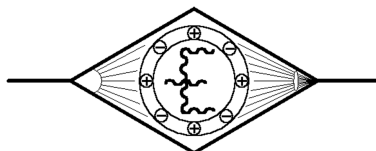


Вінницький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Академія інженерних наук України
Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
Ужгородський національний університет
Грузинський технічний університет
Люблінський технічний університет
Міжнародні товариства оптичної техніки SPIE, OSA



Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2001 році
Виходить 2 рази на рік

№2 (24), 2012

Передплатний індекс **91673**

Зареєстрований Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво про реєстрацію – КВ № 15295–3867Р від 22.06.2009 р.

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ВНТУ, протокол № 4 від 29 листопада 2012р.

Міжнародний науково-технічний журнал “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології” є науковим виданням, публікації в якому визнаються при захисті дисертаційних робіт з технічних наук (постанова Президії ВАК України №1-05/6 від 12 червня 2002 року) (повторна реєстрація, постанова Президії ВАК України №1-05/1 від 10 лютого 2010 р)
© Вінницький національний технічний університет, оформлення, верстка, 2012

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
Україна, 21021, м. Вінниця,
вул. Хмельницьке шосе, 95.

Тел.: +38 (0432) 59-80-19, 59-84-92, 59-84-50
Факс: +38 (0432) 46-57-72
<http://www.oeipt.vntu.edu.ua>
E-mail: oeipt@ukr.net

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

Кожем'яко В.П. Вінницький національний технічний університет, Україна

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

Готра З.Ю. Національний університет "Львівська політехніка", Україна

Натрошвілі О.Г. Грузинський технічний університет, Тбілісі, Грузія

Осадчук В.С. Вінницький національний технічний університет, Україна

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Азаров О. Д.
Вінницький національний технічний університет
Алієв Алекпер Алі Ага огли
Бакинський державний університет, Азербайджан
Бобицький Я.В.
Національний університет "Львівська політехніка"
Брілль Г.Є.
Саратовський державний медичний університет, Росія
Бунь Р.А.
Національний університет "Львівська політехніка"
Вассіленко В.Б.
Новий університет Лісабону, Лісабон, Португалія
Вінцюк Т.К.
Міжнародний науково-навчальний центр ЮНЕСКО
інформаційних технологій та систе, м. Київ
Володарський Є. Т.
Національний університет України "КПІ", Київ
Вуйцик В.
Люблінський Технічний Університет, Польща
Габко В.В.
Вінницький національний технічний університет
Граур А.
Університет "Stefan cel Mare", Сучава, Румунія
Грищик В.В.
Державний науково-дослідний інститут
інформаційної інфраструктури, Львів
Дубовой В.М.
Вінницький національний технічний університет
Жерардо Іоване
Університет Салерно, Італія
Захос Е.
Національний технічний університет, Афіни, Греція
Злепко С.М.
Вінницький національний технічний університет
Канторіно Майк
Науково-дослідна лабораторія Naval Air Systems Command, США
Кветний Р.Н.
Вінницький національний технічний університет
Коваленко В.С.
НДІ лазерної техніки та технологій Національний технічний
університет України "КПІ",
Коробов А.М.
Президент корпорації „Лазер і здоров'я”, Харків
Кичак В.М.
Вінницький національний технічний університет
Кузьмін І.В.
Вінницький національний технічний університет
Кульчин Ю.М.
Далекосхідний державний технічний університет,
Владивосток, Росія
Кутаєв Ю.Ф.
НВО "Астрофізика", Москва, Росія
Лежнюк П.Д.
Вінницький національний технічний університет
Лепіх Я.І.
Одеський національний університет ім. Мечникова

Лужецький В.А.
Вінницький національний технічний університет
Макац В.Г.
Вінницька філія Українського НДІ медицини транспорту
Медиковський М.О.
Національний університет "Львівська політехніка"
Мокін Б.І.
Вінницький національний технічний університет
Мокін В.Б.
Вінницький національний технічний університет
Мороз В.М.
Вінницький національний медичний університет
Муравський Л.І.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів
Николайчук Я.М.
Тернопільська академія народного господарства,
Олексенко П.Ф.
Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ
Осадчук О.В.
Вінницький національний технічний університет
Осінський В.І.
Державне підприємство Науково-дослідний інститут
Мікроприладів, Київ
Павлов С.В.
Вінницький національний технічний університет
Петрук В.Г.
Вінницький національний технічний університет
Прангшвіллі Арчіл Іверієвич
Грузинський державний технічний університет, Тбілісі
Перейра Хосе Мігель
Політехнічний інститут Сетубалу, Португалія
Рассохін І.Т.
НПЦ ОЕП «ОПТЕЛ», Москва, Росія
Русин Б.П.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України,
Салдан Й.Р.
Вінницький національний медичний університет
Саченко А.О.
Тернопільська академія народного господарства
Свечніков С.В.
Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ
Сидоров О.С.
Міжнародна Академія інформатизації при ООН
Студеняк І.П.
Ужгородський національний університет
Столярчук П. Г.
Національний університет України "Львівський
політехнічний університет"
Тимчик Г.С.
Національний технічний університет України "КПІ"
Тимченко Л.І.
Київський університет економіки і технологій транспорту
Шевчук В.І.
Український державний науково-дослідний інститут
медико-соціальних проблем інвалідності, Вінниця

ВІДПОВІДАЛЬНІ СЕКРЕТАРІ:

Лисенко Г.Л. Вінницький національний технічний університет, Україна
Маліновський В.І. Вінницький національний технічний університет, Україна
Костюкевич С.О. Інститут фізики напівпровідників НАНУ, Київ, Україна
Кожем'яко А.В. Вінницький національний технічний університет, Україна

ТЕХНІЧНІ СЕКРЕТАРІ:

Маліновський В.І., Кожем'яко А.В.,
Яровий А.А., Штельмах О. О.
РЕДАКТОРИ-КОРЕКТОРИ:
Прадівланий М.Г., Веремієнко С.Я.

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

ЗМІСТ

**МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ
ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ**

Дорошенко Г.Д., Дусанюк С.В., Ігнатенко О.Г. Оптоелектронний інформаційний пристрій для регулювання дорожнього руху.....	5
Яровий А.А. Багаторівневі паралельно-ієрархічні системи та їх комп'ютерне моделювання.....	9
Кичак В.М., Ленков Є.С., Лоза В.М., Кольцов Р.Ю. Оцінка роздільної здатності алгоритму лінійного передбачення.....	18
Бевз О.М., Васюра А.С., Лісовенко А.І. Підвищення ефективності динамічного розподілення пам'яті в оптоелектронних системах.....	22

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА
РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ**

Мартинюк Т.Б., Кожем'яко А.В., Фофанова Н.В., Медвідь А.В. Організація базових нейроструктур.....	27
Кожем'яко В.П., Дорошенко Г.Д., Мартинюк Т.Б., Гуцол О.М. Порівняльний аналіз оптоелектронних інтегральних схем на базі матриць смарт-пікселів.....	36
Майданюк В.П., Кириченко О.В. Нові підходи до реалізації оптоелектронних логіко-часових систем для перетворення і ущільнення зображень.....	41
Шкуліна П.А., Жердєв М.К., Ленков С.В. Загальний підхід до побудови перевіряючих тестів для проведення діагностування аналогових пристроїв динамічним методом.....	45

**ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ
ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Осинский В.И., Деминский П.В., Ляхова Н.Н., Моторный А.П., Масол И.В., Суховий Н.О. Температурные и концентрационные свойства $\text{Si}/\text{Al}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ RGB источников света.....	50
Лисенко Г.Л., Костюченко Д.С. Лазери поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором для побудови масивів оптоелектронної пам'яті.....	58
Клепиковський А.В. Визначення власних резонансних частот багатокаскадних термоелектричних елементів та оцінка їх впливу на роботу електромеханічних резонансних пристроїв.....	63
Микитюк З. М., Фечан А. В., Сушинський О. Є., Шимчишин О. Й., Коцун В. І. Зміна динамічних характеристик холестеричних рідких кристалів під впливом нанорозмірних домішок.....	70
Іванов О.А. Оптично-керований комутатор на основі фотонних кристалів.....	76

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Барило Г.І., Готра З.Ю., Зазуляк А.М., Кицера О.О., Кожухар О.Т., Кус Н.І. Апаратно-програмне забезпечення лікувального процесу в оториноларингології з неперервним оптико-електронним тестуванням біооб'єкта.....	81
Ткачук Р.А., Цуприк Г.Б., Яворський Б.І. Підвищення інформативності та швидкодії біотехнічних систем.....	86
Заболотна Н.І., Ігнатенко О.Г., Радченко К.О., Краснощока А.К. Аналіз оптичних і поляризаційно-кореляційних приладів і систем для діагностики фазово-неоднорідної структури шарів біологічних тканин і рідин.....	95
Маліновський В.І. Метод та оптичний сенсор підвищення точності неінвазивного моніторингу концентрацій показників крові людини.....	108

Кошечая Л.А.

Обеспечение аналитической надежности результатов клинических лабораторных исследований..... 115

Кожем'яко В.П., Загоруйко Л.В., Мартянова Т.А.

Аналітичні аспекти реалізації систем з обробленням біомедичних зображень на основі відеографічних технологій..... 121

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Семчук О.Ю., Гаврилюк О.О.

Теплові ефекти при взаємодії потужного лазерного випромінювання з поверхнею напівпровідникових матеріалів..... 127

Кожем'яко В.П., Маліновський В.І., Ярославський Я.І., Мороз В.В., Штельмах О.О.

Локальні геоінформаційно-енергетичні мережі на новітніх волоконно-оптичних лініях із спектротрансформаторним живленням..... 137

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Микитюк З. М., Фечан А. В., Сушинський О. Є., Барило Г. І.,

Бойко О. В., Іванюк Х. Б., Турик П. М.

Температурний сенсор на основі селективного відбивання в рідких кристалах..... 147

ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.315.592.2

В.И. ОСИНСКИЙ¹, П.В. ДЕМИНСКИЙ^{1,4}, Н.Н. ЛЯХОВА¹, А.П. МОТОРНЫЙ², И.В. МАСОЛ³,
Н.О. СУХОВИЙ⁴

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА SI/A^{III}B^V RGB ИСТОЧНИКОВ СВЕТА.

¹Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт микроприборов»
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины,
ул. Северо-Сырецкая, 3, г. Киев, 04136,
тел./факс +38(044)434-72-77, E-mail: osinsky@imd.org.ua

²Винницкий национальный технический университет
ул. Хмельницкое шоссе 95, г. Винница, E-mail: flashmp@rambler.ru

³Компания «Росток»
бул. Лёвца, 4, Киев, 0306, E-mail: rostok@ak-rostok.kiev.ua

⁴Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
ул. пр. Победы 37, г. Киев, 03056, E-mail: p.deminskiy@gmail.com

Аннотация. На основании исследований среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллической решетки твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, обоснована необходимость использования последних для реализации монолитных $\text{Si}/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ RGB источников света в одном технологическом процессе. На базе разработанных гибридно-интегральных RGB, RGBW, RGBO источников света, экспериментально подтверждена целесообразность использования каналов излучения в диапазонах 450-455, 525-535, 600-615 нм для повышения индекса цветопередачи. Предложена методика и разработано программное обеспечение, позволяющее задавать процентное соотношение распределения активных слоев для R, G, B-каналов излучения по поверхности чипа.

Ключевые слова: RGB, источник белого света, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, индекс цветопередачи, Si, $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

ВСТУПЛЕНИЕ

Технический и научный поиски в области монолитной интеграции светоизлучающих гетероструктур привел к разработке основ для создания RGB-светодиодов с использованием буферных и темплетных нанослоев со специфическими свойствами, реализация которых оказалась возможной в результате управления механизмами роста III-нитридов и III-оксидов. Поставленные задачи привели к разработке нескольких технологий создания монолитных RGB источников белого света на одном кристалле [1].

Для создания полноцветовой гаммы светодиодов существенной является разработка технологии выращивания гетероструктур с минимальным количеством дефектов на границах [2]. Важной особенностью при росте эпитаксиальных пленок является то, что в сверхтонких слоях несоответствие параметров решеток в определенных случаях влечет лишь упругую деформацию растяжения или сжатия на гетерограницах. При этом чисто упругая деформация не сопровождается образованием дислокаций и дефектов – центров безизлучательной рекомбинации.

Поставленная задача для реализации RGB источников света на одном кристалле заключается в получении эпитаксиальных структур высокого качества с хорошим согласованием кристаллических решеток разнородных материалов. Решение поставленной задачи связано с необходимостью снижения плотности дефектов в светоизлучающих кристаллах на границах материалов, что приводит к низкому тепловому разогреву кристаллической структуры и, как результат - росту эффективности излучения.

Базовым процессом получения светодиодных структур для систем освещения является газофазная эпитаксия III-нитридов из металлоорганических соединений алюминия, галлия, индия и аммиака. Гетероструктуры инжекторов электронов и дырок формируются молекулярно-лучевой (МЛЭ) или МОС-гидридной эпитаксией. Излучающий слой формируется лазерным или ионно-плазменным воздействием на процесс роста, последующего отжига и формирования p-n перехода который пересекает всю толщину активной области таким образом, что переход формируется планарной или другой формы.

Современные методы планарной технологии микро- и наноструктур позволяют создавать большое количество плоских p-n переходов с различной топологией в одном чипе, что обеспечивает оптимизацию протекания электрического тока и выходного излучения из светодиодной структуры. Смешивание белого света в кристалле светодиода может быть реализовано включением нескольких активных слоев с разными энергиями запрещенных зон для создания смешанного света широкого спектра излучения.

ВЫБОР ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ R, G, B АКТИВНЫХ СЛОЕВ

За последние несколько лет исследований в области твердых растворов, в том числе свойств системы материалов Ga-Al-In-N для светодиодного применения, большое внимание уделялось исследованию возможностей получения излучающих диодов на основе гетероструктур InGaN/GaN [3]. Это вызвано, в значительной мере, наличием уникальных физических свойств нитрида галлия и гетеропары InGaN/GaN, из которых на сегодняшний день изготавливают активную область светодиодных чипов синего и зеленого диапазонов излучения. Ширина запрещенной зоны InGaN может варьироваться в пределах от 0,7 до 3,4 эВ, расширяя возможности для их применения [4].

Исследования спектров электролюминесценции СД на основе GaN (рис. 1) на монохроматоре МДР-23 при изменении температуры от -40 до +60 °С с использованием климатической камеры теплехолода *Mini Subzero MC71* показали расширение длинноволнового крыла спектра 5 нм/100К и смещение пика длины волны 3-10 нм/100К, что вызвано рекомбинацией через примесные уровни внутри запрещенной зоны.

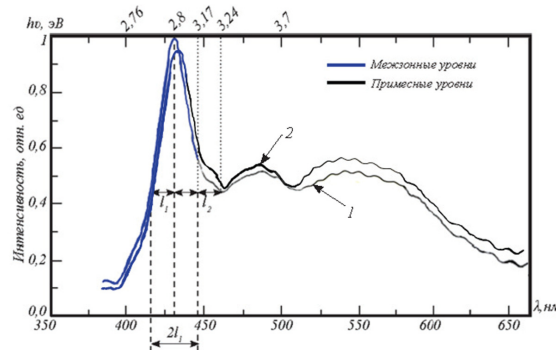


Рис. 1. Спектры электролюминесценции СД на основе GaN. 2l1 – гармоническая часть спектра, 2l2 – ангармоническая часть спектра. 1- 273 К, 2 – 333К

Увеличение температуры активной области привело к увеличению интенсивности спектров примесных уровней. При этом интенсивность спектра, которая отвечает за межзонные переходы уменьшается на 0,05 отн. ед./100 К, что вызвано смещением атомов кристаллической решетки.

Для определения влияния динамики кристаллической решетки при различных температурах, впервые были проведены расчеты среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллических решеток соединения GaN и твердого раствора InGaN.

Для определения закономерностей температурного влияния на динамику кристаллической решетки использовано выражение для определения среднеквадратических динамических смещений атомов:

$$\sqrt{U_{дин}^2} = \frac{3h^2T}{4\pi^2 km\Theta^2} \left[\Phi\left(\frac{\Theta}{T}\right) + \frac{\Theta}{4T} \right],$$

где $\Phi\left(\frac{\Theta}{T}\right)$ – функция Дебая (определяется для каждого значения $x = \frac{\Theta}{T}$), m – усредненная эффективная масса ионов.

В результате проведенных расчетов показано (рис. 2), что динамика кристаллической решетки GaN вдвое стабильнее по сравнению с InP при аналогичных температурах, что подтверждено так же проведенными экспериментальными исследованиями интенсивности излучения при изменении температуры в диапазоне -40°C $+60^{\circ}\text{C}$, которые показали вдвое большее падение интенсивности излучения СД на основе InP в сравнении с GaN.

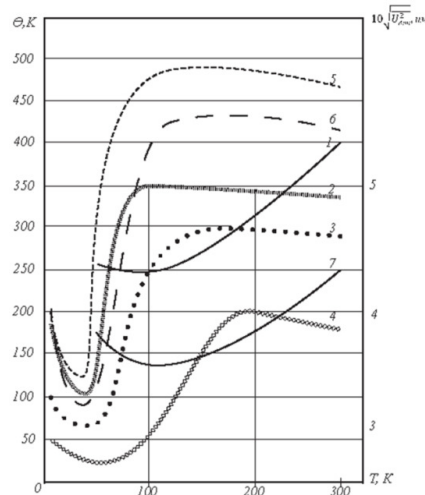


Рис. 2. Зависимости дебаевской температуры (2 – GaAs; 3 – GaN; 4 – InGaN; 5 – AlGaInP; InP - 6) в системе AlGaInNPAs и среднеквадратическими динамическими смещениями атомов ($U_{\text{дин}}^2$) для AlGaInP (1) и GaN (7)

При повышении температуры интенсивность излучательной рекомбинации уменьшается по экспоненциальному закону, что соответствует увеличению среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллической решетки. Между относительным квантовым выходом излучательной рекомбинации и среднеквадратическими динамическими смещениями существует зависимость:

$$\ln \frac{1}{\Phi} = A + R \sqrt{U_{\text{дин}}^2(T)}$$

исходя из которой относительный квантовый выход излучения GaN меньше зависит от среднеквадратических динамических смещений чем для твердых растворов AlInGaP (рис. 3)

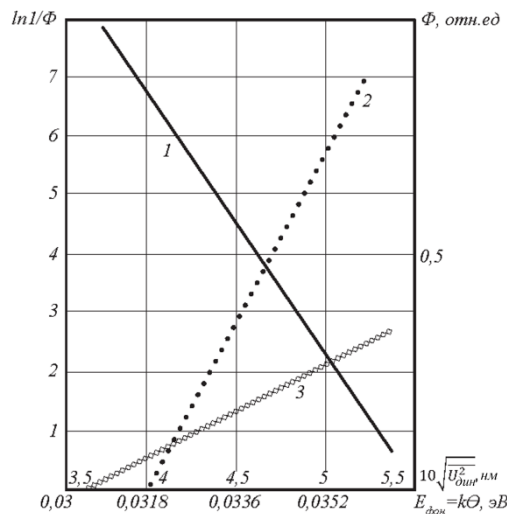


Рис. 3. Зависимость относительного квантового выхода излучательной рекомбинации от энергии фононов фосфида индия (1), среднеквадратичных динамических смещений атомов решетки AlGaInP (2) и GaN (3)

Проведенные исследования обосновывают целесообразность замены зачастую используемых твердых растворов AlInGaP на $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с содержанием индия ~ 30-40%.

Реализация системы InGaN с тремя каналами излучения из микрокластерных структур позволяет, за счет технологического управления концентрацией индия и, как следствие шириной запрещенной зоны твердого раствора, изготавливать структуры, способные излучать во всем видимом диапазоне длин волн [5,6], что способствует технологической интеграции RGB излучающих структур на одном кристалле. Преимущества в использовании однотипной системы твердых растворов InGaN заключается в уменьшении количества технологических операций, использовании одинаковых реагентов, схожих технологических маршрутов и условий внутри эпитаксиального реактора в процессе изготовления.

Несмотря на это, одной из главных проблем в технологии изготовления RGB источника света на одном кристалле с использованием InGaN в качестве активного слоя для трех каналов остается изготовление светодиодов красного диапазона излучения, а именно, в увеличении содержания индия в слоях InGaN [7] в активной области светодиода, необходимое для сдвига излучения в длинноволновую сторону, что вызвано значительным рассогласованием параметров кристаллической решетки в системе GaN-InN (10.7% для a 15.0% для c параметров решетки, соответственно) [8].

Большое различие в параметрах решетки приводит к двум важным эффектам. Во-первых, из-за различных длин связей в кристаллической решетке тройного соединения InGaN возникают значительные механические напряжения, что проявляется в фазовом распаде твердого раствора. Во-вторых, даже невысокая концентрация In в слое InGaN достаточно сильно изменяет величину постоянной решетки InGaN (по сравнению с GaN), что в результате приводит к высокой степени напряженности слоя InGaN по отношению к буферному слою GaN.

На основании математического моделирования, проведенного в работе [9] в структурированных нанопорах анодированного оксида алюминия (диаметр пор порядка 60 нм), были получены твердые растворы $\text{In}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{N}$, (рис. 4 (4)). Данные структуры были выращены на установке газовой эпитаксии EPIQUIP в нанопорах пленки Al_2O_3 , сформированной на подложке Si с ориентацией (100) с использованием металлоорганических соединений триметилгаллия и –индия в потоке азота в качестве газа носителя, что обосновывает возможность получения бездефектных переходов в системе Si/ Al_2O_3 por/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

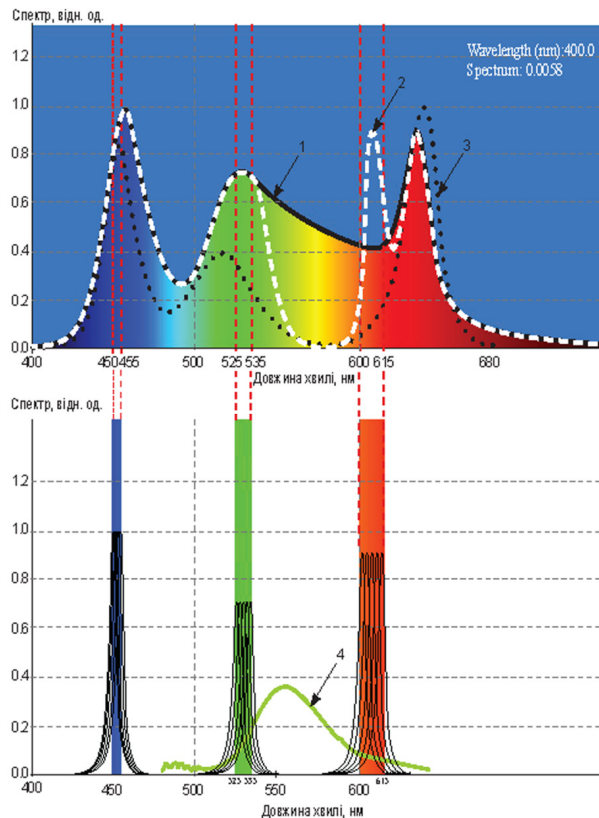


Рис. 4. Спектры RGB источников света и области перекрытия длин волн для достижения значений индекса передачи (90-95). 1, 2, 3 – спектры электролюминесценции RGBW, RGBO и RGB источников света, 4 – спектр фотолюминесценции пленки Si/ Al_2O_3 por/ $\text{In}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{N}$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СООТНОШЕНИЯ RGB КАНАЛОВ НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕМ ЧИПЕ

В качестве лабораторных образцов для определения процентного соотношения между RGB каналами излучения использовались СД GaN, InGaN, AlInGaP 1×1 мм, на основании которых, с помощью экспериментальной установки (Люксметр и цилиндрическая труба длиной 1м с черным матовым покрытием внутри) были определены значения освещенности. Исследования проводились отдельно для 5 образцов красного, зеленого и синего диапазонов излучения.

Расчет значения цветовой температуры, на основании экспериментально полученных независимо друг от друга источников красного, зеленого и синего цветов был проведен на основании формулы Мак Адама (6) с максимальной абсолютной погрешностью приблизительно 2 К для определения цветowych температур в диапазоне от 2856 до 6500 К (что согласуется с МКО источниками света D65), по координатам цветности x, y [10].

$$CCT = 449n_3 + 3525n_2 + 6823.3n + 5520.33, \quad (6)$$

где $n = (x - 0.3320) / (0.1858 - y)$.

Из уравнений, основанных на преобразовании матрицы, составленной из корреляции для различных источников света, коэффициент n примет вид:

$$n = ((0.23881)R + (0.25499)G + (-0.58291)B) / ((0.11109)R + (-0.85406)G + (0.52289)B).$$

За счет алгоритма расчета цветовой температуры, процентного соотношения R, G, B каналов и экспериментально полученных структур, представляется возможным на основании исследования светоизлучающих характеристик, таких как освещенность, сила света, яркость получать структуры с нужным значением цветовой температуры, а так же индекса цветопередачи.

В результате были установлены средние значения для излучающих гетероструктур AlInGaP, InGaN, GaN, которые составили: R – 20,572 лк, G – 52,164 лк, B – 0,735 лк, что соответствует процентному соотношению 28% : 71% : 1%. Значение цветовой температуры в данном приближении равняется $3224 \pm 2K$. Для процентного соотношения 15% : 81% : 4% значение цветовой температуры – $3614K \pm 2K$.

Определение цветовой температуры, соответствующей рассчитанным процентным соотношениям между RGB- каналами излучения дает возможность определения равномерного распределения каждого R-, G-, B- канала на поверхности чипа заданных размеров. Для реализации такой возможности было реализовано программное обеспечение (рис. 5). В программе вручную задаются: размеры СД чипа; размеры поры (диаметр); расстояние между порами; расстояние между R, G, B- каналами излучения; диаметр подложки; толщина реза между чипами; процентное соотношение красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) каналов; сторона квадрата (СД чипа) на графике (для наглядности).

С ее помощью представляется возможным:

1. Рассчитывать количество светодиодных чипов, которое возможно получить на подложках с размерами, которые задаются в программе с учетом толщины реза между выращенными светодиодными чипами.
2. Рассчитывать приблизительное (погрешность $\pm 10\%$) количество нанопор с учетом технологического маршрута, которым возможно манипулировать диаметром нанопор, расстоянием между ними и разделительным пространством между системой микрокластеров заполненным диэлектрическим слоем.
3. Задавать процентное соотношение распределения активных слоев каждого из 3-х каналов по поверхности чипа.
4. Рассчитывать структуру микрокластеров с учетом расстояния между ними.
5. Задавать толщину маски необходимой или возможной длины и ширины для вскрытия окон под зарастивание определенной площади одним из трех активных слоев при определенных технологических режимах.

Погрешность распределения зависит от качества буферных слоев со структурированными нанопорами и составляет ($\pm 7\%$), что было установлено в результате оценки качества полученных пленок.

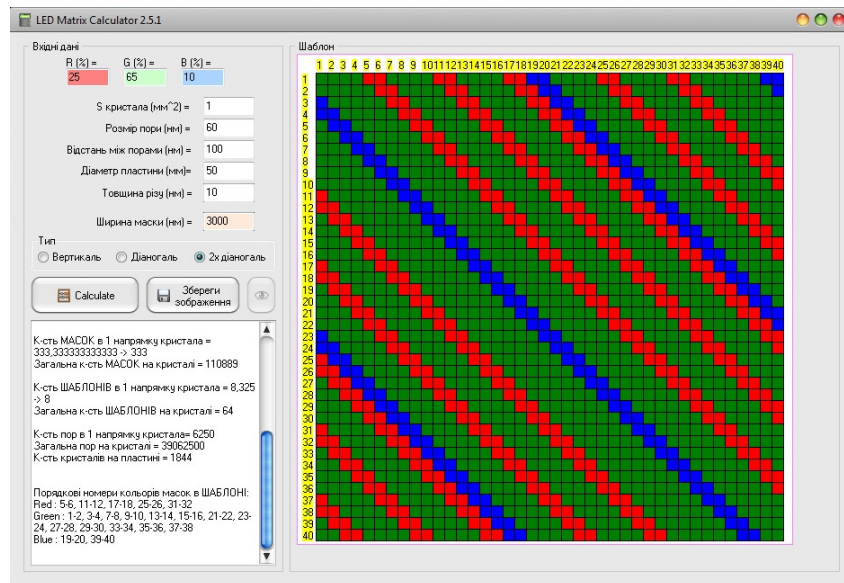


Рис. 5. Интерфейс программного обеспечения для расчета распределения активных слоев на поверхности кристалла

РАЗРАБОТКА ОСНОВ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АПВU RGB-ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО СВЕТА С ВЫСОКИМ ИНДЕКСОМ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

Необходимость исследования данного параметра при создании RGB-источников белого света обусловлена тем, что два различных источника света могут иметь одну и ту же цветовую температуру, но передавать цвета по-разному [11]. Согласно исследованиям индекса цветопередачи дискретных RGB-источников света [10], для получения индекса цветопередачи вплоть до CRI = 90–95 необязательно перекрыть весь видимый диапазон длин волн. Достаточно реализовать перекрытие спектральных диапазонов для синего $\lambda_1 = 450\text{--}455$ нм, для зеленого $\lambda_2 = 525\text{--}535$ нм и для красного $\lambda_3 = 600\text{--}615$ нм.

Таблица 1.

Технические характеристики многокристалльных гибридно-интегральных RGB матриц

№	Параметр	RGB/Si	RGBO	RGBW
1.	Угол обзора, град., мин	120	115	115
2.	Длина волны, нм (мин–макс)			
	• Синий	445–450 нм	450–465 нм	450–465 нм
	• Зеленый	515–520 нм	520–535 нм	520–535 нм
	• Оранжевый	–	605–620	–
	• Красный	625–635 нм	620–630	620–630 нм
	• Белый LED	–	–	5700–7000 К
	• Цветовая температура	2900–7000 К	2900–7000 К	2900–7000 К
	• Индекс цветопередачи, R_a	25–30	80–82,5	91
3.	Максимальное значение тока $I_{пр}$, мА	350	700	700
4.	Источник питания, Вт	12,5	12,5	12,5
6.	Наработка на оказ, не менее, час.	100 000	100 000	100 000
7.	Тип цоколя	E27 (d = 27 мм)	E27 (d = 27 мм)	E27 (d = 27 мм)

Для исследования индекса цветопередачи, были изготовлены RGB, RGBW, RGBO источники света и проведены экспериментальные исследования спектров их электролюминесценции (рис. 4) с помощью гониофотометра. Для исследований использовались чипы с подобранными диапазонами излучения, с целью достижения условий, максимально приближенных к необходимому. Получены сравнительные характеристики (табл. 1), которые показали значительное снижение индекса цветопередачи при использовании красного, зеленого и синего источников света без дополнительного источника света с люминофорным покрытием. В то же время, использование дополнительного источника света в диапазоне 605–620 нм повышает индекс цветопередачи до 80. Предполагается, что значения 90–95 удастся достичь при

использовании источников света, полностью перекрывающих диапазон для синего $\lambda_1 = 450\text{--}455$ нм, для зеленого $\lambda_2 = 525\text{--}535$ нм и для красного $\lambda_3 = 600\text{--}615$ нм. Данные исследования являются основой для разработки АПВ RGB источников белого света на одном кристалле в одном технологическом процессе.

На основе аналитических исследований а так же уравнения Вегарда, проведены расчеты ширины запрещенной зоны и длины волны от молярной концентрации In в системе твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (рис. 4, табл. 2), в результате чего представляется возможным получить RGB светодиодные структуры в интегральном исполнении на подложке Si с возможностью регулировки баланса белого света начиная от базовой цветовой температуры и значением индекса цветопередачи 1A, что согласно данным Международной комиссии по освещению соответствует характеристике «Очень хорошо».

Таблица. 2.

Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны и длины волны от молярной концентрации In в системе твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при 300 K для достижения индекса цветопередачи 90-95 Ra.

№	Канал излучения	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	λ , нм	E_g
1	Синий	$\text{In}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$	435	2,98
		$\text{In}_{0,12}\text{Ga}_{0,88}\text{N}$	435	2,98
		$\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{N}$	450	2,78
		$\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{N}$	452	2,77
		$\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,81}\text{N}$	455	2,76
2	Зеленый	$\text{In}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{N}$	495	2,72
		$\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{N}$	500	2,68
		$\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,72}\text{N}$	525	2,39
		$\text{In}_{0,19}\text{Ga}_{0,71}\text{N}$	532	2,34
		$\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$	535	2,32
3	Желто-оранжевый	$\text{In}_{0,31}\text{Ga}_{0,69}\text{N}$	552	2,29
		$\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{N}$	590	2,2
4	Оранжевый	$\text{In}_{0,37}\text{Ga}_{0,63}\text{N}$	600	2,04
		$\text{In}_{0,38}\text{Ga}_{0,62}\text{N}$	610	2,03
5	Красный	$\text{In}_{0,39}\text{Ga}_{0,61}\text{N}$	615	2,02

ВЫВОДЫ

В результате проведенного в работе теоретического анализа влияния динамики кристаллической решетки на квантовый выход рекомбинационного излучения впервые рассчитаны среднеквадратические динамические смещения атомов кристаллических решеток соединения GaN и твердого раствора InGaN.

Определены температурные зависимости атомного состава активной области светоизлучающих структур от среднеквадратических динамических смещений атомов кристаллических решеток GaN и InGaN; экспериментально определенных значений интенсивностей излучения 0,05 отн. ед/100 K, длин волн в максимуме излучения, ширин спектральных линий электролюминесценции 5нм/100K и для для GaN выполнены расчеты вероятностей безызлучательной рекомбинации в диапазоне температур -40°C $+60^\circ\text{C}$.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными исследованиями для соединений фосфида индия, исходя из которого оптическая генерация от температуры в два раза стабильнее для соединений на основе GaN чем InP при тех же температурах, что обосновывает целесообразность замены твердых растворов AlInGaP на $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в монолитно-интегрированных RGB источниках света.

В ходе выполнения работы на установке МОС-гидридной эпитаксии были экспериментально получены пленки $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0,31$ %), что коррелирует с расчетами и экспериментальными исследованиями спектров фотолюминесценции и соответствует $\lambda = 550$ нм и $E_g = 2,3$ эВ. Разработано распределение атомных составов твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в микрокластерных структурах чипа.

Для А^{III}В^V RGB источников белого света на кремнии разработана методика и создано прикладное программное обеспечение с графическим интерфейсом, позволяющее моделировать процентное распределение микрокластерных RGB структур на поверхности структурированных буферных нанослоев в чипе, что позволяет считать такое моделирование имитационным.

Работа проводилась при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований (Проект №. Ф41.2/018).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осинский В.И., Масол И.В., Ляхова Н.Н., Деминский П.В. На пути создания умного освещения интеграцией Si/III-N светодиодных структур // Материалы 8-й Всероссийской конференции "Нитриды галлия, индия, алюминия - структуры и приборы", С.-Петербург, 2011, с. 190-191.
2. И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев. Информационные нанотехнологии: К. – Макрос. – 2011. – 560 стр.
3. Осинский В.И., Деминский П.В. Si/A3B5 интегральные источники света: третий этап информатизации / В.И. Осинский, П.В. Деминский // Материалы VI Международной конференции оптоэлектронных информационных технологий «Фотоника – ODS 2012», Винница, 2012, с. 45
4. Moses P. G., Van de Walle Chris G. Band bowing and band alignment in InGaN alloys / P. G. Moses, Chris G. Van de Walle // Appl. Phys. 96. - 2010. – P. 21908
5. S. Nakamura, S. Pearton, and G. Fasol, *The Blue Laser Diode: The Complete Story* Springer-Verlag, Heidelberg, 2000.
6. T. Kuykendall, P. Ulrich, S. Aloni, and P. Yang, Nature Mater. 6, 951 2007.
7. Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; [пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича]. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
8. O Ambacher "Growth and applications of Group III-nitrides" J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 2653–2710.
9. Ляхова Н.О. Моделирование влияния темплетных размеров на дислокационность наноструктур при селективной эпитаксии III-нитридов №3, 2011 г., с. 205.
10. McCamy C. S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates / C. S. McCamy // Color Research & Application. – 1992. – Vol. 17(2). – Pp. 142–144.
11. Cangeloso S. LED Lighting / S. Cangeloso // O'Reilly Media, Inc. S.: Gravenstein Highway North. – 2001. – P. 1005. ISBN: 978-1-449-33476-5.

Надійшла до редакції 10.12.2012 р.

ОСИНСКИЙ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ – д.т.н, профессор, директор Центра оптоэлектронных технологий, НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина.

ДЕМИНСКИЙ ПЕТР ВИТАЛЬЕВИЧ – аспирант факультета электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт». Младший научный сотрудник НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина.

ЛЯХОВА НАТАЛЬЯ НИКОЛАЕВНА – старший научный сотрудник, НИИ Микроприборов НАН Украины, г. Киев, Украина

МОТОРНЫЙ АНАТОЛИЙ ПАВЛОВИЧ – ассистент кафедры «Общей физики и фотоники», Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

МАСОЛ ИГОРЬ ВИТАЛЬЕВИЧ – директор компании «Росток», г. Киев, Украина.

СУХОВИЙ НИНА ОЛЕГОВНА – аспирант факультета электроники, Национальный технический университет Украины «Киевский Политехнический Институт», г. Киев, Украина

УДК 681.7.08

Г.Л. ЛИСЕНКО, Д.С. КОСТЮЧЕНКО

ЛАЗЕРИ ПОВЕРХНЕВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВЕРТИКАЛЬНИМ ОБ'ЄМНИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ПОБУДОВИ МАСИВІВ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ПАМ'ЯТІ

*Вінницький державний технічний університет
21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна*

Анотація. Розглянуто швидкісні рівняння лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором та об'єднаною порожниною (CC-VCSEL) з оптичним керуванням. Описано структуру об'єднаного резервуара CC-VCSEL. Розглянуто функціонування лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором і оптичним та електричним керуванням для побудови масивів оптоелектронної пам'яті.

Аннотация. Рассмотрены скоростные уравнения лазеров поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором и объединенной полостью (CC-VCSEL) с оптическим управлением. Описана структура объединенного резервуара CC-VCSEL. Рассмотрены функционирования лазеров поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором и оптическим и электрическим управлением для построения массивов оптоэлектронной памяти.

Abstract. Speed equations of vertical cavity surface emitting lasers and the coupled cavity (CC-VCSEL) with optical control was considered. The structure of the combined reservoir CC-VCSEL was considered. Functioning of vertical cavity surface emitting lasers and optical and electrical control was considered to build arrays of optoelectronic memory.

Ключові слова: VCSEL, оптоелектронний RS-тригер, CC-VCSEL, електроабсорбційні модулятори світла, квантово-розмірні структури.

ВСТУП

Оптоелектронні системи обробки та зберігання інформації дозволяють паралельно оброблювати великі масиви даних у матричному вигляді. Застосування матричної передачі даних (в т.ч. зображень) дозволяє реалізувати принцип паралелізму оптоелектронних систем. При побудові оптоелектронних систем та компонентів часто виникає потреба у джерелі оптичного сигналу (інформаційного або енергетичного) поданого у вигляді матриці, для забезпечення взаємодії з масивом оптоелектронних пристроїв. У такому випадку ефективно застосовувати матриці лазерів, зокрема матриці лазерів поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором (VCSEL), що характеризуються низьким енергоспоживанням та достатньо високою потужністю [1]. Пропонується використовувати елементи масивів VCSEL великої розмірності в якості джерела оптичного живлення для елементів оптоелектронної пам'яті в якості комірок великорозмірного масиву [2]. На сьогоднішній день існують масиви VCSEL великої потужності розмірністю 100×100 елементів [3]. В якості джерела інформаційного сигналу пропонується використовувати масив VCSEL з об'єднаною порожниною (CC-VCSEL) з оптичним керуванням.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У якості елементарних комірок для побудови масивів асинхронної та синхронної оптоелектронної пам'яті пропонується використовувати асинхронні та синхронні RS-тригери, так як вони є найпростішими оптоелектронними елементами пам'яті [4].

Основними елементами комірок для побудови масивів оптоелектронних тригерів є електроабсорбційні модулятори світла та елементи масиву VCSEL. При побудові елементів оптоелектронної пам'яті використовується керування коефіцієнтом поглинання електроабсорбційних модуляторів світла, що працюють на пропускання вхідного оптичного сигналу. Для керування електроабсорбційними модуляторами у оптоелектронних елементах пам'яті використовується діапазон робочих напруг 0-4 В з значенням логічної одиниці 0-1 В, а логічного нуля – 3-4 В, з використанням довжини хвилі оптичного сигналу живлення 855 нм [2].

В якості джерела постійного оптичного сигналу для масиву оптоелектронної пам'яті

пропонується використовувати 2D масив VCSEL, завдяки високій інтенсивності вихідного променя, зручності виготовлення в інтегральному виконанні та вузьконаправленому та інтенсивному спектру оптичного випромінювання на необхідній довжині хвилі [5].

На відміну від лазерів з торцевим випромінюванням, дзеркала в VCSEL монолітно інтегровані під час вирощування у формі діелектричних дзеркал. Використовуючи даний вид виготовлення легко виготовити прилади з ідентичними секціями вертикальних порожнин, де дві секції розділені дзеркалом, чий коефіцієнт відбиття можна контролювати, щоб інтегрувати дві мікропорожнини із загальним дзеркалом, між ними необхідно лише контролювати процес зростання.

Пропонується використовувати структури на основі CC-VCSEL з оптичним та електричним керуванням, в якості вхідних та вихідних каскадів масивів оптоелектронної пам'яті. Для цих структур характерними є монолітні вирощування з'єднаного резонатора, здатність легко змінювати величину з'єднання і здатність виготовляти 2D масиви. Ця монолітна інтеграція з'єднаних резонаторів у межах вертикальної порожнини лазера відкриває нові можливості через здатність розділити взаємодію між порожнинами та можливість оптичного та електричного керування ними.

МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Масиви VCSEL можуть бути використані як потужні джерела випромінювання, завдяки виготовленню великорозмірних двовимірних (2D) масивів з низьким енергоспоживанням, та високою ефективністю випромінювання окремого елемента масиву. VCSEL в якості джерела випромінювання представляють багато переваг, які включають низьку вартість виробництва, надійність, і хороші спектральні показники випромінювання [5].

Крім того, на відміну від торцевих лазерів, VCSEL не страждають від нестабільної роботи при зміні параметрів лазера від температури, отже VCSEL можуть надійно працювати при високих температурах, усуваючи необхідність в охолоджувальній установці в деяких пристроях.

Структуру елемента 2D масиву VCSEL створеного на основі GaAs зображено на рисунку 1.

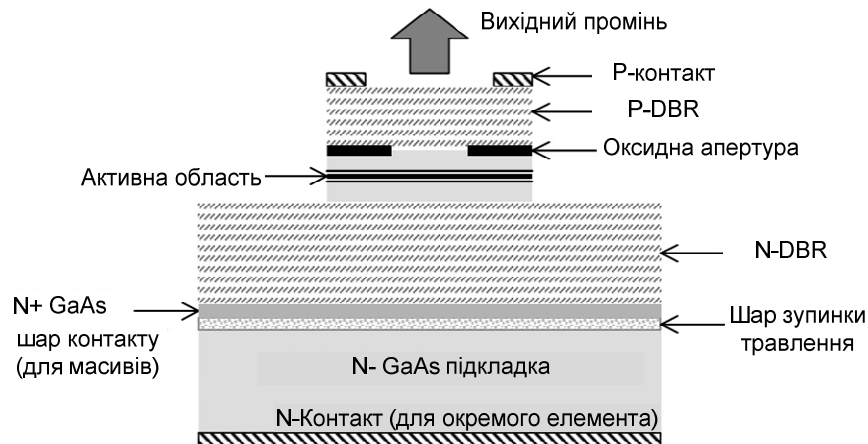


Рис. 1. Структура елемента 2D масиву VCSEL створеного на основі GaAs з активною зоною на InAlGaAs з великою кількістю квантових ям

Для електричного та оптичного обмеження, виборчий процес травлення використовується для створення апертурних отворів поруч з активною областю для підвищення продуктивності [6]. Зростання починається з шару зупинки травлення для полегшення видалення підкладки при обробці масивів в процесі їх виготовлення. Після шару зупинки травлення починається обробка сильно легованого N-GaAs шару, який використовується в якості N-контакту для елемента масиву. Тоді розподілені Бреггівські відбивачі (distributed Bragg reflectors - DBR) створені на основі AlGaAs N-типу з високим коефіцієнтом відбиття. Активна область складається з InAlGaAs з великою кількістю квантових ям, з DBR P-типу розміщеними над нею. Шар з високим вмістом алюмінію розташований поряд з першою парою P-DBR для утворення оксидної апертури. Розміщення та конструкція апертури є критичним для мінімізації оптичних втрат і розповсюдження струму [7].

Розглянемо параметри пучка лазерного випромінювання елемента масиву VCSEL, що потрапляє на вхід електроабсорбційного модулятора світла. Використовуватимемо масив VCSEL з вихідною потужністю променя 4.7 мВт та діаметром пучка 5 мкм [3]. При цьому отримаємо площу поперечного

перерізу пучка $1.963 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ та інтенсивність випромінювання $2.394 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$. Для ефективного перемикання електроабсорбційного модулятора на основі керування динамічним коефіцієнтом керування у модуляторах значення статичного коефіцієнта поглинання не повинно перевищувати значень $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$.

Електроабсорбційні модулятори світла при пропусканні оптичного сигналу живлення елемента масиву VCSEL показали найкращі результати при значенні статичного коефіцієнта поглинання не більше 500 см^{-1} а товщини напівпровідникового шару на рівні 20 мкм [2]. Розрахунок проводився за допомогою закону Бугера-Ламберта-Бера для наноструктур при значенні концентрації квантових ям у середовищі модулятора $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ та площі поверхні електроабсорбційного модулятора $2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Результат дослідження на основі експериментальних даних, отриманих з джерела [8], показав, що при побудові масивів оптоелектронної пам'яті доцільно використовувати діапазон зовнішньої напруги прикладеної до електроабсорбційного модулятора від 0 до 4 В, з значенням логічної одиниці від 0 до 1 В, а значенням логічного нуля від 3 до 4 В із забороненою зоною 1-3 В [2].

В якості вхідного та вихідного каскаду для забезпечення інформаційного сигналу для масиву оптоелектронної пам'яті використовується масив CC-VCSEL з оптичним керуванням [9]. Це дозволяє отримати стабільний вхідний оптичний сигнал з необхідними спектральними характеристиками та потужністю. На рисунку 2 зображено структурну схему резервуара CC-VCSEL, з розділенням мод між порожнинами.

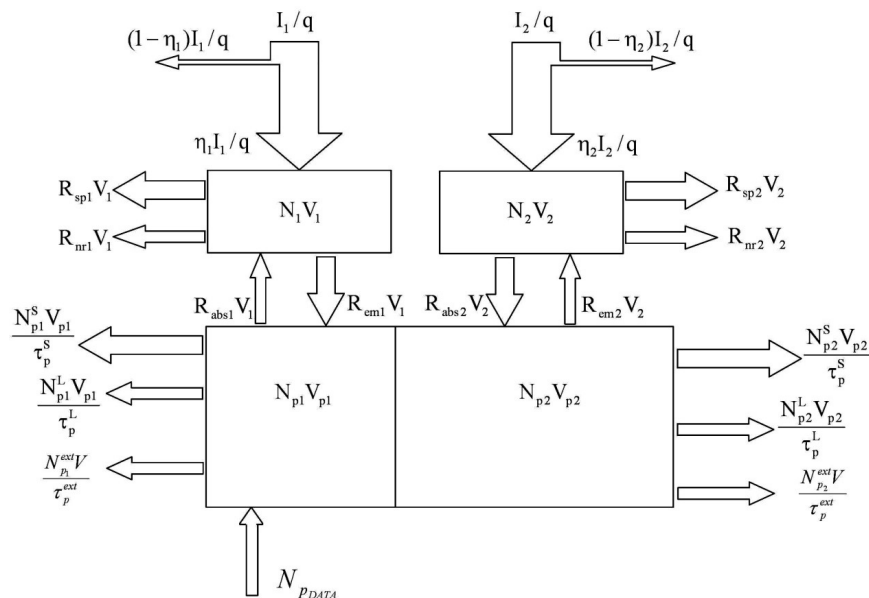


Рис. 2. Модель резервуара елемента масиву CC-VCSEL з оптичним керуванням

Функціонування VCSEL з об'єднаною порожниною описується, починаючи з розробки швидкісного рівняння для числа носіїв, N , і числа фотонів, $N_{ph}^{S,L}$, для двох оптичних мод. Модель резервуара, яка використовується для розробки швидкісного рівняння, показана на рис. 2. Використовується індекс $i = 1, 2$ для позначення порожнини (1 - верхня, більш коротка порожнина, 2 - нижня, більш довга порожнина) та індекс «S» або «L» для позначення короткої або довгої моди. Коротка мода обмежена в короткій верхній ($i = 1$) порожнині, а довга мода обмежена в довгій нижній ($i = 2$) порожнині. Число носіїв, інжектуються в кожну порожнину лазера, становить I_i/q , але лише частина $\eta_i I_i/q$ досягає активної зони квантової ями i , де η_i позначає ефективність інжектуючих носіїв лазера. Рекомбінація носіїв, що досягли резервуара складається з чотирьох компонентів: не випромінюючої рекомбінації при швидкості R_{nr} , спонтанної рекомбінації при швидкості R_{sp} , при якій певна частина, представлена R_{sp} коефіцієнтом спонтанної емісії, що рекомбінує у потрібній моді β_{sp} , стимульованої рекомбінації при випромінюванні R_{em} , стимульованої абсорбції при прийманні вхідного оптичного сигналу R_{abs} .

Спонтанною рекомбінацією в модах порожнини можна знехтувати. Швидкість рекомбінації буде виражена, на одиницю об'єму, і потім помножена на об'єм V_i активної зони, тобто квантових ям, як зображено на рис. 2. V_{pi} представляє величину оптичних мод в порожнинах. Число фотонів у модах «S» і «L» у двох фотон-ємностях змінюється наступним чином: стимульована і спонтанна емісія забезпечують емісію фотонів зі швидкістю $R_{em} + R_{st} + R_{sp}$ в той час, як абсорбція в активній зоні зменшує кількість фотонів зі швидкістю R_{abs} . Всі інші фотони або залишають порожнину через дзеркала або абсорбуються

всередині [10].

Для оцінки швидкодії роботи масиву CC-VCSEL, та необхідної потужності вхідного оптичного сигналу можна використовувати швидкісні рівняння для VCSEL з об'єднаними порожнинами [11]. Швидкісні рівняння для фотонів в модах коротких, довгих і зовнішньої оптичних хвиль мають вигляд:

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^S + N_{p,2}^S) = \frac{dN_p^S}{dt} = \left[(R_{em,1}^S - R_{abs,1}^S) \cdot V_1 + (R_{em,2}^S - R_{abs,2}^S) \cdot V_2 \right] + (\beta_{sp,1}^S R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^S R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^S}{\tau_p^S};$$

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^L + N_{p,2}^L) = \frac{dN_p^L}{dt} = \left[(R_{em,1}^L - R_{abs,1}^L) \cdot V_1 + (R_{em,2}^L - R_{abs,2}^L) \cdot V_2 \right] + (\beta_{sp,1}^L R_{sp,1} V_1 + \beta_{sp,2}^L R_{sp,2} V_2) - \frac{N_p^L}{\tau_p^L};$$

$$\frac{d}{dt}(N_{p,1}^{ext} + N_{p,2}^{ext}) = \frac{dN_p^{ext}}{dt} = \left[(R_{em,1}^{ext} - R_{abs,1}^{ext}) \cdot V_1 + (R_{em,2}^{ext} - R_{abs,2}^{ext}) \cdot V_2 \right] - \frac{N_p^{ext}}{\tau_p^{ext}}.$$

де представлено загальне число фотонів $N_p^{S,L,ext}$ в моді «S», «L» або в зовнішньому оптичному пучку.

Зміна щільності носіїв в порожнині i через стимульовану емісію та стимульовану абсорбцію здійснюється таким чином:

$$R_{em,i} - R_{abs,i} = \frac{2\xi_i^S v_g^S}{V_{p,i}} N_{p,i}^S g_i^S + \frac{2\xi_i^L v_g^L}{V_{p,i}} N_{p,i}^L g_i^L + \frac{2\xi_i^{ext} v_g^{ext}}{V_i} N_{p,i}^{ext} g_i^{ext}.$$

Дане рівняння дійсне для $i=1,2$, де $g_i^{S,L,ext}$ означає коефіцієнти підсилення для мод «S», «L» або для зовнішньої оптичної хвилі в порожнині i , $v_g^{S,L,ext}$ – групова швидкість фотонів у відповідній моді, а $V_{p,i}$ – обсяг фотонної порожнини i , коефіцієнт 2 враховує те, що один фотон перетинає активну зону два рази протягом одного проходу. Параметр $\xi_i^{S,L,ext}$ означає коефіцієнт посилення стоячої хвилі, що залежить від розміщення квантових ям по відношенню до розподілу поля в резонаторі та активній зоні. Величина $\xi_i^{S,L,ext}$ змінюється в проміжку від 0, якщо квантові ями розміщені у вузлі поля, і до 2, якщо квантові ями розміщені в максимумі поля. Коефіцієнти посилення стоячої хвилі є проектними параметрами пристрою, що обчислюються з використанням матриці передачі.

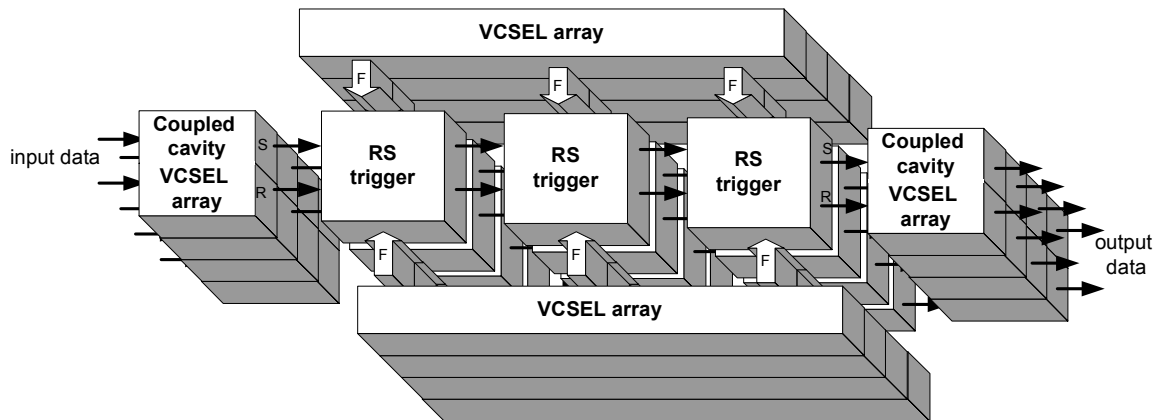


Рис. 3. Структурна схема масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті з використанням масиву VCSEL в якості джерела оптичного живлення

На рисунку 3 зображено спрощену структурну схему масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера [4] з використанням масиву VCSEL в якості джерела оптичного живлення. Горизонтальні сигнали позначають інформаційні сигнали пристрою S та R, а вертикальні – сигнали оптичного живлення F. Для прикладу показано матрицю асинхронних RS-тригерів розміром 3x4 з оптичним живленням. Масиви CC-VCSEL з оптичним та електричним керуванням використовуються в якості вхідних та вихідних каскадів масивів оптоелектронної пам'яті. Така побудова дозволяє отримати стабільний вхідний оптичний сигнал з необхідними спектральними характеристиками та потужністю.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто використання масивів VCSEL в якості джерела оптичних сигналів для побудови масивів оптоелектронної пам'яті, у поєднанні з електроабсорбційними модуляторами світла. Розглянуто структуру VCSEL та основні параметри, що є важливими при інтеграції з оптоелектронною пам'яттю. Описано функціонування та модель резервуара CC-VCSEL з оптичним керуванням та розділенням мод між порожнинами. Розглянуто модель швидкісних рівнянь CC-VCSEL. Наведено спрощену структурну схему масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера з використанням масивів VCSEL. Масиви оптоелектронної пам'яті можуть бути використані в інформаційно-обчислювальних системах для побудови спеціалізованих обчислювальних пристроїв з паралельною обробкою інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. D. Francis, H.-L. Chen, W. Yuen, G. Li, and C. Chang-Hasnain, "Monolithic 2D-VCSEL array with >2 W CW and 5 W pulsed output power," *Electron. Lett.*, 34(22), 2132-2133 (1998).
2. Лисенко Г.Л. Побудова елементів оптоелектронної пам'яті з використанням електроабсорбційних модуляторів світла / Г.Л. Лисенко, Д.С. Костюченко // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. — 2012. — № 1(23). — С. 88—91.
3. Seurin, J.-F., Xu, G., Khalfin, V., Miglo, A., Wynn, J. D., Pradhan, P., Ghosh, C. L., and D'Asaro, L. A., "Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays," *Proc. SPIE* 7229, 722903 (2009).
4. Лисенко Г.Л., Костюченко Д.С., Бурмакіна О.В. Патент на корисну модель «Оптоелектронний асинхронний RS тригер» №62527 Зареєстровано в державному реєстрі патентів на корисні моделі 25.08.2011
5. Tatum, J. A., Clark, A., Guenter, J. K., Hawthorne III, R. A. and Johnson, R. H., "Commercialization of Honeywell's VCSEL technology," *Proc. SPIE*, 3946, 2-13 (2000).
6. Huffaker, D. L., Deppe, D. G., Kumar, K. and Rogers, T. J., "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 65(1), 97-99 (1994).
7. Hegblom, E. R., Margalit, N. M., Fiore, A. and Coldren, L. A., "High-performance small vertical-cavity lasers: a comparison of measured improvements in optical and current confinement in devices using tapered apertures," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 5(3), 553-560 (1999).
8. Vijit Sabnis. Optically-controlled electroabsorption modulators for future generation optical networks// A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003. P. 166–170.
9. V. Badilita, J. F. Carlin, M. Ilegems, M. Brunner and G. Verschaffelt et al. Control of polarization switching in vertical coupled-cavities surface emitting lasers, in *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 16, num. 2, p. 365-367, 2004.
10. Krassimir P. Panajotov, Mateusz Zujewski, and Hugo Thienpont, "Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching," *Opt. Express* 18, 27525-27533 (2010).
11. Vlad Badilita, Jean-Francois Carlin, Marc Ilegems and Krassimir Panajotov, "Rate-Equation Model for Coupled-Cavity Surface-Emitting Lasers", *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 40, no. 12, december 2004.

Надійшла до редакції 10.12.2012 р.

ЛИСЕНКО ГЕНАДІЙ ЛЕОНІДОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

КОСТЮЧЕНКО ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ – магістрант інституту магістратури, аспірантури та докторантури, Вінницький національний технічний університет, Україна.

УДК. 621.396.011:621.372.512.22

А. В. КЛЕПІКОВСЬКИЙ

ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ БАГАТОКАСКАДНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ОЦІНКА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ РЕЗОНАНСНИХ ПРИСТРОЇВ

*Буковинський державний медичний університет,
58002, м. Чернівці, Театральна пл., 2
E-mail: Klepikovskiy.Andrij@bsmu.edu.ua*

Анотація. В статті запропоновано методику аналізу та розрахунку власних резонансних частот багатокаскадних термоелектричних елементів Пельтьє на основі методу електродинамічних аналогій. Отримано аналітичні вирази залежності результуючої амплітуди резонансних коливань від частоти зовнішнього впливу, що дають змогу оцінювати оптимальні з точки зору мінімізації резонансних ефектів, температурні режими роботи термостабілізаторів.

Ключові слова: елементи Пельтьє, багатокаскадні термоелектричні елементи.

Аннотация. В статье предложена методика анализа и расчета собственных частот многокаскадных термоэлектрических элементов Пельтье на основании метода электродинамических аналогий. Получены аналитические выражения зависимости результирующей амплитуды резонансных колебаний от частоты внешнего воздействия, которые дают возможность оценивать оптимальные с точки зрения минимизации резонансных эффектов, температурные режимы работы термостабилизаторов.

Ключевые слова: элементы Пельтье, многокаскадные термоэлектрические элементы.

Abstract. The paper proposed a method for the analysis and calculation of natural frequencies of multistage thermoelectric Peltier elements based on the method of electrodynamic analogies. Analytical expressions of the resulting amplitude of the resonance depends on the frequency of oscillation of the external influences that make it possible to evaluate the optimum in terms of minimizing the resonance effects, temperature modes of heat stabilizers.

Keywords: Peltier elements, multistage thermoelectric elements.

ВСТУП

В статті запропоновано методику аналізу та розрахунку власних резонансних частот багатокаскадних термоелектричних елементів Пельтьє на основі методу електродинамічних аналогій. Отримано аналітичні вирази залежності результуючої амплітуди резонансних коливань від частоти зовнішнього впливу, що дають змогу оцінювати оптимальні з точки зору мінімізації резонансних ефектів, температурні режими роботи термостабілізаторів.

Стрімко зростаюча технічна складність сучасних електронних систем та пристроїв вимагає певного переосмислення існуючих методів забезпечення стабільності та надійності їх роботи, оскільки висока щільність розміщення елементів та суцільне інтегральне виконання цілих вузлів апаратури унеможливорює достатню їх розв'язку за різними фізичними чинниками (електромагнітна, температурна, вібраційна і т.д.). Слід також зазначити, що на етапі проектування, додатково необхідно враховувати велику кількість не детермінованих чинників, вплив яких по своїй суті носить комплексний характер і за своєю природою виникнення може бути віднесений і до внутрішніх і до зовнішніх. Також їх вплив може носити епізодичний (режимний) характер і проявлятися лише за певних умов, що на етапі проектування передбачити важко або не можливо. Прикладом такої комплексної дії може бути вплив зовнішніх механічних коливань на роботу електромеханічних резонансних частотно-стабілізуючих систем [1,2], що на етапі проектування можуть бути враховані лише шляхом введення додаткових заходів підвищення механічної стійкості (демпфування) або стабілізації (електронної компенсації). Проте, заходи як в першому так і в другому випадку є малоефективними, якщо джерело механічних коливань

(трансформатор, реле, повітряний кулер, рідинний компресор і т.д.) знаходиться на одній основі з пристроєм стабілізації, оскільки демпфування його практично неможливе.

В даній статті досліджується випадок, коли джерело механічних коливань представляє собою пасивну коливальну систему, яка володіє певною частотною вибірковістю на власних частотах механічних коливань і маючи значну питому вагу в широкому, рівномірному спектрі зовнішніх коливань, може створювати достатні, для дестабілізації роботи, коливання на найбільш «вразливих» (шкідливих) частотах. Прикладом такої системи – є термоелектричні модулі Пельтьє, які знаходять широке застосування в радіоелектронній апаратурі, з огляду на їх переваги в порівнянні з повітряними та рідинними системами охолодження. В першу чергу, це можливість оперативного (низько інерційного) електронного керування температурою, що має велике значення при термостабілізації роботи термочутливих елементів в умовах епізодичного навантаження, висока конструктивна надійність, оскільки вони представляють собою монолітні блоки без рухомих механічних елементів, невеликі габаритні розміри і т.д.

Проте, поряд з перевагами, термоелектричні елементи Пельтьє володіють і деякими недоліками, одним з яких є їх велика вага, що обумовлено великими розмірами теплообмінників і великою кількістю напівпровідникових термоелементів (рис. 1). Крім того, для досягнення необхідного перепаду температур, термоелектричні елементи Пельтьє, як правило виготовляються у вигляді багато каскадних конструкцій, що в свою чергу призводить до появи ще одного вагомого недоліку – появи чітко виражених резонансних частот, що в кінцевому випадку може вплинути на роботу електромеханічних резонансних систем, які знаходяться на тій самій основі.

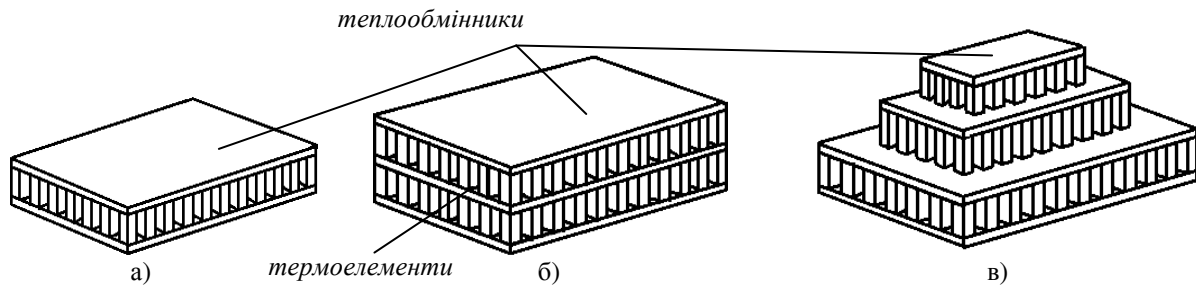


Рис. 1. Будова термоелектричних елементів Пельтьє: а) однокаскадні; б) двокаскадні; в) трикаскадні

Таким чином, збуджуючись від зовнішніх механічних полів, вони здатні їх посилювати на певних частотах, що відповідають їх власним і в результаті впливати на стабільність і надійність роботи інших вузлів та елементів. Особливо це небезпечно в відношенні п'єзоелектричних резонаторів, що застосовуються для стабілізації частоти, оскільки, як показано в ряді робіт [1] такий вплив призводить до виникнення паразитних гармонік в резонаторі і як наслідок в вихідних коливаннях генераторів та синтезаторів де він застосовується. Хоча, з урахуванням абсолютних амплітуд, цей вплив може бути не значним, однак враховуючи резонансні ефекти і певний збіг обставин (фазові співвідношення) результат його дії може бути відчутним на стабільності роботи системи [2]. Виходячи з цього, при проектуванні електронних вузлів, що містять термоелектричні модулі і електронно-механічні резонансні елементи, необхідно враховувати механічні властивості модулів, а саме резонансні частоти і вживати додаткових заходів для запобігання їх збігу з номінально «не бажаними».

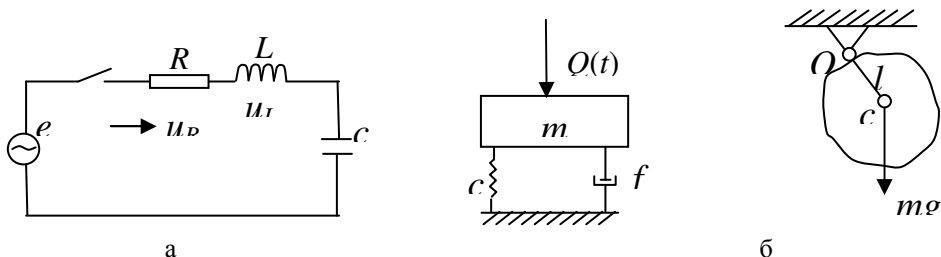


Рис. 2. Загальний вигляд електричного коливального контуру із послідовним з'єднанням елементів (а) і коливального контуру механічних систем з одним ступенем свободи (б)

Для розрахунку резонансних властивостей термоелектричних модулів Пельтьє в роботі використано метод електро-динамічних аналогій [3,4]. Відповідно даного методу, індуктивність L

пропорційна масі m , величина обернена ємності $1/C$ пропорційна жорсткості c , а електричний опір R пропорційний коефіцієнту, що входить в силу в'язкого тертя. За такої аналогії електричне коло, стає достатньо точним аналогом механічної системи в тому сенсі, що будь-який відгук заряду q_e на напругу u (u відповідає діючій силі) в точності відповідає відгуку x на силу. З'єднавши в колі множини опорів, індуктивностей і ємностей, отримується коло, що є аналогією складної механічної системи.

Розглянемо електричний коливальний контур із послідовним з'єднанням елементів R, L, C (рис. 2), що містить активний елемент e .

Згідно з другим законом Кірхгофа, сума падінь напруги на окремих ділянках кола дорівнює різниці потенціалів на кінцях затискачів, тобто електрорушійній силі $e(t)$ джерела напруги

$$e(t) = U_R + U_L + U_C. \quad (1)$$

Таким чином, для цього кола другий закон Кірхгофа об'єднав усі три аналогії з другим законом Ньютона. Розкриємо вирази U_R, U_L і U_C в (1).

Згідно з другим законом Кірхгофа:

$$L \frac{di}{dt} + R_i + \frac{1}{C} q^e = e(t), \quad (2)$$

або

$$L \frac{d^2 q^e}{dt^2} + R_i \frac{dq^e}{dt} + \frac{1}{C} q^e = e(t). \quad (3)$$

Останнє рівняння є рівнянням коливального руху системи з одним ступенем свободи. Узагальненою координатою в (3) виступає заряд конденсатора ($q = q^e$).

Рівняння коливального руху механічних систем з одним ступенем свободи (рис. 2, б) має вигляд:

$$\alpha \ddot{q} + \beta \dot{q} + cq = Q(t). \quad (4)$$

Очевидно, що рівняння (3) та (4) мають однакову структуру (аналогічні).

Порівнюючи ці рівняння між собою, бачимо, що узагальненому коефіцієнту інерції α (маса, осьовий момент інерції) механічної системи відповідає індуктивність L ; узагальненому коефіцієнту розсіювання енергії β (коефіцієнту демпфування) – опір R , на якому електрична енергія аналогічно механічній перетворюється на теплоту; узагальненій жорсткості c механічної системи відповідає інверсна (обернена) ємність конденсатора $1/C$. Узагальненій силі механічної системи $Q(t)$ в рівнянні (4) відповідає електрорушійна сила $e(t)$ джерела напруги.

Виходячи з таких міркувань в табл. 1 наведено аналогічні величини аналізу електричних та механічних систем.

Таблиця 1.

Аналогічні величини аналізу електричних та механічних систем

Система	Узагальнена координата	Коефіцієнти диференціальних рівнянь			Кінетична енергія	Потенціальна енергія	Функція розсіювання	Узагальнена сила
Механічна	q	a	β	c	$T = \frac{1}{2} a \dot{q}^2$	$\Pi = \frac{1}{2} c q^2$	$\Phi = \frac{1}{2} \beta \dot{q}^2$	$Q(t)$
Аналогія „сила – напруга”	q^e	L	R	$\frac{1}{C}$	$T_1^e = \frac{L}{2} (\dot{q}^e)^2$	$\Pi_1^e = \frac{1}{2C} (q^e)^2$	$\Phi_1^e = \frac{R}{2} (\dot{q}^e)^2$	$e(t)$
Аналогія „сила – струм”	U	C	$\frac{1}{R}$	$\frac{1}{L}$	$T_2^e = \frac{C}{2} \dot{U}^2$	$\Pi_2^e = \frac{1}{2L} U^2$	$\Phi_2^e = \frac{1}{2R} \dot{U}^2$	$\frac{di}{dt}$

В даній системі (рис. 3) розглядається кінематичний тип збудження, тобто через основу (основною слугує керамічна пластина яка металізована сплавом молібден-мідь).

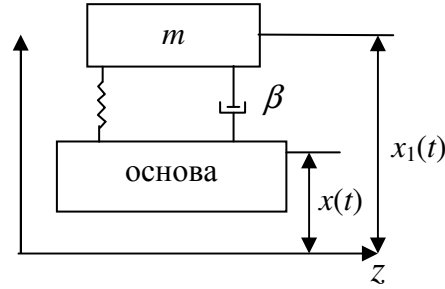


Рис. 3. Механічна схематизація коливальної системи з одним ступенем свободи з урахуванням демпфування

Відповідно рис. 3: $x(t)$ – переміщення основи; $x_1(t)$ – переміщення тіла масою m ; β – коефіцієнт демпфування.

Рівняння руху має наступний вигляд:

$$m\ddot{x}_1 + \beta(\dot{x}_1 - \dot{x}) + c(x_1 - x) = 0, \quad (5)$$

або

$$m\ddot{x}_1 + \beta\dot{x}_1 + cx_1 = \beta\dot{x} + cx. \quad (6)$$

Якщо знехтувати демпфуванням, тобто $\beta = 0$, то рівняння (6) перепишеться:

$$\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = \omega^2 x, \quad (7)$$

де $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$.

Враховуючи гармонійну форму коливань припустимо, що $x = A \sin \omega t$, $\dot{x} = A \omega \cos \omega t$, $x = -A \omega^2 \sin \omega t$, $x_1 = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} A \sin \omega t$, $\dot{x}_1 = \frac{\omega_0^2 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} A \cos \omega t$, $\ddot{x}_1 = -\frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} A \sin \omega t$, тоді вираз (7) прийме вигляд

$$-\frac{\omega_0^2 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} A \sin \omega t + \frac{\omega_0^4}{\omega_0^2 - \omega^2} A \sin \omega t = \omega^2 A \sin \omega t. \quad (8)$$

При низьких частотах кінематичного збудження $\omega < \omega_0$ амплітуда коливань маси m буде більшою, ніж амплітуда коливань основи:

$$\omega = \frac{\omega_0}{k}, \quad k > 1, \quad \text{тоді} \quad \dot{x}_1 = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 \left(1 - \frac{1}{k^2}\right)} > 1.$$

Для $k = 2$: $A_1 = 4/3A = 1,33A$. Для $k = 3$: $A_1 = 1,125A$. При дуже низьких частотах ($k \gg 1$) $A_1 \approx A$.

У випадку двохкаскадного модуля, пружні сили перших напівпровідникових елементів з еквівалентною жорсткістю пропорційній їх зміщенню відносно основи, тобто $(x_1 - x)$, а других – $(x_2 - x_1)$, рівняння Лагранжа запишеться наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x) + c(x_2 - x_1) &= 0 \\ m_1 \ddot{x}_2 + c(x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

або:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + 2c_1 x_1 + cx_2 &= cx \\ m_1 \ddot{x}_2 + cx_1 + cx_2 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Переходячи до електричної аналогії „сила – напруга”, отримаємо рівняння

$$\left\{ \begin{aligned} L_1 \ddot{q}_1 + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) q_1 - \frac{1}{C_2} q_2 &= \frac{1}{C_1} q(t), \\ L_1 \ddot{q}_2 + \frac{1}{C_2} q_2 - \frac{1}{C_2} q_1 &= 0. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Електрична схема двохкаскадного охолоджувача буде мати вигляд (рис. 4).

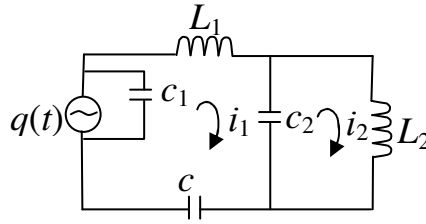


Рис. 4. Електрична схематизація двохкаскадного ТЕО

Враховуючи, що $m_1 = m_2$, $c_1 = c_2$, а значить, $L_1 = L_2$, $C_1 = C_2$ рівняння (11) перепишуться після ділення на індуктивність L :

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{q}_1 + 2\omega_0^2 q_1 - \omega_0^2 q_2 &= \omega_0^2 q(t) = \frac{1}{L} e(t), \\ \ddot{q}_2 + \omega_0^2 q_2 - \omega_0^2 q_1 &= 0. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Звідки знаходимо, що

$$q_1(t) = \frac{\omega_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{\omega^4 - \omega_0^4 - 3\omega^2 \omega_0^2} q(t), \quad q_2(t) = \frac{\omega_0^4}{-\omega^4 + \omega_0^4 + 3\omega^2 \omega_0^2} q(t), \quad (13)$$

$$\text{при } \omega \neq \omega_0, q_1(t) \neq 0, \text{ при } \omega = \omega_0, q_1(t) = 0. \quad q_2(t) = \frac{1}{3} q(t).$$

Розглянемо одноступінчасту систему із n елементів, що мають жорсткість C_1^* і з'єднані за допомогою пайки з підкладкою маси m_1 . Вся система знаходиться на масивній основі (рис. 5, а, б). Оскільки матеріал паяних з'єднань має значно більшу піддатливість, ніж інші ділянки перетворювача, то необхідно в систему ввести n демпферів з сталою демпфування β_1^* .

Система збуджується через основу, а отже, таке збудження є кінематичним. Запишемо рівняння руху маси m_1 , замінивши n елементів з жорсткостями C_1^* на одну еквівалентну $c_1 = n C_1^*$, а демпфери – одним з $\beta_1 = \frac{\beta_1^*}{n}$. Основа діє на жорсткі і на демпферні елементи, а тому:

$$m \ddot{x}_1 + \beta_1 (\dot{x}_1 - x) + c(x_1 - x) = 0 \quad (14)$$

або

$$m \ddot{x}_1 + \beta_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 = \beta_1 \dot{x} + c_1 x. \quad (15)$$

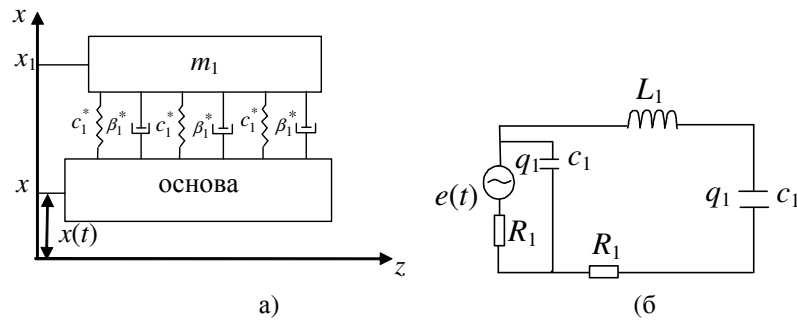


Рис. 5. Однокаскадний термоелемента з врахуванням демпфування: а) механічна схематизація; б) еквівалентна модель

Запишемо рівняння

$$(p^2 + 2hp + \omega_0^2)x_1 = (2hp + \omega_0^2)x, \quad (16)$$

де введено позначення $p = p / dt$, $h = \beta_1 / 2m_1$, $\omega_0^2 = c_1 / m_1$.

Тоді

$$x_1(t) = \frac{2hp + \omega_0^2}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} x(t). \quad (17)$$

Застосувавши аналогію, отримуємо

$$q_1(t) = \frac{2hp + \omega_0^2}{p^2 + 2hp + \omega_0^2} q(t). \quad (18)$$

Таким чином, отримані співвідношення (13), (17), (18) дають змогу не тільки визначати власні резонансні частоти термоелектричних елементів Пельтьє, а і у випадку багато каскадних конструкцій оцінювати різні співвідношення частот, які дають змогу досягати певних нерезонансних режимів. Слід зазначити, що у випадку елементів Пельтьє, керування жорсткістю, що входить у вирази, можна здійснювати вибором різних температурних режимів, а отже якщо не вдається досягти або передбачити конструктивно появу небажаного резонансу, його можна компенсувати зміною температури.

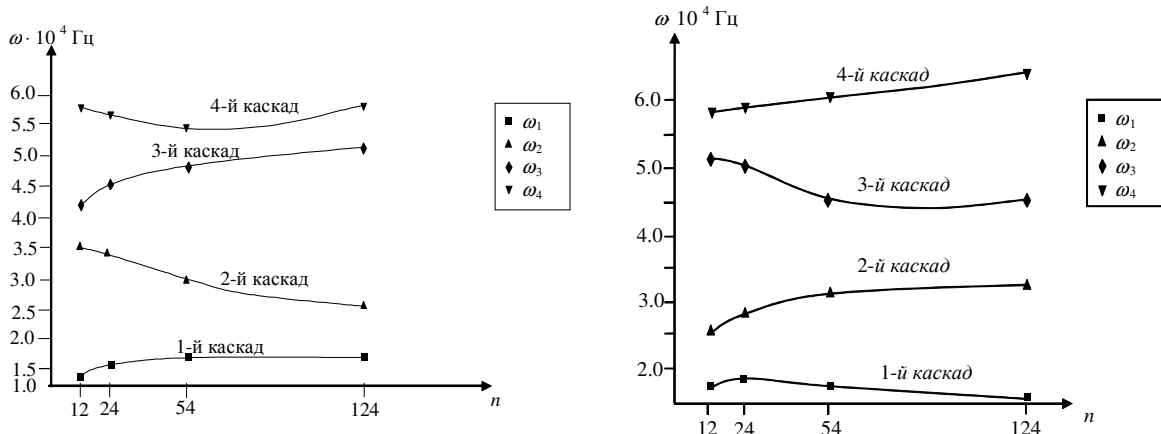


Рис. 6. Залежність частоти власних коливань чотирьохкаскадних термоелементів від кількості термоелементів у кожному каскаді з урахуванням демпфування: а) 1-ий каскад $n_1 = 124$, 2-й каскад $n_2 = 12, 24, 54, 124$, 3-й каскад $n_3 = 12$, 4-й каскад $n_4 = 12$ термоелементів б) 1-ий каскад $n_1 = 124$, 2-й каскад $n_2 = 124$, 3-й каскад $n_3 = 12, 24, 54, 124$, 4-й каскад $n_4 = 12$ термоелементів

На рис. 6 а, б, приведено результати розрахунків власних резонансних частот для чотирьох каскадних конструкцій термоелектричних елементів при урахуванні демпфуючих властивостей припою і номінальному температурному режимі роботи.

ВИСНОВКИ:

Як видно з цих графіків, резонансні частоти каскадів нелінійно залежать від механічної жорсткості між ними, а отже задача керування резонансними частотами шляхом температурного регулювання є складною і потребує детального аналізу. Як показали результати дослідження, розв'язки цієї задачі не завжди вдається знайти, а отже існує обмеження на конструктивне виконання термоелектричних модулів, яке необхідно враховувати при їх застосуванні в радіоапаратурі. Кількісна оцінка механічного впливу термоелектричних елементів показала, що на резонансних частотах досліджуємі зразки здійснюють підсилення гармонійних зовнішніх механічних коливань на рівні до 20 дБ, що є вкрай небажано для роботи електромеханічних резонансних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стецюк В. І. Проблеми вібраційної стабільності кварцових резонаторів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2008. – № 1. – С. 166-167.
2. Стецюк В. І. Вібраційна стабільність кварцових резонаторів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, Т. 1. – 2007. – № 3. – С. 165-168.
3. Определение собственных частот колебаний термоэлектрических охладителей с разных числом каскадов методами ЭГДА и Лагранжа / Т.О. Царик, А.Г. Шайко-Шайковский, Е.Н. Тимофеева, А.В. Клепиковский // Термоэлектричество. – 2004. – № 3. – С. 66-69.
4. Методика визначення власних частот коливань термоелектричних охолоджувачів за допомогою математичного моделювання / А.В. Клепиковський, Е.М. Тимофієва, Т.О. Царик, О.Г. Шайко-Шайковський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки – 2005. – Т. 2, ч. 1. – № 4. – С. 209-215.

Надійшла до редакції 10.12.2012 р.

КЛЕПІКОВСЬКИЙ АНДРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ – асистент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна.

УДК 532.783

З. М. МИКИТЮК, А. В. ФЕЧАН, О. Є. СУШИНСЬКИЙ, О. Й. ШИМЧИШИН, В. І. КОЦУН

ЗМІНА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ ПІД ВПЛИВОМ НАНОРОЗМІРНИХ ДОМІШОК

Національний університет "Львівська політехніка",
79013, м. Львів, вул. С. Бандери 12,
e-mail: zmykytyuk@polinet.lviv.ua

Анотація. У статті проведені експериментальні дослідження впливу нанорозмірних домішок, а саме C_{60} , AlN та Ag-120 на динамічні характеристики холестеричних рідких кристалів. Виявлено різний вплив нанорозмірних домішок на часи вмикання та вимкнення холестеричних рідких кристалів.

Abstract. This paper dedicated to the experimental investigation of influence of nanoparticle dopant such as C_{60} , AlN and Ag-120 on dynamic characteristics of cholesteric liquid crystals. The different influence of nanoparticle dopant on off/on times of cholesteric liquid crystals is defined.

Аннотация. В статье проведены экспериментальные исследования влияния наноразмерных примесей, а именно C_{60} , AlN и Ag-120 на динамические характеристики холестерических жидких кристаллов. Установлено различное влияние наноразмерных примесей на времена включения и выключения холестерических жидких кристаллов.

Ключові слова: холестеричні рідкі кристали, нанорозмірна домішка, динамічні характеристики, орієнтаційний порядок.

ВСТУП

Модифікація властивостей рідких кристалів (РК) для створення на їхній основі оптично активних середовищ для різного типу оптоелектронних пристроїв здійснюється переважно за рахунок розроблення нових багатокомпонентних рідкокристалічних сумішей. Проте цей шлях модифікації практично вичерпав себе. Протягом останніх років особлива увага приділяється композитним системам на основі рідких кристалів, характеризуються унікальними електро- та магнітооптичними властивостями [1]. Перспективним є введення в анізотропне середовище об'єктів, розміри яких сумірні з радіусом дії міжмолекулярних сил, що забезпечує значні зміни всіх фізичних параметрів цього класу композитних матеріалів [2].

Додавання наночастинок до рідкокристалічного матеріалу призводить до модифікації фізичних властивостей рідкого кристала, що зумовлює зміну як робочих напруг, так і часів вмикання і вимкнення пристроїв, створених на основі систем такого роду. Тому дослідження характеру впливу розмірів та форми наночастинок на електрооптичні характеристики матеріалів системи "рідкий кристал-наночастинка" є важливою науковою задачею, вирішення якої уможливило б створення нових електрооптичних елементів електронної техніки.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

У рідкокристалічних системах характер взаємодії між частинками ускладнюється внаслідок орієнтаційної пружності, що виникають у рідкокристалічній матриці після додавання до неї твердих частинок. Наявність частинок в РК матриці призводить до далекодіючих викривлень поля директора, опосередкованих сильними пружними взаємодіями між частинками. Ця проблема широко вивчається як експериментально, так і теоретично [3-6]. Енергія пружного викривлення директора навколо частинки приблизно дорівнює KR , де K – пружна константа нематичного РК, а R – радіус частинки. Для термотропного РК $K \sim 10^{-11} \text{ Н}$, і для колоїдних частинок ($R \sim 1 \mu\text{м}$) величина викривлення директора енергії на 3-4 порядки більша ніж $k_B T$. Для мінімізації цієї енергії дуже часто вигідною є агрегація частинок. Саме тому проблема отримання стабільної рідкокристалічної суспензії наночастинок ще складніша, ніж отримання стабільних суспензій в ізотропних рідинах.

Останнім часом доволі детально вивчаються процеси структуризації РК систем внаслідок

введення наночастинок; ці процеси супроводжуються самоорганізацією РК зі зміною ряду фізичних параметрів (температури фазового переходу в РК, параметра порядку системи, поляризаційних властивостей сенсibilізованої матричної системи), а значить і зміною швидкодії пристроїв на основі вибраних електрооптичних компонентів.

У роботах [7, 8] показано ефективність введення фулеренів у смектичну РК-структуру. Модель зміни внутрішньомолекулярного порядку в смектику А представлена на рис. 1.

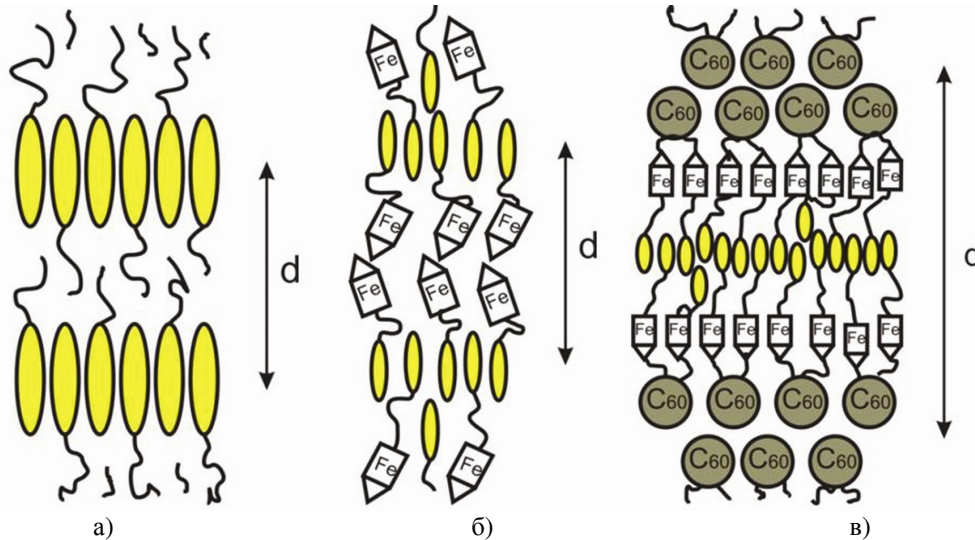


Рис. 1. Процес введення наночастинок у рідкокристалічній системі на основі смектика А: $d = 32,6 \text{ \AA}$ (а); $d = 51,6 \text{ \AA}$ (б); $d = 74,1 \text{ \AA}$ (в)

У роботах [9-11] було запропоноване та вивчене явище зміни властивостей не смектичної, а простої модельної нематичної РК-системи після введення фулеренів і фулеренвмісних комплексів з перенесенням заряду на основі молекул піридинового ряду поліімідів, поліанілінів, наночастинок фталоціанінів, у яких величина спорідненості до електрона внутрішньомолекулярного акцептора була істотно меншою, ніж аналогічний параметр у наночастиці, що вводиться. Модельне представлення процесу структуризації нематика внаслідок введення наночастинок показано на рис. 2.

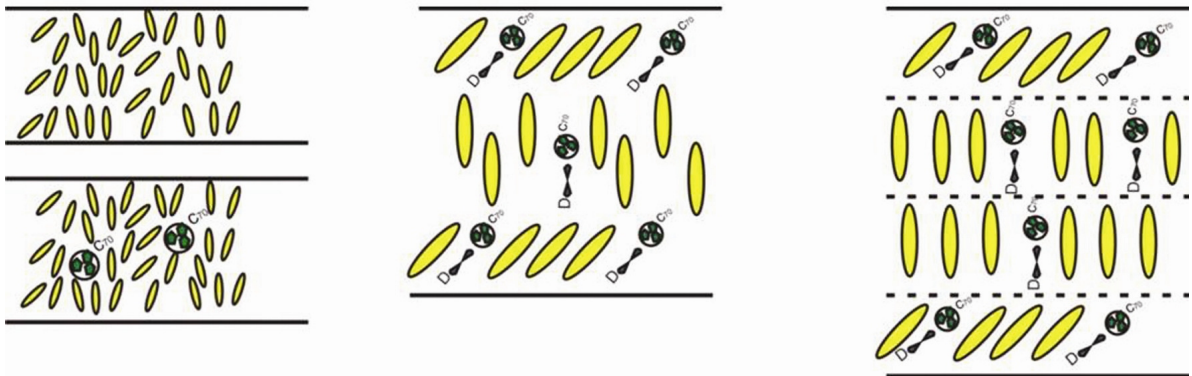


Рис. 2. Модельне представлення структуризації нематичного рідкого кристала внаслідок введення фулеренвмісних комплексів з перенесенням заряду [11]

Введення наночастинок у нематичні РК призводить до зменшення концентрації рухомих іонів у РК комірках і різко знижує перехідні струми, а також порогову напругу [12]. Такий метод покращує електрооптичні характеристики рідкокристалічних комірок. У роботі [12] використовувалось три види ізованих наночастинок – Si_3N_4 , ZnO , TiO_2 з діаметром приблизно 25 - 35 нм.

У літературних джерелах описано декілька видів наночастинок, які використовуються для модифікації властивостей рідкого кристала, зокрема метали, неорганічні матеріали, оксиди (наприклад MgO , SiO_2 , BaTiO_2 , $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$), феромагнітні матеріали [13], полімерні матеріали, C_{60} [14] тощо.

З наведених вище робіт випливає беззаперечно актуальність дослідження впливу нанорозмірних матеріалів на електрооптичні властивості рідкокристалічних матеріалів.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Нами були проведені експериментальні дослідження динамічних характеристик системи рідкий кристал-нанодомішка. Як рідкокристалічну матрицю було використано 5CB із додаванням 5 % холестеричного рідкого кристала. Ми використали в якості нанорозмірних частинок Ag-120, C₆₀ та AlN, причому середній діаметр наночастинок Ag-120 становив $d = 8,6 \pm 1$ нм, наночастинки C₆₀ – $d = 1,018$ нм, а наночастинки AlN були циліндричної форми з середньою довжиною частинки $l \approx 10,2$ нм та середнім діаметром $d \approx 4$ нм.

Динамічні характеристики досліджувались за допомогою багатофункціонального АЦП-ЦАП LabJack U3. Для отримання динамічних характеристик на експериментальну комірку подавали сигнал прямокутної форми з виходу мікроконтролера. Параметри керуючого імпульсу були фіксованими для забезпечення відтворюваності результатів і простоти їх порівняння. Величина амплітуди керуючого імпульсу в 1,2 рази більша за значення величини критичної напруги прямого холестерико-нематичного переходу [15, 16].

Типовий вигляд вікна програми та результуючого сигналу АЦП-ЦАП LabJack U3 показано на рис. 3.

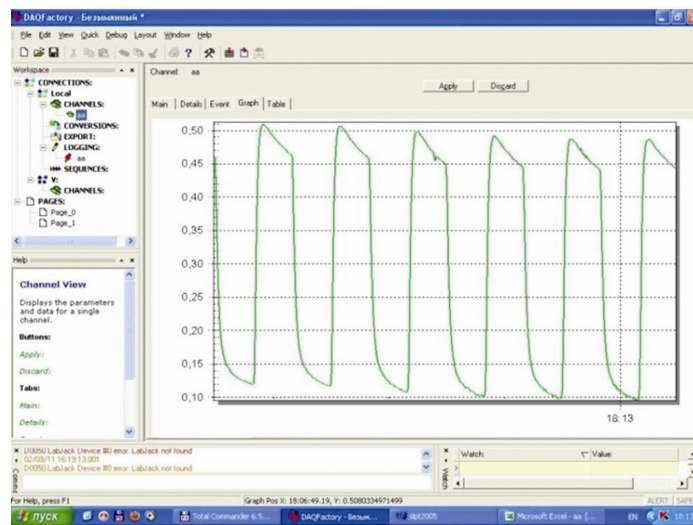


Рис. 3. Типовий вигляд вікна програми DAQFactory, що обробляє дані з АЦП-ЦАП LabJack U3

Результати вимірювань динамічних характеристик програма DAQFactory пише у файл програми Excel, з якого ми отримуємо числові дані для побудови динамічних характеристик. Результати представлено на рис. 4.

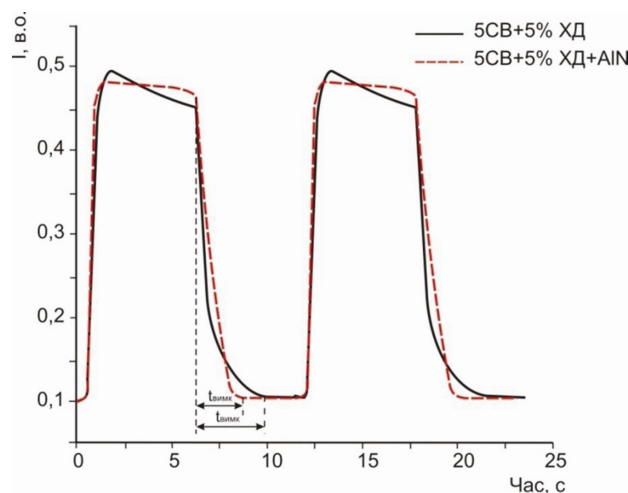


Рис. 4. Оптичний відгук для суміші 5CB+5% ХД і 5CB+5% ХД+AlN

Загалом час увімкнення зразка визначається різницею між часом встановлення інтенсивності на рівні 90 % від максимальної інтенсивності пропускання (t_{90}) та початковим часом прикладення напруги ($t_{\text{поч}}$):

$$t_{\text{вмик}} = t_{90} - t_{\text{поч}}.$$

Для ХНП використовують такі вирази для часів увімкнення і вимкнення [17]:

$$t_{\text{вмик}} = \frac{\eta}{\Delta \epsilon E^2 / 4\pi - K_{22} q^2}$$

$$t_{\text{вимкн}} = \frac{\eta \rho^2}{\pi K_{22}}$$

де q – хвильовий вектор. Але часом для $t_{\text{вимкн}}$ використовують інший вираз [18]:

$$t_{\text{вимкн}} = \frac{\eta}{K_{22} q^2}$$

У цьому разі час вимкнення зразка визначається різницею між часом, коли інтенсивність пропускання мінімальна ($t_{\text{мін}}$), та часом вимкнення напруги на зразку ($t_{\text{кін}}$):

$$t_{\text{вимкн}} = t_{\text{кін}} - t_{\text{мін}}$$

Форми оптичного відгуку для рідкокристалічних сумішей із наночастинками Ag-120, та C_{60} представлені на рис. 5 і 6.

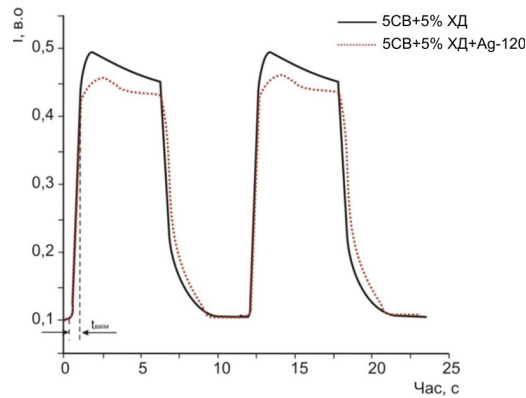


Рис.5. Оптичний відгук для суміші 5CB+5% ХД і 5CB+5% ХД+Ag-120

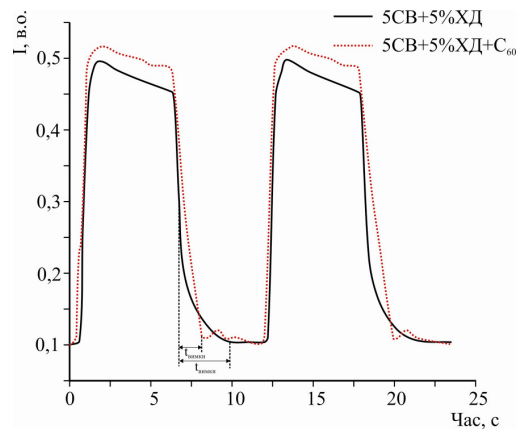


Рис. 6. Оптичний відгук для суміші 5CB+5% ХД і 5CB+5% ХД+ C_{60}

Результати експериментальних досліджень динамічних характеристик системи рідкий кристал-нанодомішка приведені в табл. 1.

Таблица 1.

Динамічні характеристики системи рідкий кристал-нанодомішка

Суміш	Час увімкнення, с	Час вимкнення, с
5CB+5% ХД	1,237	3,58
5CB+5% ХД+ C_{60}	1,022	1,89
5CB+5% ХД+AlN	1,042	2,46
5CB+5% ХД+ Ag-120	1,237	3,59

Як впливає з отриманих експериментальних досліджень динамічних характеристик системи рідкий кристал-нанодомішка, суттєве покращення часів увімкнення та вимкнення спостерігається при додаванні в рідкий кристал нанодомішки C_{60} . Оскільки розмір наночастинок C_{60} значно менший у порівнянні із іншими досліджуваними наночастинами (AlN, Ag-120) і становить 1,018 нм, що приводить до незначного розупорядкування системи. Наночастинки однакової (сферичної) форми, а саме, Ag-120 та C_{60} , по-різному впливають на характеристики рідкокристалічних матеріалів. На відміну від наночастинок Ag-120, які приводять до зростання порогових напруг, часів увімкнення-вимкнення та зменшення величини діелектричної анізотропії, внесення наночастинок C_{60} зумовлює зменшення порогових напруг, часів увімкнення-вимкнення та зростання величини діелектричної анізотропії, залишається постійним лише характер зміни величини кроку індукованої спіралі. Своєю чергою, наночастинки AlN та C_{60} приводять до падіння порогових напруг, часів увімкнення-вимкнення та зростання діелектричної анізотропії, що спричинено однаковою природою (матеріалом) наночастинок (напівпровідник) [19-21].

ВИСНОВКИ

Показано можливість покращення динамічних характеристик, а саме, часів увімкнення та вимкнення рідкокристалічних матеріалів шляхом введенням нанорозмірних домішок.

Встановлено, що додавання наночастинок C_{60} приводить до зростання величини анізотропії діелектричної проникності, яке, своєю чергою, зумовлює спадання величини порогових напруг, наночастинки C_{60} впроваджуючись між шарами рідкого кристала, що приводить до зменшення величини міжмолекулярної взаємодії і, як наслідок, до збільшення кроку надмолекулярної спіральної структури.

Виявлено, що внесення наночастинок Ag-120 в рідкий кристал не приводить до покращення динамічних характеристик дослідних зразків, оскільки крутизна динамічних характеристик після внесення наночастинок Ag-120 не змінюється, зменшується лише величина інтенсивності оптичного відгуку, що пояснюється впливом наночастинок срібла на характеристики розсіювання зразків.

Показано, що внесення в рідкий кристал наночастинки AlN циліндричної форми відбувається зменшення часів увімкнення та вимкнення, оскільки зменшуються критичні напруги та збільшується діелектрична анізотропія, що зумовлено послабленням сил міжмолекулярної взаємодії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liquid Crystal Colloids: A Novel Composite Material Based on Liquid Crystals / Fukuda J. // J. Phys. Soc. Jpn. – 2009. – Vol. 78. – p. 041003-041011.
2. Link Plasmonic Nanoparticles-Liquid Crystal Composites / Khatua S., Manna P., Chang W., Tcherniak A., Friedlander E., Zubarev E. // J. Phys. Chem. – 2010. – Vol. 114. – p. 7251-7257.
3. Physics of colloidal dispersions in nematic liquid crystals / Stark H. // Phys. Rev. – 2001. – Vol. 351. – p. 387-474.
4. Crystal Structure in Nematic Emulsion / Nazarenko V.G., Nych A.B., and Lev B.I. // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 87. – p. 075504-075508.
5. Yamamoto R. Simulating Particle Dispersions in Nematic Liquid-Crystal Solvents / Yamamoto R. // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 87. – p. 075502-075506.
6. Symmetry breaking and interaction of colloidal particles in nematic liquid crystals / Lev B.I., Chernyshuk S.B., Tomchuk P.M., Yokoyama H. // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 65. – p. 021709-021722
7. A Mixed Fullerene – Ferrocene Thermotropic Liquid Crystal: Synthesis, Liquid-Crystalline Properties, Supramolecular Organization and Photoinduced Electron Transfer / Even M., Heinrich B., Guillonet D. // Chem. Eur. J. – 2001. – Vol. 7 – p. 2595-2604.
8. Fullerene-containing thermotropic liquid crystals / Chuard T., Dardel B., Deschenaux R., Even M. // Carbon. – 2000. – Vol. 38. – p. 1573-1576.
9. Optical investigations of a C_{70} -doped 2-cyclooctylamino-5 nitropyridine-liquid crystal system / Kamanina N. V. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2002. – Vol. 4, No. 4. – p. 571-574.
10. Self-organization and dynamic characteristics study of nanostructured liquid crystal compounds / Kamanina N.V., Zubtsova Yu. A., Shulevet V. A. // Solid State Phenomena. – 2005. – Vol. 106. – p. 145-148.
11. Possible transition of fullerene-containing nematic liquid crystal to smectic phase / Kamanina N.V., Mikhailova M.M., Denisyuk A.I., Sapurina I.Yu. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2005. – Vol. 426. – p. 129-135.
12. Effect of Doped Insulating Nanoparticles on the Electro-Optical Characteristics of Nematic Liquid Crystals/ Chen W.-T., Chen P.-S., Chao C.-Y. // Jap. Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 48. – p. 015006-1– 015006-5.

13. Frequency modulation response of a liquid-crystal electro-optic device doped with nanoparticles / Shiraishi Y., Maeda K., Yoshikawa H., Xu J., Toshima N. and Kobayashi S. // Appl. Phys. Lett. - 2002. – Vol. 81, No. 15. – p. 2845-2847.
14. Nanoparticles and LCDs: It's a Surprising Word / Kobayashi S., Toshima N. // Information Display. – 2007. – Vol.23, No. 9. – p. 26-32.
15. The Cholesteric-Nematic Transition in Thin Layers of Nematic-Cholesteric Mixtures / Hotra Z., Mykytyuk Z., Hotra O., Fechan A., Syshynskyy O., Yasynovska O., Kotsun V. // Mol. Cryst. and Liq. Cryst. – 2011. – Vol. 534. – p. 32-40.
16. Method for Determining of Threshold Voltages of Cholesteric-Nematic Transition / Z. Hotra, Z. Mykytyuk, A. Fechan, O. Sushynsky, O. Yasynovska, V. Kotsun // Mol. Cryst. and Liq. Cryst. – 2011. – Vol. 535. – p. 225-232.
17. Модуляция излучения CO₂-лазера с использованием фазового холестерического перехода / В.В.Данилов, Д.А.Савельев // Труды ГОИ. – 1986 – т. 60, вып.194. – с. 81-91.
18. Динамика холестерико-нематического перехода в жидкокристаллических композициях / Мыльников В.С., Морозова Е.А. // Журнал технической физики. – 1984 – т. 54, № 10. – с.1980-1985.
19. Application possibilities of nanoparticles for modification of parameters of liquid crystal materials / Hotra Z., Mykytyuk Z., Fechan A., Sushynskyy O., Yasynovska O., Kotsun V., Levenets V., Kalita W., Blad G. // Elektronika. – 2010. – No. 8. – p.125–128.
20. Вплив металічних наночастинок Ag на електрооптичні властивості рідкокристалічних матеріалів / Микитюк З.М., Фечан А.В., Сушинський О.Є., Ясиновська О.Й., Коцун В.І., Левенець В.В., Заїченко О.С., Шевчук О.М. // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроніка. – № 681. – 2010. – с. 139–143.
21. Рідкокристалічні матеріали з наночастинками як активне середовище дисплеїв / З. М. Микитюк, А. В. Фечан, О. Є. Сушинський, В. І. Коцун, А. В. Вараниця // Міжнародний Науково-Технічний Журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології". – 2009. – № 2(18). – с. 135–140.

Надійшла до редакції 29.11.2012 р.

МИКИТЮК ЗІНОВІЙ МАТВІЙОВИЧ – д.ф.-м.н., професор кафедри електронних приладів, Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна.

ФЕЧАН АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ – к.ф.-м.н., професор кафедри електронних приладів, Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна.

СУШИНСЬКИЙ ОРЕСТ ЄВГЕНОВИЧ – к.ф.-м.н., докторант кафедри електронних приладів, Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна.

ШИМЧИШИН ОЛЬГА ЙОСИФІВНА – асистент кафедри електронних приладів, Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна.

КОЦУН ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ – Львівська філія Європейського університету, старший викладач кафедри математики на комп'ютерних дисциплін, м. Львів, Україна.

УДК 535.8

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, О.А. ІВАНОВ

ОПТИЧНО-КЕРОВАННИЙ КОМУТАТОР НА ОСНОВІ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ

*Вінницький національний технічний університет,
кафедра лазерної та оптоелектронної техніки,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація: Проведено аналіз властивостей фотонних кристалів, можливість їх введення у системи маршрутизації даних. Представлено основні методи виготовлення кристалів та пристроїв а їх основі. Проаналізовано основні переваги та недоліки таких пристроїв.

Аннотация: Проведен анализ свойств фотонных кристаллов, возможность их внедрения в системы маршрутизации данных. Представлены основные методы изготовления кристаллов и устройств а их основе. Проанализированы основные преимущества и недостатки таких устройств.

Abstract: The analysis of the properties of photonic crystals, the possibility of introducing a system of routing data. The basic methods of crystal and devices and their base. Analyzed the advantages and disadvantages of such devices.

Ключові слова: фотонні кристали, обробка даних, оптоелектроніка.

ВСТУП

Варто відзначити тенденції розвитку систем обробки інформації. Із кожним роком збільшується потреба у швидкості обчислень, які виконують сучасні комп'ютери, підвищення точності маршрутизації великих потоків даних. Традиційно цю проблему вирішували збільшенням показників тактової частоти, об'єму оперативної пам'яті, розробкою нових математичних методів обробки та аналізу. Проблему маршрутизації вирішують із застосуванням розподілених систем маршрутизації. Але на теперішній момент підняття кількісних характеристик вже не задовольняє потреби. Необхідні глибокі якісні зміни для створення принципово нових систем обробки та маршрутизації даних.

Поставлену проблему автори пропонують вирішувати наступним чином:

- а) введенням на всіх етапах обробки інформації оптоелектронної елементної бази;
- б) синтезом оптичних елементів, на базі фотонних кристалів, аналогів існуючих електричних.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Провести аналіз існуючих систем для маршрутизації та обробки даних. Визначити новий підхід до маршрутизації даних з використанням новітніх досягнень оптоелектроніки.

Провести огляд існуючих систем для маршрутизації та обробки даних. Визначити можливість введення фотонних кристалів та пристроїв на їх основі у системи обробки та маршрутизації даних.

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

На теперішній момент розвиток обчислювальної техніки неможливий без одночасного розвитку елементної бази. В основу майбутньої елементної бази для ЕОМ будуть покладені фотонні кристали, так як вони являються найбільш вдалим рішенням для реалізації оптичних інтегральних схем.

Фотонні кристали (ФК) – це штучні, періодичні діелектричні або напівпровідникові структури (матеріали) із забороненою зоною, що перешкоджає поширенню світла в визначеному частотному діапазоні [1,2]. Створюючи точкові дефекти у такого роду структурах, можна реалізувати так звані «фотонні пастки», у яких поширення світла не можливе за їх межами. Створюючи комбінації точкових дефектів, стає можливим реалізації основних елементів сучасних електричних схем у фотонних кристалах, що дозволить значно підвищити продуктивність та якість обчислень [2]. В залежності від кількості напрямків неоднорідності ФК поділяються на одновимірні, двовимірні та тривимірні фотонні кристали.

Одновимірний фотонний кристал можна отримати почерговим нанесенням діелектричних шарів із різним показником заломлення, так зване Брегівське дзеркало. Наприклад пара діелектриків при

нанесені 5 парних шарів дає коефіцієнт відбиття близько 99%.

Двовимірний ФК отримують формуючи періодичну структуру із вертикальних стержнів кремнію (Si), яка посаджена на підкладку із діоксиду кремнію (SiO_2), або з використанням макропористого кремнію у структурі якого прибирають "зайві" макропори.

Тривимірні фотонні кристали являють собою регулярно-симетричну структуру, яка складається із кубів, або сфер розташованих у кубічному порядку. На рис. 1. представлено схематичне зображення фотонних кристалів.

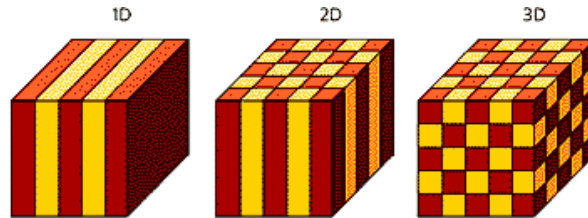


Рис. 1. Типи фотонних кристалів

Фотонні кристали можуть бути використані для вирішення глобальних проблем, таких як створення надпотужних комп'ютерів на основі фотонних інтегральних схем (ФІС). Також для ряду складних функціональних задач таких як: поворот променя на 90° , перетин двох хвильоводів, фільтрація окремої світлової хвилі із загального потоку та багато інших [3].

Розглянемо проблему, яка виникає при прокладанні волоконних ліній зв'язку – це поворот волокна. Поворот оптичного хвильоводу, при якому втрати є мінімальними можливий лише при умові, що радіус буде на багато більшим ніж довжина хвилі. Виконання цієї умови у інтегральній оптиці є досить складною задачею особливо для довжини хвилі 1550 нм. Поворот променю у такому випадку краще розглядати у площині двовимірного фотонного кристалу (рис. 2).

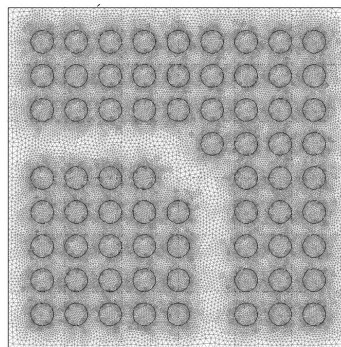


Рис. 2. Схема повороту у ФК

Ідея повороту зводиться до видалення ряду стержнів по напрямку слідування променю, таким чином створюючи лінійний дефект. Матеріали для виготовлення обираються в залежності від довжини хвилі, що поширюватиметься даним каналом, зокрема для видимого діапазону використовується природній опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, для інфрачервоного діапазону використовується макропористий кремній. У даному випадку радіус повороту складає $2a$, де a - період ґратки [4].

Проблем із підключенням волоконного каналу до ФК реалізуються як безпосередній контакт каналу та кристалу, скріпленого інтегральним виконанням (рис. 3). Єдиним недоліком такого методу є нероз'ємність.

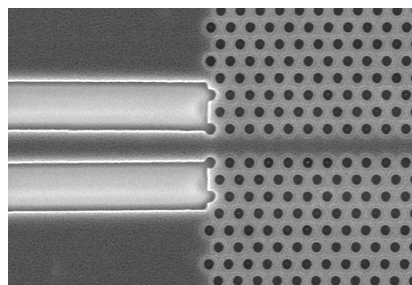


Рис. 3. Підведення інтегрального хвильоводу до ФК

Така реалізація повороту дозволяє суттєво заощадити на ресурсах, використовуючи замість волокна ФК, зменшує у декілька разів розміри схеми, та мінімізує вірогідність втрати сигналу чи його послаблення.

Відомою властивістю фотонного кристалу є передача потужностей між двома суміжними каналами, що виникає в наслідок резонансних властивостей каналів. Ефект подібний до того, що виникає під час контакту двох жил оптичного волокна (рис.4)

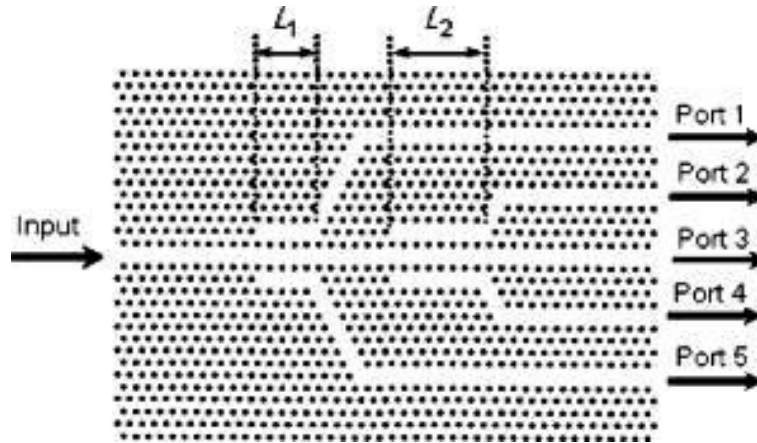


Рис. 4. передача потужностей у ФК

Така структура може бути використана для пасивної фільтрації, за довжиною хвилі. Тобто лише сигнал із довжиною хвилі, що відповідає параметрам суміжного каналу, може бути виділений із магістрального потоку. Виділення сигналу проходить, за рахунок передачі потужності і повністю завершується при проходженні сигналом ділянки довжиною L . Для кожної довжини хвилі параметр L є різною величиною, що дозволяє в одному кристалі виділяти декілька хвиль[4].

У представленого методу є ряд недоліків один з них – це відсутність керування при передачі потужності, та залежність від параметру L . Це впливає на ефективність використання простору кристалу та керування процесом обробки. Для зменшення довжини ділянки взаємодії доцільно використати керовану систему маршрутизації. Принцип керованої передачі потужності полягає у зовнішньому впливі на ділянку переходу, що зменшує розміри останньої (рис. 5).

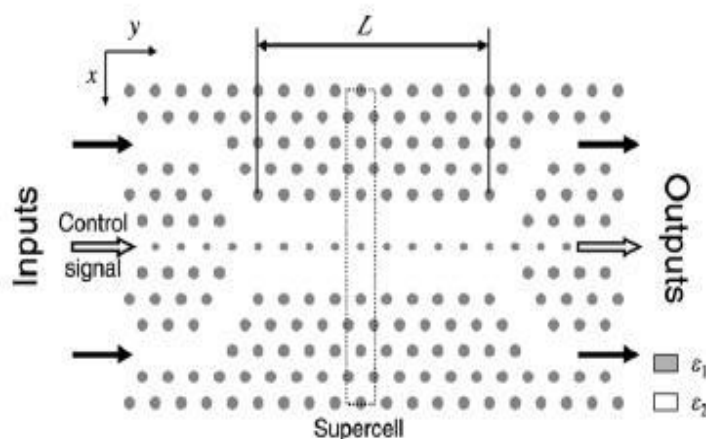


Рис. 5. Схема керованої передачі потужності

У даній системі використовується вплив оптичного випромінювання на зону переходу. Випромінювання повинно відповідати довжині хвилі, що поширюється у фотонному кристалі, за рахунок підсилення швидше відбувається перехід на обмеженій відстані. У якості джерела використовується лазер, зокрема VCSEL. Виходячи із вище наведеного можна побудувати оптично керований комутатор який буде являти собою компоновану структуру що складатиметься із масиву лазерів VCSEL, та фотонного кристалу із підготовленими каналами для маршрутизації (рис.6).

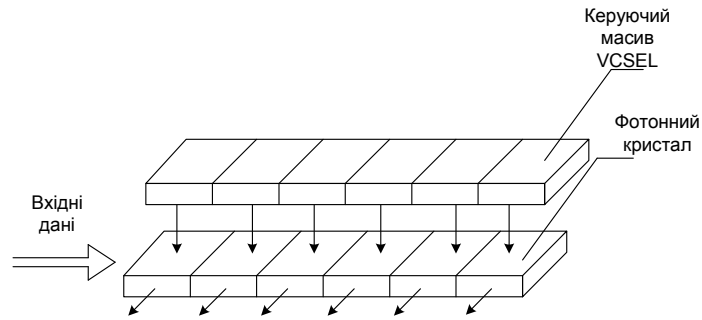


Рис. 6. Оптично керований комутатор з використанням фотонних кристалів

Провівши аналіз можна визначити основні переваги та недоліки такої схеми.

Серед переваг можна виділити наступні:

- висока швидкодія,
- зручна інтеграція,
- малі розміри;

Недоліки:

- висока вартість,
- складність виготовлення,
- високі вимоги до точності;

Незважаючи на перераховані недоліки експериментальні моделі таких систем можуть бути реалізовані. Для виготовлення кристалів оптимальним є метод тривимірної фотолітографії. Він дозволяє будувати будь-які структури із розмірами порядку десятків нанометрів. Нижче наведено фотографії отриманих 3D-фотонних кристалів виготовлених за методом тривимірної фотолітографії компанією NanoScribe. (Рис.7), та 2D-фотонних кристалів отриманих за методом двофотонної полімеризації (Рис.8) [5].

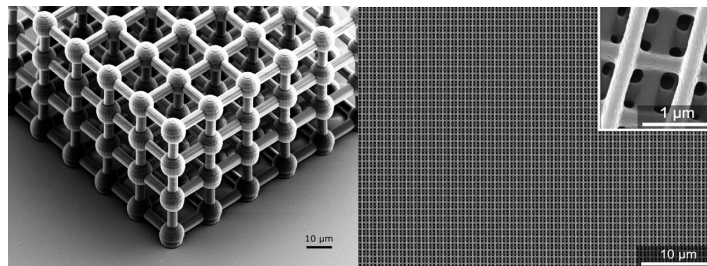


Рис.7. Трьохвимірні кристал отриманий методом тривимірної фотолітографії

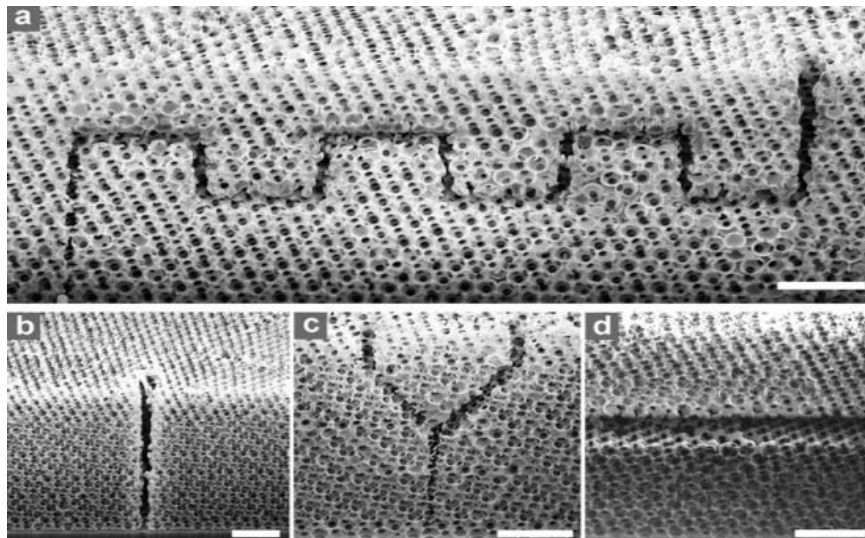


Рис. 8. Двохвимірні фотонні кристали витравлені методом двофотонної полімеризації

ВИСНОВКИ

У роботі проведено аналіз властивостей фотонних кристалів, розглянуто основні положення для успішного використання елементів на їх основі. Показано, що введення фотонних кристалів у існуючі системи маршрутизації даних є прийнятною задачею. Виявлено недоліки запропонованих систем та представлено засоби для побудови керованих оптичних комутаторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade / Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (second edition): Princeton University Press 2008, 305p.
2. A. F. Koenderink / Emission and transport of light in photonic crystals: Universiteit van Amsterdam 2003, 178p.
3. Sakoda K. / Optical Properties of Photonic Crystals: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, 305p.
4. Notomi, M. / Negative refraction in photonic crystals. Opt. Quantum Electron., 2002, 133p.
5. Michael Thiel, Martin Hermatschweiler / Three-dimensional laser lithography : Optik & Photonik 4/2011, 36p.

Надійшла до редакції 29.11.2012 р.

КОЖЕМ'ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ІВАНОВ ОЛЕКСІЙ АНДРІЙОВИЧ – аспірант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.