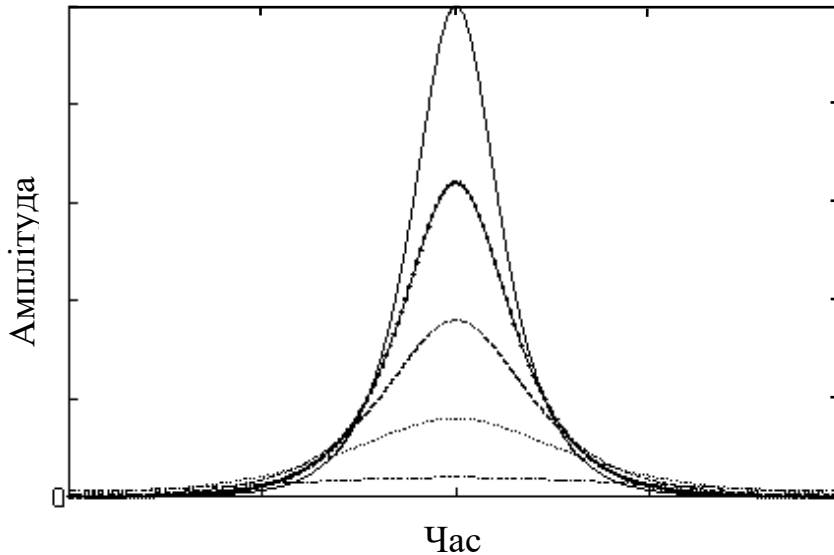


Рис. 7. Залежність амплітуди імпульсу від часу

Інформації, отриманої вище, недостатньо для повного розуміння залежності стабільності поляризації від обертання хвильових пластин, як контролерів поляризації. На основі аналізу оптичної схеми лазера (рис.2), інтенсивність випромінювання, що пройшло через таку систему, може бути представлена у вигляді [8, 11, 12]:

$$I = \kappa^2/2 \left[ 1 - \sin(2\alpha_1)\sin(2\theta) + \cos(2\alpha_1)\cos(2\theta)\cos(2(\alpha_1 + \theta - 2\alpha_2 + \Delta\phi)) \right] I_0, \quad (5)$$

де  $I_0$  – вхідна інтенсивність;  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути повороту чвертьхвильових пластин;  $\theta$  – кут повороту напівхвильової пластини;  $\kappa$  – коефіцієнт пропускання,  $\Delta\phi$  – різниця фаз.

На рис. 8 зображено залежність інтенсивності випромінювання, що проходить через систему поляризаційних елементів від кутів повороту хвильових пластин в просторі [11, 12].

Таким чином жорстко фіксуючи положення чвертьхвильових пластин, повернувши їх на необхідний кут в просторі, можна реалізувати НЕСП змінюючи кут повороту тільки напівхвильової пластини. Наприклад, зафіксувавши чвертьхвильові пластини під кутом  $78^\circ$  і  $88^\circ$ , і повернувши напівхвильову пластину на  $90^\circ$ , маємо максимум пропускання, що відповідає стабільності поляризації для реалізації синхронізації мод за допомогою НЕСП (рис. 8, в) [11, 12].

Для теоретичного дослідження контролю поляризації за допомогою РК комірки використовується рівняння Озеєна-Франка [11, 12, 21]:

$$F = 1/2 \int K_{22} \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \varepsilon_0 \Delta\varepsilon E^2 \sin^2(\theta), \quad (6)$$

де  $K_{22}$  – константа пружності;  $\Delta\varepsilon$  – діелектрична анізотропія;  $\theta(z)$  – нахил директора кристала від осі  $z$ ;  $E$  – електричне поле.

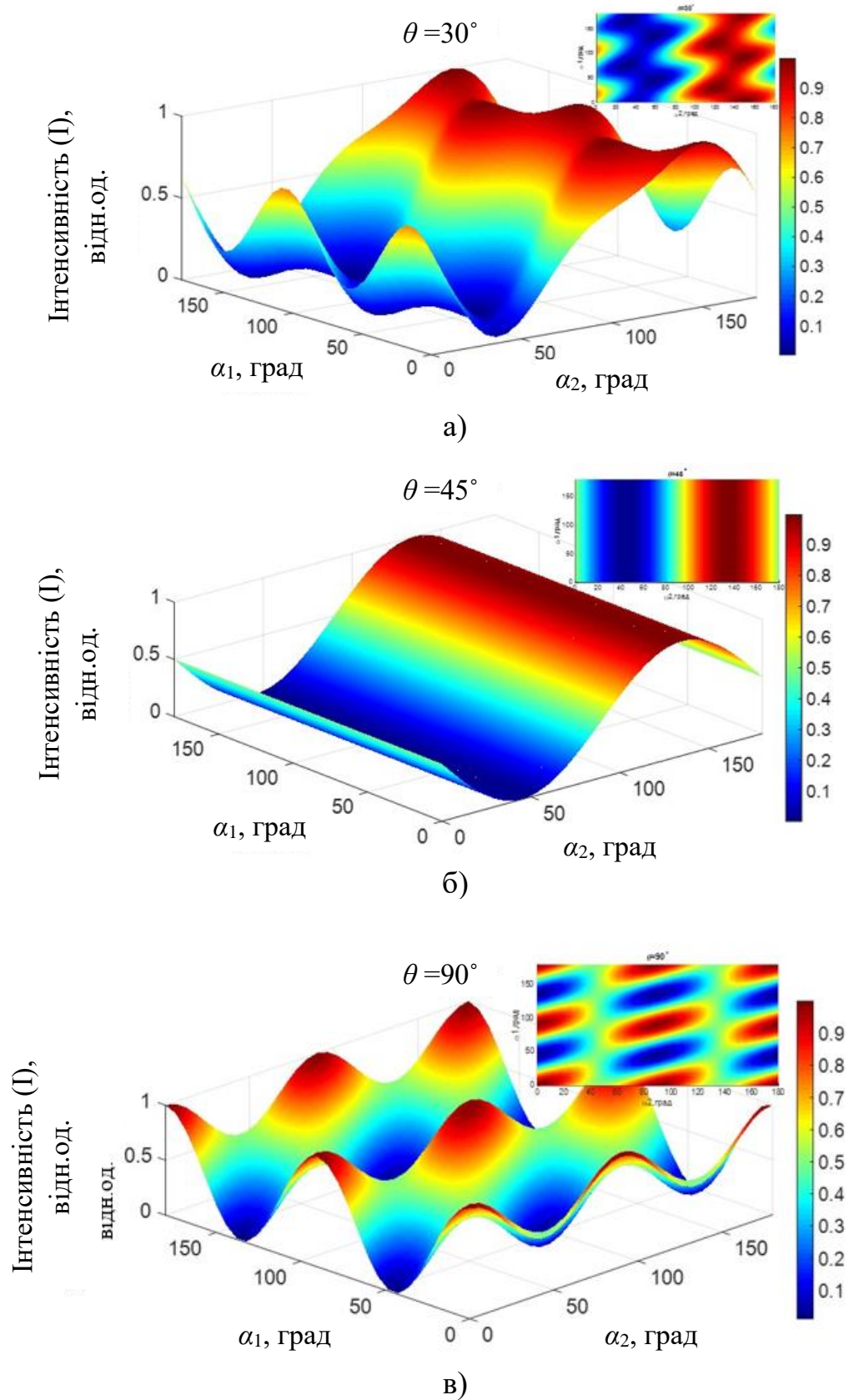


Рис. 8. Залежність інтенсивності випромінювання від кута повороту чвертьхвильових пластин ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) при різних кутах повороту напівхвильової пластини: а)  $\theta = 30^\circ$ ; б)  $\theta = 45^\circ$ ; в)  $\theta = 90^\circ$

Рівняння (6) розв'язувалось з використанням чисельних методів. На рис. 9 зображені теоретична і експериментальна крива залежності кута повороту поляризації випромінювання від прикладеної до РК комірки напруги.

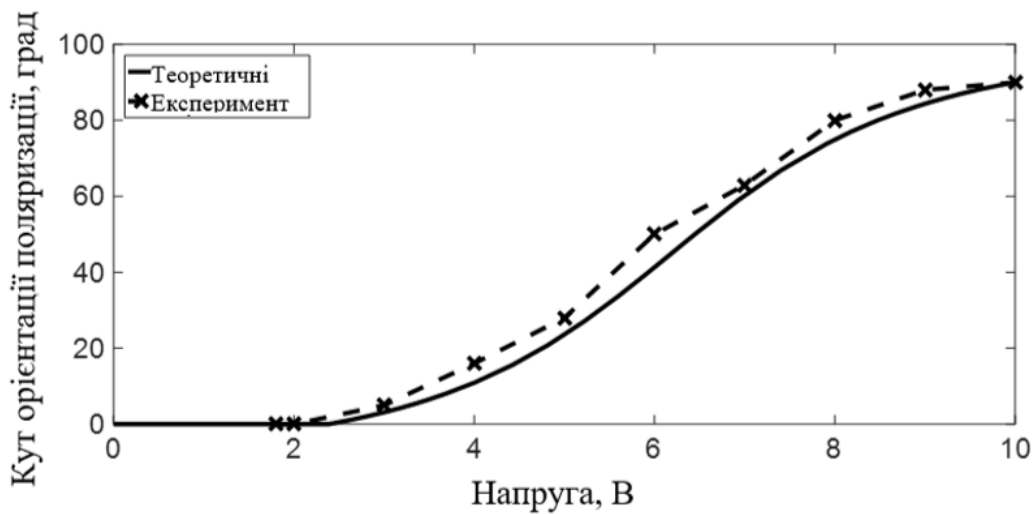


Рис. 9. Залежність кута повороту поляризації від прикладеної напруги до РК комірки

З розв'язку рівняння (6) виходить, що залежність кута повороту поляризації від прикладеної напруги до РК комірки нелінійна. З теоретичної кривої на рис. 9 слідує, що кут орієнтації поляризації в просторі змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  при прикладенні напруги від 2,2 В до 10 В [15, 20-23, 25, 27, 30]. Експериментальна крива практично збігається з теоретичною. Причиною мінімальної відмінності може служити похибка вимірювальних приладів або розрахункових методів. При експериментальному дослідженні на РК комірку подавалася напруга різної амплітуди (від 0 В до 10 В) у вигляді меандру з частотою 1 кГц [8,10].

Розв'язуючи спільно рівняння (5) і (6) було отримано вираз [12]:

$$I(U) = \kappa^2/2 \left[ 1 - \sin(2\alpha_1) \sin(2\theta(U)) + \cos(2\alpha_1) \cos(2\theta(U)) \cos(2(\alpha_1 + \theta(U) - 2\alpha_2 + \Delta\phi)) \right] I_0, \quad (7)$$

де  $\theta(U)$  – кут повороту поляризації РК коміркою від прикладеної до неї напруги  $U$ .

При фіксованому положенні чвертьхвильових пластин відносно осі РК комірки, а саме  $78^\circ$  та  $88^\circ$ , максимума пропускання інтенсивності випромінювання уздовж оптичної вісі при подачі напруги на РК комірку дорівнюватимуть 3,9; 7,1 та 10 В (рис. 10) [12].

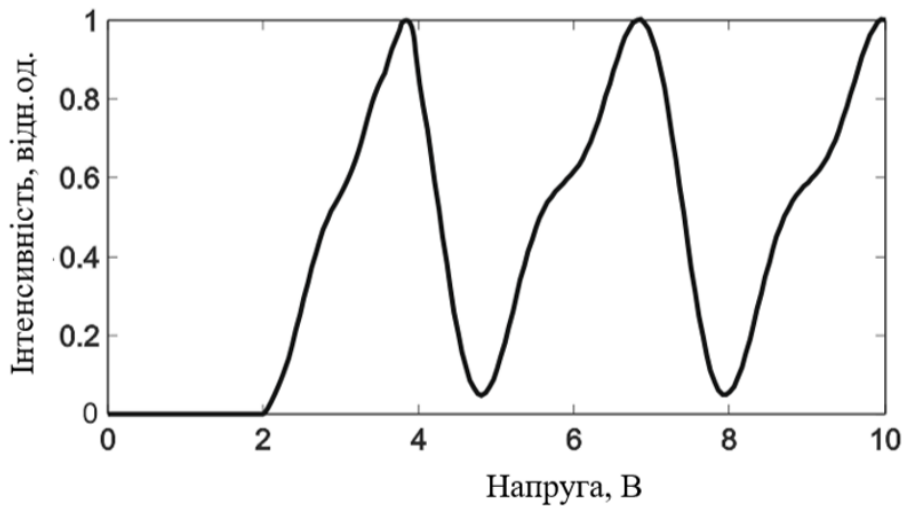


Рис. 10. Залежність інтенсивності випромінювання, яке проходить через оптичну систему лазера від прикладеної напруги до РК комірки

Таким чином, проведені дослідження доводять, що РК комірку можливо застосовувати в якості контролерів поляризації для забезпечення синхронізації мод в волоконних кільцевих лазерах. Повною мірою показана можливість управління поляризацією випромінювання РК поляризатором (коміркою), для реалізації НЕСП в кільцевих волоконних лазерах [11, 12, 14, 17, 31, 32, 34].

Для моделювання формування вихідних імпульсів лазера потрібно використовувати рівняння Гінзбурга-Ландау (8) [9-19], крім того, необхідно врахувати часовий розподіл, для цього було здійснено перехід до безрозмірних величин, тоді замість рівняння (5) отримаємо:

$$A_{n+1}(\tau) = \kappa^2/2 \left[ 1 - \sin(2(pI_n + \alpha_1)) \sin(2\theta) + \right. \\ \left. + i \cos(2(pI_n + \alpha_1)) \cos(2\theta) \cos(2(\alpha_1 + \theta - 2\alpha_2 + \Delta\phi)) \right] A_n, \quad (8)$$

де  $I_n = |A_n|^2$ ,  $p = B \sin 2\alpha_2$ .

Для розв'язання рівняння (8) використовувався стандартний метод розкладання по фізичним величинам (в даному випадку на нелінійну і дисперсійну складові) з застосуванням швидкого перетворення Фур'є. Таким чином, після кожного проходу резонатора лазера змінена амплітуда поля використовувалася як початкова умова для рівняння (3). Цей процес повторювався до тих пір, поки не встановиться режим синхронізації мод і поле, проходячи через резонатор, не буде змінюватися. На рис. 11, а зображено результат чисельного моделювання синхронізації мод лазера в відносних одиницях. З рисунка видно формування з кожним проходом все коротшого і коротшого імпульсу, до моменту повної синхронізації мод, коли амплітуда імпульсу стає постійною.



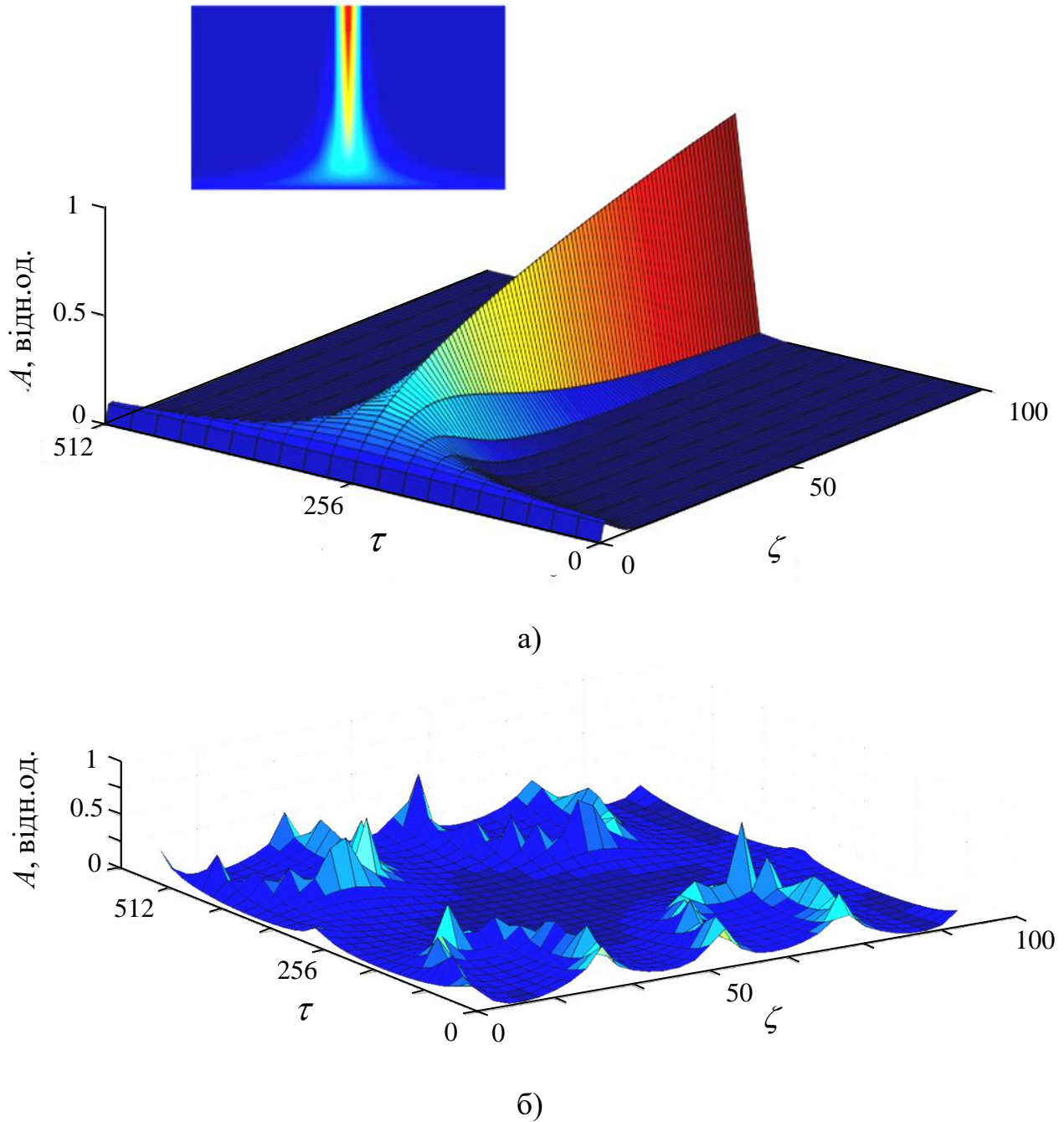


Рис. 11. Залежність амплітуди імпульса від кількості проходів по резонатору  $\zeta$  і тривалості  $\tau$ , при подачі на РК, напруги 9,8 В

На рис. 11, б представлено безперервний режим роботи лазера, який відповідає параметрам  $\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 88^\circ, \theta = 90^\circ$  або при прикладенні до РК комірки напруги 9,8 В, замість напівхвильової пластини. При такому положенні хвильових пластинок лазер працює в безперервному режимі, що відповідає хаотичному розподілу поля в резонаторі.

У **четвертому** розділі представлено експериментальний макет волоконного лазера з синхронізацією мод за допомогою рідкокристалічних комірок. Результати відображені автором в роботі [5].

На рис. 12 зображений макет кільцевого волоконного лазера, який складається з модуля накачування (рис. 13), системи управління діодом накачування, його термостабілізацією (рис. 14), системою управління РК коміркою (рис. 15), WDM-відгалужувача для введення випромінювання в кільце резонатора, 1 м активного волокна легованого іонами ербію, інтегрально-оптичного ізолятора, двох коліматорів, хвильових пластин, РК-комірок, поляризаційно-подулювального кубика. Генерація випромінювання на довжині хвилі 1,55 мкм візуально детектувалася картою візуалізації VRC4 (Thorlabs) (рис. 16). Середня потужність лазера відповідає 20 мВт і реєструвалася вимірювачем потужності OPHIR. Детектування імпульсів лазера проводилося за допомогою фотодетектора PDA20C (рис. 17), на якому зображено досить велику амплітуду сигналу, що дає можливість зробити висновок про наявність високої енергії в імпульсі з частотою слідування цих імпульсів приблизно 63 МГц.



Рис.12. Макет лазера

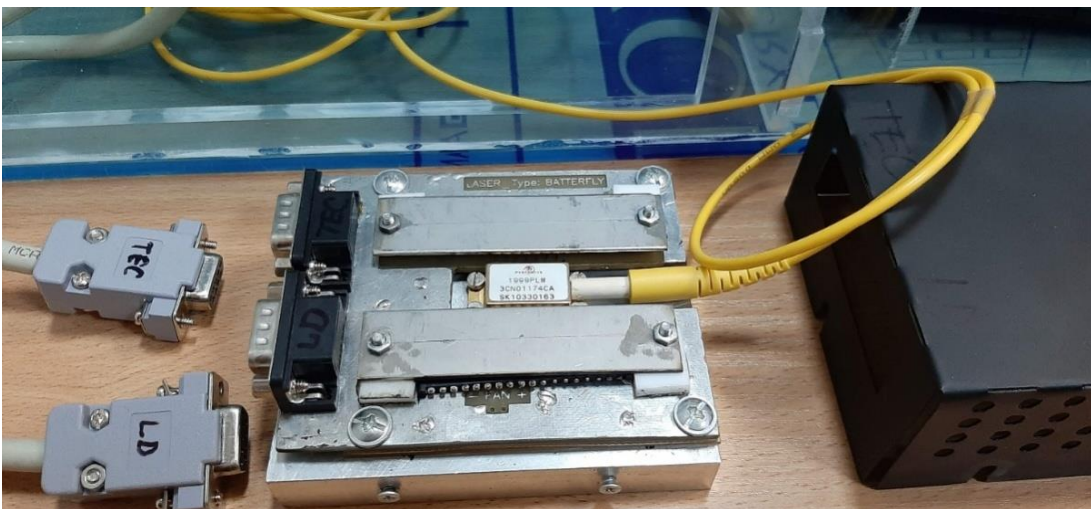


Рис.13. Модуль лазерного діода накачування



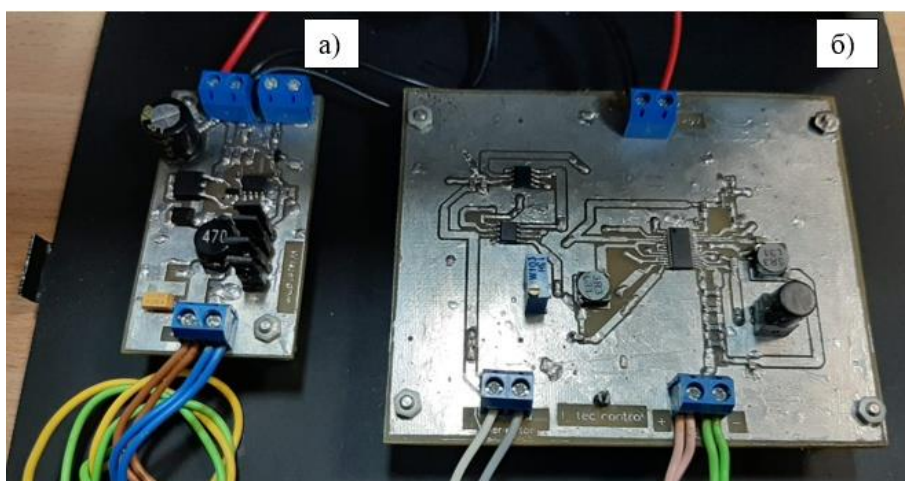


Рис. 14. Система керування лазерним діодом (а) і елементом Пельтьє (б)

Управління РК коміркою здійснювалося прямокутною формою сигналу з частотою від 1 кГц до 10 кГц та амплітудою від 0 В до 10 В. Фото дослідження системи управління РК коміркою представлена на рис. 15.



Рис. 15. Система управління РК коміркою



Рис. 16. Візуальне детектування випромінювання 1,55 мкм

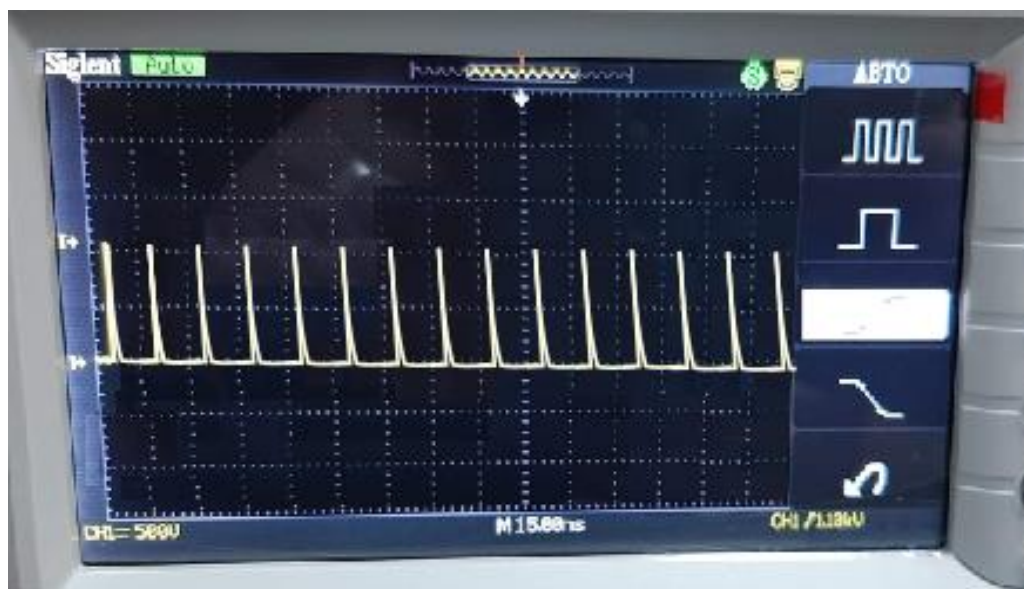


Рис. 17. Детектування синхронізації мод волоконного кільцевого лазера

Отримані дані відносні, тому що випромінювання детектувалося на граничних можливостях фотодетектора та осцилографа. Тривалість імпульсів за теоретичними розрахунками відповідає сотням фемтосекунд.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі розвитку методу синхронізації мод в ербієвому кільцевому волоконному лазері за допомогою РК поляризаторів.

Досліджено фізичні принципи синхронізації мод у волоконних лазерах для вихідного випромінювання з тривалістю імпульсів фемтосекундного порядку. Із проведеного аналізу можна зробити висновок, що для розробки кільцевого волоконного лазера з ультракороткими імпульсами найбільш ефективним є метод нелінійної еволюції поляризації, який характеризується простим налаштуванням виходу на режим і стабільною синхронізацією мод. За допомогою даного методу було отримано найкоротшу тривалість імпульсів.

Досліджені дисперсійні характеристики оптичних волокон для проектування резонаторів волоконних лазерів. Розроблена математична модель дозволяє оцінити величину та знак дисперсії оптичних волокон, які використовуються в побудові волоконних лазерів. Тим самим, дані розрахунки дають можливість позбутися дискретних компенсаторів дисперсії.

Виконано теоретичне та експериментальне дослідження РК комірки для керування поляризацією лазера. Для нематичних планарних РК комірок існує напруга відсічення, яка для застосованої в роботі комірки дорівнює 2,2 – 2,5 В. При дослідженні взаємодії лазерного випромінювання з коміркою, отримано, що кут стану поляризації в просторі змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  при прикладенні напруги від 2,2 В до 10 В. При прикладанні напруги більше 10 В РК комірка «насичується» і кут повороту поляризації змінюється дуже слабо, а при подачі напруги більше 10 В може статися електричний пробій РК шару.

Отримала розвиток теоретична модель синхронізації мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок, яка може бути застосована для досліджень лазерів з генерацією фемтосекундних імпульсів.

Експериментально досліджено умови стабільності поляризації поздовжніх мод в кільцевому волоконному лазері з використанням рідкокристалічних комірок. Результати дослідження підтверджують коректність побудованої теоретичної моделі та ефективність використання рідкокристалічних комірок в якості контролерів поляризації.

Розроблено експериментальний макет волоконного лазера з забезпеченням синхронізації мод рідкокристалічними комірками, який має параметри: тривалість імпульсів фемтосекундного порядку, довжина хвилі випромінювання 1550 нм. Дані параметри дають перевагу в використанні лазера для швидкісної передачі інформації по волоконним лініям зв'язку та квантової криптографії.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. 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., ISBN 978-617-7771-76-9.

2. Пат. На винахід UA 111309 Україна, Україна, Кільцевий волоконний фемтосекундний лазер / О. С. Гнатенко, Ю.П. Мачехін // ХНУРЕ. – від 11.04.2016., Бюл.№ 7.

3. Guryev I. V., Sukhoivanov I. A., **Gnatenko A. S.**, Lipkina V. I. Multiple plane waves expansion method for dispersive media. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2008. Vol. 67, No 9. P. 833–841. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

4. **Гнатенко А. С.**, Мачехін Ю. П. Устойчивость режима генерации волоконного кольцевого лазера. *Радиотехника*. 2014. № 178. С. 48–51.

5. **Гнатенко А. С.**, Мачехін Ю. П., Натарова Ю. В. Система управления диодами накачки волоконных кольцевых фемтосекундных лазеров. *Прикладная радиоэлектроника*. 2015. Т. 14, № 2. С. 185–189.

6. **Гнатенко А. С.**, Алексеева Е. Д. Расчет дисперсионных характеристик оптических волокон для проектирования кольцевых резонаторов волоконных лазеров. *Радиотехника*. 2015. № 182. С. 106–109.

7. Мачехін Ю. П., Курской , Ю. С. **Гнатенко А. С.** Измерение величин со сложной динамикой как основная задача нелинейной метрологии. *Метрология и приборостроение*, 2016, № 4, С. 18–21.

8. **Gnatenko A. S.**, Machekhin Yu. P., Vasko K. O. Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка*. 2015. Вип. 1(23). С. 20–23.

9. **Gnatenko A. S.**, Machekhin Yu. P. Generation mode stability of a fiber ring laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, № 7. P. 641–647. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

10. **Gnatenko A. S.**, Machekhin Yu. P., Obozna V. P. Investigation of the properties of electrically controlled phase plates for use in laser technology. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* 2017. Vol. 16, № 1, 2. P. 88 – 92.

11. **Gnatenko A. S.**, Machekhin Yu. P., Kurskoy Yu. S., Obozna V. P. Providing mode locking in fiber ring lasers. *J. Nano-Electron. Phys.* 2018. No 2. P. 02033. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

12. **Gnatenko A. S.**; Machekhin Yu. P.; Kurskoy Yu. S.; Obozna V. P.; Vasianovych A. V. Ring fiber lasers for telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, № 6. P. 541–548. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

## 2. Наукові праці апробаційного характеру

13. **Гнатенко А. С.**, Мачехин Ю. П. Исследование стабильности волоконного кольцевого лазера для DWDM систем и обработки информации. *МРФ-2014*, октябрь 2014 г. Харьков, 2014. С. 105–107.

14. **Gnatenko A. S.**, Vasko K. A. Mode locking in a fiber femtosecond laser using liquid crystal cells. *International Young Scientists Forum on Applied Physics*, 30 september Dnipropetrovsk, 2015. С. 1–4.

15. **Гнатенко А. С.**, Васько К. А., Алексеева Е. Д. Исследование жидкокристаллических ячеек для обеспечения синхронизации мод волоконного лазера с нелинейной эволюцией поляризации. *VIII Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники»*, 01 октября 2015г. Одесса, 2015. С. 149 – 150.

16. **Гнатенко А. С.**, Васько К. А., Алексеева Е. Д. Исследование дисперсии в волоконных лазерах с нелинейной эволюцией поляризации мод. *VIII Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники»* 01 октября 2015г. Одесса, 2015. С. 146 – 148.

17. **Gnatenko A. S.**, Vasko K. A, Aleksieieva K. D. The study polarization control using the lc cells inside the resonator of a fiber femtosecond laser. *«Electronics and Applied Physics»*, 23 октября 2015 г. Киев, 2015. С. 24–25.

18. **Гнатенко А. С.**, Васько К. А., Алексеева Е. Д. Обеспечение телекоммуникационного С-диапазона, рекомендованного ИТУ, фемтосекундным волоконным источником излучения. *5-я Международная научно-практическая конференция «Инфокоммуникации – современность и будущее»*, 30 октября 2015г. Одесса, 2015. С. 14–16.

19. Васько К. А., **Гнатенко А. С.**, Васько К. А., Методы теоретического описания уравнения Гинзбурга-Ландау для реализации автоматизации исследований волоконных лазеров. *Матеріали 20 Міжнародного молодіжного форуму. Т. 1*. Харків: ХНУРЕ, 2016. С. 170–171.

20. **Гнатенко А. С.**, Ибадуллина А. М. Электронно-управляемые контроллеры поляризации для кольцевых волоконных лазеров. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, 18-22 квітня 2016 р. м. Суми, 2016. С. 42.

21. **Гнатенко А. С.** Исследование поляризации излучения при прохождении через жидкокристаллическую ячейку. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, 17-21 квітня 2017 р.м. Суми, 2017. С. 52.

22. **Гнатенко А. С.,** Васько К. А., Обозная В. П., Кальная О. А., Бачило А. К. Расчет основных параметров жк-ячеек для применения в устройствах фотоники. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем: матеріали та програма науково-технічної конференції*, 22-24 листопада 2017 р. Дніпро, 2017. С. 214.

23. **Гнатенко А. С.,** Обозная В. П., Кальная О. А., Васько К. А., Бачило А. К. Исследование применения жидких кристаллов для создания лазеров. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали I міжнародної науково-технічної конференції*, Харків:ХПІ, 2017. С. 216.

24. **Hnatenko O. S.<sup>2</sup>,** Kalna O. O. Modeling the interaction of laser radiation with complex biological optical systems. *Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018*, 5-9 лютого 2018 р. Суми, 2018. С. 201.

25. **Hnatenko O. S.,** Obozna V. P. The creation of an optical laboratory using modern optical applications. *Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018*, 5-9 лютого 2018 р. Суми, 2018. С. 200.

26. Sivni V. B., **Hnatenko O. S.** Investigation of the Generation of Droplet Lasers. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, м. Суми, 5-9 лютого 2018 р. Суми: СумДУ, 2018. С. 26.

27. **Hnatenko O. S.,** Obozna V. P. Calculation of the Stability of the Fiber Ring Laser with Liquid Crystal Polarization Controllers. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, м. Суми, 5-9 лютого 2018 р. Суми: СумДУ, 2018.

28. **Hnatenko O. S.,** Obozna V. P. Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding in Formation. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, м. Суми, 5-9 лютого 2018 р. Суми: СумДУ, 2018. С. 24.

29. Sivni V. B., **Hnatenko O. S.** Use of femtosecond lasers to encode information. *Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції*, м. Суми, 23-26 квітня 2019 р. Суми: СумДУ, 2019. С. 105.

30. **Гнатенко О. С.,** Жданова Ю. В. Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв. *10-та Всеукраїнська науково-практичної конференції молодих учених і студентів*, 16-17 травня 2019 р. м. Одеса, 2019. Одеса. С. 213–214.

31. **Hnatenko O. S.,** Neofitnyi M. V., Machekhin Yu. P., Zarytskyi V. I., Zhdanova Yu. 1,55  $\mu\text{m}$  fiber laser with electronic controlled mode-locking. *IEEE*

---

<sup>2</sup> Hnatenko – прізвище Гнатенко англ.мовою українською транслітерацією



8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL\*2019, September 6-8, Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 276–279. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

32. Zhyla O. V., Nerukh A. G., **Gnatenko A. S.** Airy pulse transformation by an accelerated medium boundary. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL\*2019*, September 6-8, Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 204–507. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

33. **Hnatenko O. S.**, Neofitnyi M. V., Machekhin Yu. P., Gulak S. V. Design and study of a laser system for detecting optical devices. *International conference on natural science and technology (ICONAT 2019)*., September 18-20. Kharkiv, 2019. P. 28.

34. Neofitnyi M. V., Kurskoy Yu. S., **Hnatenko O. S.**, Machekhin Yu. P., Topological model of laser emission parameters research. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL\*2019*, September 6-8, Sozopol, Bulgaria, 2019. P. 280–83. (Входить до наукометричної бази SCOPUS).

## АНОТАЦІЯ

**Гнатенко О.С.** Синхронізація мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – «Фізика приладів, елементів та систем». Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Мета роботи – розвиток методу синхронізації мод в волоконному лазері на основі використання керованих РК комірок. Для досягнення мети роботи були поставлені і вирішені наступні завдання: розвинуто теоретичну модель синхронізації мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок; досліджено стабільність поляризації поздовжніх мод в кільцевому волоконному лазері з використанням рідкокристалічних комірок; розроблено експериментальний макет волоконного лазера з забезпеченням синхронізації мод за допомогою рідкокристалічних комірок. Отримала подальший розвиток теоретична модель синхронізації мод волоконного лазера. Експериментально досліджено умови стабільності поляризації поздовжніх мод в кільцевому волоконному лазері з використанням рідкокристалічних комірок. Результати дослідження підтверджують коректність побудованої теоретичної моделі. Розроблений експериментальний макет волоконного лазера дозволив отримати лінійно-поляризоване випромінювання на довжині хвилі 1,55 мкм з тривалістю імпульсів фемтосекундного порядку. Показано, що розроблена система має значно поліпшені експлуатаційні якості.

Результати роботи складають підґрунтя для подальшого розвитку немеханічних методів та оптимізації механізмів формування ультракоротких імпульсів випромінювання в лазерних системах з синхронізацією мод. Отримані в роботі результати сприяють створенню нових типів випромінювачів



з фемтосекундною тривалістю імпульсів та довжиною хвилі випромінювання 1550 нм, для високошвидкісної передачі інформації, систем кодування інформації, а також дозволяють забезпечити більш надійну роботу телекомунікаційних систем.

**Ключові слова:** лазер, оптичне волокно, синхронізація мод, дисперсія, поляризація, тривалість імпульсу, фаза, довжина хвилі.

## АННОТАЦІЯ

**Гнатенко А.С.** Синхронізація мод волоконного лазера з допомогою жидкокристаллических ячеек. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Физика приборов, элементов и систем». Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертации изложены решения актуальной научной задачи, а именно, развития метода синхронизации мод в волоконном лазере с помощью жидкокристаллических ячеек. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Представленная работа относится к области научных исследований, которые теоретически, по моделям и экспериментально исследуют физические явления, направленные на решение проблемы создания новой и совершенствования существующей техники для народного хозяйства, которая способствовала бы научно-техническому прогрессу и охране окружающей среды, в частности, синхронизация мод в волоконном лазере с помощью жидкокристаллических ячеек для генерации ультракоротких импульсов.

Цель работы – развитие метода синхронизации мод в волоконном лазере с помощью жидкокристаллических (ЖК) ячеек. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи: развить теоретическую модель синхронизации мод волоконного лазера с помощью жидкокристаллических ячеек; исследовать стабильность поляризации продольных мод в кольцевом волоконном лазере с использованием жидкокристаллических ячеек; разработать экспериментальный макет волоконного лазера с обеспечением синхронизации мод жидкокристаллическими ячейками.

В диссертации получила развитие теоретическая модель синхронизации мод волоконного лазера с помощью жидкокристаллических ячеек, которая позволяет получить генерацию ультракоротких импульсов излучения. Экспериментально исследованы условия стабильности поляризации продольных мод в кольцевом волоконном лазере с использованием жидкокристаллических ячеек. Результаты исследования подтверждают корректность построенной теоретической модели и эффективность использования жидкокристаллических ячеек в качестве контроллеров поляризации. На основании развитой теоретической модели впервые разработан экспериментальный макет волоконного лазера с обеспечением

синхронизации мод жидкокристаллическими ячейками, позволяющий получить линейно-поляризованное излучение на длине волны 1,5 мкм с длительностью импульса фемтосекундного порядка.

Результаты работы составляют основу для дальнейшего развития немеханических методов и оптимизации механизмов формирования ультракоротких импульсов излучения в лазерных системах с синхронизацией мод. Полученные в работе результаты способствуют созданию новых типов излучателей с фемтосекундной длительностью импульсов и длиной волны излучения 1550 нм, для высокоскоростной передачи информации, систем кодирования информации, а также позволяют обеспечить более надежную работу телекоммуникационных систем.

**Ключевые слова:** лазер, оптическое волокно, синхронизация мод, дисперсия, поляризация, длительность импульса, фаза, длина волны.

### ABSTRACT

**Hnatenko O.S.** Mode-locking in the Fiber Laser based on Liquid Crystal Cells. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.01 – «Physics of devices, elements and systems». Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The purpose of the work is to develop the mode-locking method in a fiber laser while by means liquid crystal cells. Achieving the purpose of the work posed the following tasks that were further solved: to develop a theoretical model of mode-locking a fiber laser using liquid crystal cells, to investigate the polarization stability of longitudinal modes in a fiber ring laser using liquid crystal cells, to develop an experimental prototype of a fiber laser with mode-locking by liquid crystal cells. The theoretical model of fiber laser with mode-locking was further developed. The conditions for the stability of polarization of longitudinal modes in a ring fiber laser using liquid crystal cells were experimentally studied. The research results confirm the correctness of the constructed theoretical model. The developed experimental model of a fiber laser made it possible to obtain linearly polarized radiation at a wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$  with a pulse duration of the femtosecond order. It is shown that the developed system has significantly improved performance.

The results of the work form the basis for the further development of non-mechanical methods and optimization of the mechanisms of formation of ultrashort radiation pulses in laser systems with mode-locking. The results obtained in the work contribute to the creation of new types of emitters with a femtosecond pulse duration and a radiation wavelength of 1550 nm, for high-speed transmission of information, information coding systems, and also allow for more reliable operation of telecommunication systems.

**Keywords:** laser, optical fiber, mode-locking, dispersion, polarization, pulse duration, phase, wavelength.