

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Кафедра мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
ОПТИЧНІ ФІЛЬТРИ НА ОСНОВІ БАГАТОШАРОВИХ НАНОСТРУКТУР  
(тема)

Виконав:  
студент 2-го курсу, групи ЕППМ-22-1  
Хрипливий Алексей Русланович  
(прізвище, ініціали)  
Спеціальність  
171 Електроніка  
(код і повна назва спеціальності)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма  
Електронні прилади та пристрої  
(повна назва освітньої програми)  
Керівник доц. каф. МЕЕПП Пащенко О.Г.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ Бондаренко І.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

2023 р.





## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 56 сторінок, 11 рисунків, 3 таблиць, 41 джерел посилань.

КОЛЬОРОВІ ФІЛЬТРИ; ФОТОННІ КРИСТАЛИ; НАНООТВОРИ; МІЄ РОЗСІЮВАННЯ; РІДКО-КРИСТАЛІЧНИЙ ЕКРАН, ФОНОНИ, ПОЛЯРИТОНИ.

Об'єкт дослідження – оптичні властивості багатокомпонентних наноструктурованих матеріалів.

Мета роботи – обґрунтувати вибір виду матеріалу і типу наноструктури для створення оптичних фільтрів з добре керованими властивостями.

Метод дослідження – структурний та порівняльний аналіз оптичних властивостей різноманітних наноструктурованих матеріалів з огляду на можливості модифікації спектрів пропускання, поглинання та відбиття.

Колір відіграє важливу роль у житті людини: без нього життя було б нудним та однотонним. Колір друку з різними характеристиками, такими як відтінок, яскравість і насиченість, і висока роздільна здатність є основною характеристикою пристроїв сприйняття зображення. Гнучка кольорова конструкція фільтр також бажаний для кутової нечутливості та незалежності від напрямку поляризації падіння світло. Крім того, важливо, щоб розроблений фільтр був сумісний із розпізнаванням зображення пристроїв з точки зору технології та розмірів. Тому кольоровий фільтр вимагає особливої обережності при проектуванні, функціонування та інтеграція. У цій роботі представлено вичерпний огляд наноструктурованого кольору дизайни фільтрів, описані на сьогоднішній день, і оцінити їх з точки зору продуктивності.

## ABSTRACT

The explanatory note contains 56 pages, 11 figures, 3 tables, 41 sources of links.

COLOR FILTERS; PHOTONIC CRYSTALS; NANOHOLES; MIE SCATTERING; LIQUID CRYSTAL DISPLAY, PHONONS, POLARITONS.

The object of research is the optical properties of multicomponent nanostructured materials.

The purpose of the work is to justify the choice of the type of material and type of nanostructure for the creation of optical filters with well-controlled properties.

The method under research is a structural and comparative analysis of the optical properties of various nanostructured materials in view of the possibility to modify the transmission, absorption and reflection spectra.

Color plays an important role in human life: colourless life would be dull and monochromatic. Printing color with distinct characteristics, like hue, brightness and saturation, and high resolution, are the main characteristic of image sensing devices. A flexible design of color filter is also desired for angle insensitivity and independence of direction of incident light polarization. Furthermore, it is important that the designed filter be compatible with the image sensing devices in terms of technology and size. Therefore, color filter requires special care in its design, operation and integration. A comprehensive review of nanostructured color filter designs described to date and evaluated in terms of their performance is presented in this work.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	7
ВСТУП .....	9
1 ОПТИЧНІ ТОНКОПЛІВНІ ФІЛЬТРИ .....	11
2 ПЛАЗМОНИ .....	19
2.1 Поверхневі плазмонні поляритони.....	19
2.1.1 Конфігурація Отто. ....	21
2.1.2 Одновимірна – 1D дифракційна решітка.....	23
2.2 Локалізовані поверхневі плазмонічні резонанси .....	28
2.2.1 Наноотвори.....	28
2.2.2 Гібридні колірні фільтри Наноотвір-Нанодиск .....	30
2.2.3 Метаповерхні.....	33
2.2.4 Поверхневі плазмони.....	36
3 КОЛЬОРОВИЙ ФІЛЬТР НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИКА.....	39
4 ПЛАЗМОННІ КОЛЬОРОВІ ФІЛЬТРИ НА ОСНОВІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ .	45
ВИСНОВКИ.....	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	53
ДОДАТОК А.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЕОТ – Екстраординарна передача;

ПММА – поліметилметакрилат;

РК – рідкий кристал;

Чаша Лікурга — це римська чаша зі скляною кліткою 4-го століття, виготовлена з дихроїчного скла, яке має різний колір залежно від того, чи проходить крізь нього світло: червоне, коли освітлюється ззаду, і зелене, коли освітлюється спереду;

АС – змінний струм;

BSI – заднє підсвічування;

CCD – Прилад із зарядовим зв'язком;

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor - комплементарний металооксидний напівпровідник;

CMY – Cyan Magenta Yellow - Блакитний Пурпуровий Жовтий;

Dpi – dots per inch – точок на дюйм;

EBL – Електронно-променева літографія;

ED – Електричний диполь;

ELT – Extraordinary Low Transmission;

FIB – Сфокусований іонний промінь;

FWHM – Full Width Half Maximum – напівширина;

GMR – резонансів керованої моди;

GSR Gap – Поверхневий плазмон;

ITO – оксид титану індію;

LCD – рідкокристалічний дисплей;

LSP – Локальний поверхневий плазмон;

LSPP – Локальні поверхневі плазмонні поляритони;

LSPR – Localized Surface Plasmon Resonance – Локалізований поверхневий плазмонний резонанс;

MD – Магнітний диполь;

MIMFP – Метал-Ізолятор-Метал Фабрі-Перо;

Mi Mie scattering – Розсіювання світла сферичною частинкою — класична задача електродинаміки, розв'язана 1908 року німецьким фізиком Густавом Мі для частинки будь-якого розміру;

MNP – металева наночастинка;

ND – нано-диски;

NIL – Nanoimprint Літографія;

RGB – Red Green Blue – Червоний Зелений Синій;

SERS – поверхнево-розширена раманівська спектроскопія;

SEM – скануючий електронний мікроскоп;

SERS – Спектроскопія комбінаційного розсіювання поверхні;

SLR – Резонанс поверхневої решітки;

SPP – поверхневі плазмонні поляритони;

SPR – поверхневий плазмонний резонанс;

TN – Twisted Nematic

## ВСТУП

Вхідні електромагнітні хвилі видимого спектру (від 400нм до 700 нм) здатні стимулюючи фоторецепторні клітини сітківки ока людини, що забезпечує сприйняття кольорів. Сенсорні пристрої (камери, сканери, принтери тощо), які відтворюють роботу очей, розпізнавання кольорів відіграє важливу роль для збереження точної інформації про колір у кожному пікселі знятого зображення. Якість кольору, створюваного за допомогою фільтрів, залежить від максимального значення на півширини повної хвилі, ефективності та чітке розташування піку пропускання/провалу відбиття у видимому спектрі. Отже, все вищесказані характеристики відіграють роль у позиціонуванні вихідного кольору на колірному просторі CIE 1931 [1].

Як правило, адитивний або від'ємний колір і фільтр Байєра [2] разом із фільтром на основі полімерної технології, використовуються для сприйняття зображення. За останні три десятиліття синтетичні барвники та фарби на основі пігментів [3] широко використовуються для декорування предметів, друкарської фарби, синтетичних волокон та ідентифікації [4 – 6]. Тим не менш, ці фільтри мають багато недоліків, таких як неможливість переробки, недоступні за ціною та завдають шкоди навколишньому середовищу. Аналогічно, їх ефективність як датчиків зображення [7, 8] також має обмеження, такі як недостатня роздільна здатність і крихкість. Однак останній прогрес у дизайні кольорового фільтра разом з еволюцією оптичної фізики [9, 10] і технології виготовлення [11 – 13], революціонізував процес фільтрації кольорів і замінив звичайне фарбування на основі сухого пігменту, завдяки можливості налаштування кольору, довговічності, високій роздільній здатності та екологічності.

У минулому, пристрої з зарядним зв'язком (CCD) в основному використовувалися для різних пристроїв прийому зображення як камери, мікроскопи та детектори в галузі наук про життя, астрономії та оптичній мікроскопії. Однак останнім часом сенсорні пристрої на основі

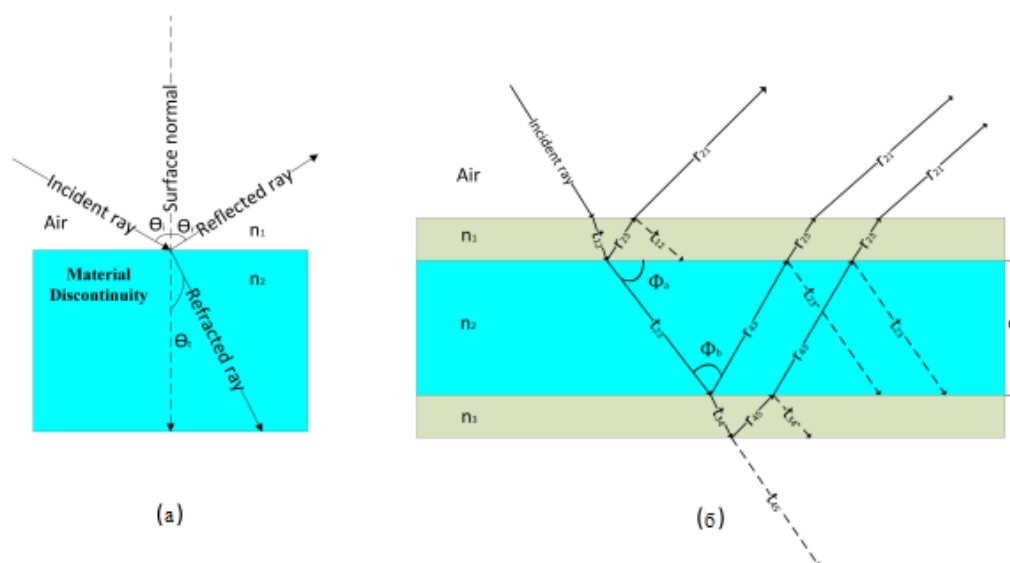
комплементарного метало-оксидного напівпровідника (CMOS) перевершили за продуктивністю своїх попередників, продемонструвавши низьке енергоспоживання та більш високу можливість мініатюризації.

Сьогодні наноструктурні оптичні фільтри проектуються в наномасштабі і є одними з провідних учасників гонки мініатюризації. Ідея неструктурних оптичних фільтрів виводиться з прикладів у природі, таких як метелики, павичі, жуки та плоди полії [14 – 16]. У структурних фільтрах принцип роботи заснований на взаємодії світла і матерії, коли світло взаємодіє зі спроектованими нанорозмірними структурами та дозволяє фільтрувати колір за допомогою дифракції світла, розсіювання, відбиття, заломлення та передачі на резонансній довжині хвилі.

Ця робота присвячена принципам роботи наноструктурних оптичних фільтрів і поглиначів на основі тонкіплівних резонаторів Фабрі-Перо (FP) (базова тонкоплівкова структура, що складається з діелектричного шару, затиснутого двома металевими шарами, щоб утворити порожнину метал-діелектрик-метал (MDM)). Плазмоніка (підрозділ фотоніки, що вивчає створення та використання електромагнітних полів, локалізованих на масштабах, менших від довжини хвилі світла при взаємодії з носіями заряду на межі розділу середовищ), діелектричні та рідкокристалічні технології. Значна частина роботи в цих сферах оцінюється з точки зору якості кольору, просторової роздільної здатності, залежності виходу від кута огляду та поляризація світла, а також необхідні етапи виготовлення. Деталі динаміки оптичних фільтрів, такі як механічна [17], хімічна [18] або електрична налаштованість [19] тощо, виходять за рамки обсягу цієї роботи.

## 1 ОПТИЧНІ ТОНКОПЛІВНІ ФІЛЬТРИ

На рисунку 1.1 а, зображено матеріальний розрив на шляху розповсюдження світла від матеріалу з індексом заломлення  $n_1$  до від матеріалу з індексом заломлення  $n_2$ . Це забезпечує відбивання, заломлення та пропускання світла в залежності від кута падіння  $\theta_i$ .



коли світло проходить через (а) – одинарний та (б) – численні матеріали з різними індексами заломлення

Рисунок 1.1 – Векторна діаграма пропускання та відбиття в FP – резонаторі

Рівняння Френеля для пропускання ( $t$ ) і відбиття ( $r$ ) на поверхні розділу матеріалів для  $s$  і  $p$  поляризації задаються наступним чином:

$$t_s = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t}, \quad (1.1)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t}, \quad (1.2)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (1.3)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}. \quad (1.4)$$

В іншому випадку, коли світло падає на шар  $n_2$  з високим показником заломлення та товщиною  $L$  між двома шарами з показниками заломлення  $n_1$  і  $n_2$ , як показано на рисунку 1.1 б. Ця установка називається інтерферометром Фабрі-Перо (FP) яка дозволяє фільтрувати залежно від товщини порожнини FP і показники заломлення  $n_1$ ,  $n_2$  і  $n_3$ . Тут  $r_{ij}$  вказує на коефіцієнт відбиття на межі розділу регіонів 1 і 2.

При резонансі FP світло затримується в порожнині у вигляді стоячих хвиль і відбивається між двома кордонами. З іншого боку, промені які поширюються в області, прилеглій до плівок, призведуть до повного відбиття або виходу з системи. Оскільки ці промені проходять різні відстані в межах плівок, вони можуть мати деструктивний або конструктивний характер втручання. При цьому інтенсивність відбитої і заломленої хвиль разом із індексом заломлення матеріалу залежить від товщини порожнини  $L$  і призводить до фільтрації небажаних частот. Тут  $L = m\lambda/2n$ , де  $m$  – ціле число,  $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі [23 – 25].

Фільтрація на основі FP — це багатогранна установка для керування поширенням світла. Інтерферометр дозволяє певні частоти для проходження через нього або може діяти як антивідбиваюче (AR) покриття для зменшення відбиття світла в конструкції, що може спричинити руйнівні перешкоди. Було багато застосувань FP резонатора в різних галузях науки, таких як клінічна діагностика [26, 27], оптичний зв'язок [28, 29] і зондування [30 – 32]. Застосування інтерферометрів FP на основі метал ізолятор метал (MIM), які демонструють оптичну фільтрацію шляхом налаштування товщини порожнини, затиснутої між двома шарами металевих дзеркал все ще широко поширене через її економічну ефективність, просту конструкцію, кілька етапів виготовлення [33

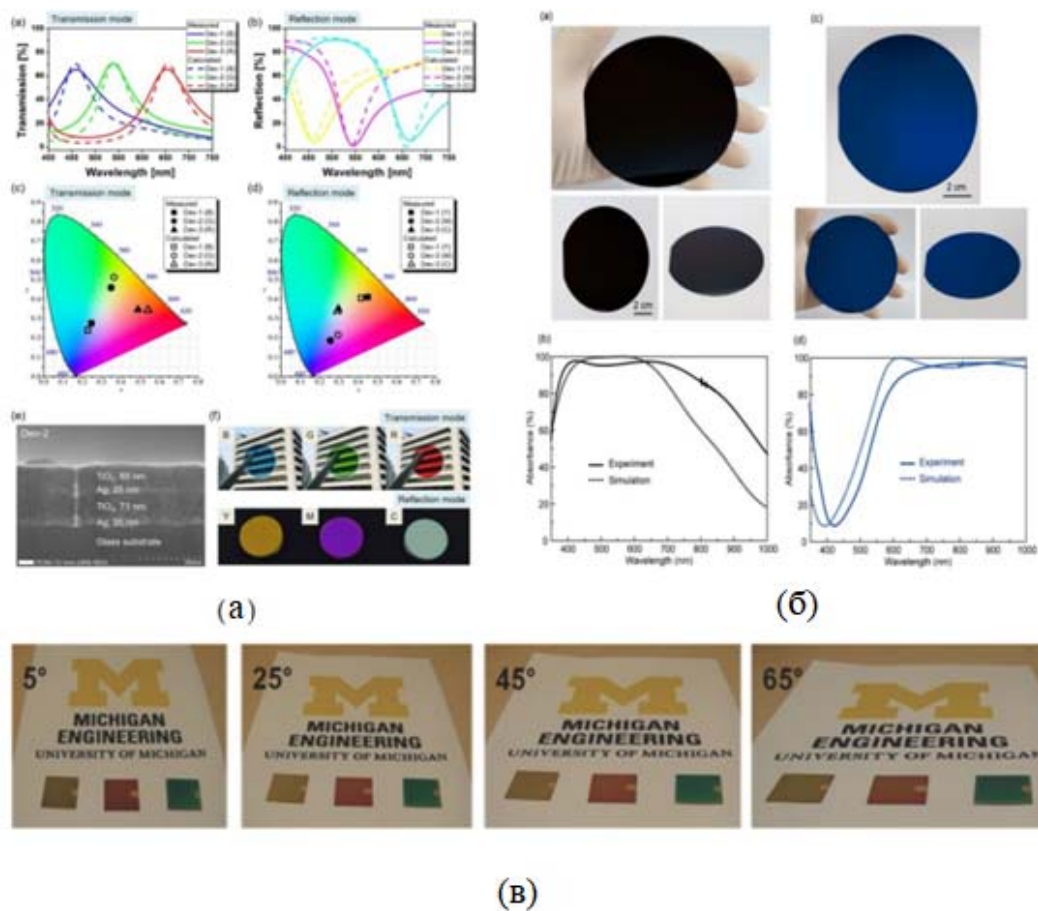
– 37] та легкої інтеграції. У цьому розділі наведено дослідження оптичних фільтрів на основі FP.

Оптичний пропускний фільтр був розроблений для фільтрації додаткових кольорів (червоного, зеленого та синього) [38]. Він складається з металевих шарів срібла (Ag) і діоксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ) як діелектрика. Пристрої з різною товщиною діелектрика  $h$  були виготовлені за допомогою плазмового хімічного способу парового осадження (PECVD) [13]. Пристрій було додатково оцінено з точки зору його поляризаційної чутливості для косоного падіння променів, кутової залежності та позиційної залежності. Мінімальна зареєстрована смуга пропускання становила приблизно 100 нм для зеленого кольору та інтенсивності кольору становила 60%. Однак для похилого падіння світла кутова залежність відносного пропускання становила до  $\approx 12$ , і пристрій був нечутливим.

Так само, для позиційної залежності центральна довжина хвилі показала 10% варіацію. Результати були додатково вдосконалені за рахунок використання оксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ) як шару діелектрика з фазовою компенсацією. Діелектрична накладка – збільшення кутової нечутливості до  $70^\circ$ . Конструкція була додатково змінена використовуючи накладки у верхній частині стека [12] (рисунок 1.2 А), що дозволяло також подвійний режим фільтрації кольорів як фазову компенсацію. Товщина порожнини  $\text{TiO}_2$  допускала розгортку резонансної частоти через видимий режим. Крім того, дизайн був досить гнучким, щоб змінювати насиченість кольору зміною товщини одного з дзеркал Ag з невеликою зміною ефективності передачі.

Zhangyang Li et al. [39] продемонстрував продуктивність надтонкої, великої площі, без літографії металеві плівки як суперпоглиначі та додаткові оптичні фільтри. Конструкція складається з ізоляційної плівки ( $\text{SiO}_2$ ), затиснутої між двома металевими плівками (Ag). Конструкція поводить себе як суперпоглинач, коли використовується в режимі відбиття з оптично товстим шаром на боці передачі, блокуючи таким чином всі передачі через пристрій. Варіюючи спектри пропускання та поглинання товщина діелектрика, тобто порожнина Фабрі-Перо, резонансна довжина хвилі охопила і видимий і ближній

інфрачервоній ділянці спектру. Плазмонний ефект не був помічений, а поглинання потужності було максимум на межі метал-діелектрик.



а) – розраховані та вимірні спектри пропускання та відбиття для трьох виготовлених пристроїв показують RGB у режимі передачі, та СМУ у режимі відбиття; б) – розраховані та вимірні спектри зображення широкосмугових поглиначів видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів, реалізованих за допомогою планарних наночарових пакетів; в) – демонстрація інваріантності від 0 до 65° кута огляду для виготовленого оптичного резонатора з використанням оптичних зображень

Рисунок 1.2 – Розраховані та вимірні спектри пропускання та відбиття

У оптичних фільтрах ширина металевих шарів зменшена, а продуктивність пристрою перевіряється шляхом зміни ширини шару, протилежного світлу –

ударний шар. Спостерігався режим витоку з порожнини через малу ширину шару на кінці передачі. Крім залежності оптичних фільтрів від кута падіння, також враховуються режими поляризації джерела світла. Помічено, що пристрій більш чутливий до р-поляризованого режиму, ніж до поляризованого режиму, і показали інваріантність кута до  $60^\circ$ . Результати вимірювань показали 97% інтенсивності поглинання для суперпоглиначів із повною шириною на половині максимуму (FWHM) 8 нм. Подібним чином оптичні фільтри пропускання досягли понад 60% пропускання у видимій області. Хоча вищезазначені приклади показали видатні результати, вони страждають від високого рівня втрати через наявність металу [12, 40]. Отже, CMOS – сумісні діелектричні матеріали з високим показником заломлення [41] можуть бути корисним для зменшення втрат і низької кутової дисперсії.

Було запропоновано ультратонкий дизайн (менш ніж чверть довжини хвилі світла) де асиметричний резонатор FP є високопоглинаючим германієм (Ge) на оптично товстому шарі золота (Au) [44]. Отримані результати показали максимальне поглинання через мінімальну передачу в поверхню золота.

Оскільки Ge має високі втрати та низький показник заломлення порівняно з Si, особливо його аморфною фазою – ( $\alpha$ -Si), яка виявилася кращою. Крім того, високий показник заломлення дозволяє незмінність кута падіння, дослідники схиляються до матеріалу з високими показниками заломлення. Надійне відбивання спектра з високою чистотою кольору та кутовою інваріантністю  $\pm 65^\circ$  демонструється кутовим фільтром з використанням сильних резонансних ефектів в оптичному резонаторі FP, що містить середовище з втратами [43] (рисунок 1.2 С). Цей фільтр чудово набуває покращеної насиченості кольору завдяки вибору  $\alpha$ -Si, який має нижчу комплексну діелектричну проникність.

Через низьке поглинання та високу відбивну здатність Ag його було використано як металевий шар. Верхній тонший металевий шар (18 нм) дозволяв падаючому світлу проходити крізь структуру й одночасно забезпечувати посилене відбиття від резонансної порожнини; однак нижній Ag – шар оптично щільний, введений для блокування прохідного світла. Органічний шар,

виготовлений з перилентетракарбоксихільного біс-бензімідазолу (PTCBI), використовується для підтвердження навіть тонкої плівки Ag, яка мінімізує розсіювання.

CMOS-сумісний ультратонкий оптичний фільтр, що містить  $\alpha$ -Si, нанесений на оптично непрозору тонку поверхню алюмінієва плівка була продемонстрована як субтрактивний оптичний фільтр [45]. Повідомлена кутова нечутливість становить до 60%. Подібним чином, нанорезонатор, що містить  $\alpha$ -Si між двома шарами Ag, показав кут нечутливість до 65° і низьке значення FWHM приблизно 74 нм у режимі відбиття [43, 46]. Гнучкі ширококутні трансмісійні структурні кольори з високою насиченістю та ефективністю були розроблені з використанням резонансів з кількома порожнинами [46]. Конструкція складається з стопки чергуються Сульфід цинку (ZnS) як діелектричний шар і тонкі металеві (Ag) плівки. Високий показник заломлення шар діелектрика допускає незмінність кута 70°. Конструкція була додатково покрита тонким шаром ZnS як антивідблиск (AR) з обох кінців (тобто зверху та знизу), що додатково покращує колір ефективність. При виготовленні пристрою використовувалося просте випаровування електронним променем для осадження шарів. Щоб уникнути точного осадження тонкого металевого шару та AR-покриття, за допомогою якого дизайн було вдосконалено використання багатшарової напівпрозорої структури для придушення FP-резонансів вищого порядку [47]. Конструкція FP складається з прозорого ZnS, затиснутого між тонким металевим шаром Ag і має накладку вгорі для фазової компенсації. Порожнина розроблена для FP-резонансу 3-го порядку, що корисно для отримання гарної якості кольору. Однак резонанс 5-го порядку пригнічується використовуючи тонкий шар матеріалу з втратами (Ge) у центрі порожнини ZnS. Інваріантність кута 60° було повідомлено зі значенням FWHM лише 36 нм.

Повідомляється, що при використанні хрому (Cr) як металевого дзеркала та SiO<sub>2</sub> як діелектричний шар [48]. Результати показали допуск кута  $\pm 60^\circ$  з поляризацією незалежність. Подібним чином була досягнута кутова нечутливість до 50° [49] у кольорі відбиття фільтрація з простим осадженням

багатошарової плівки. Він складається з матеріалу a-Si з втратами як діелектрика затиснутий тонкою плівкою Cr і товстим шаром срібла – Ag. Срібло – Ag у нижній частині стека дозволяє найнижчий поглинання матеріалу та найвища відбивна здатність у видимому режимі. Подібним чином Cr використовується як частковий відбивне дзеркало і поглинаючий шар. Верхній шар TiO<sub>2</sub> використовується як ефективний антивідблиск шар на хромовану плівку, а отже, допомагає покращити насиченість кольору.

Асиметричний відбиваючий оптичний фільтр на основі FP був продемонстрований [50]. Він використовував метал без втрат тонка плівка нікелю (Ni) як антиблікове покриття на верхній частині порожнини з товстим шаром Al на базі, яка допускала нульову передачу. Діелектрик складався з матеріалу без втрат SiO<sub>2</sub>. Ширина Прокладка між Ni та Al дозволяла поглинання або відображення кольору у видимому режимі. Повідомлена інваріантність колірної чутливості становить до 60° з просторовою роздільною здатністю до 50000 dpi. Хоча [49, 50] показали багатообіцяючі результати, управління тонкими металами з втратами потребує спеціального лікування. Нещодавно широкосмуговий поглинач світла був побудований з поглинаючою здатністю > 95% у видимій області шляхом використання термічно випареного шару сріблв – Ag і золота – Au [42] (рисунок 1.2 В), які демонструють різні показники заломлення від основного значення [51]. Проте кутова інваріантність була високою, тобто до 30°.

Підсумок усіх повідомлених робіт щодо продуктивності FP – порожнини наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Підсумок усіх повідомлених робіт щодо продуктивності FP – порожнини

Інваріантність кута (°)	Напівширина (нм)	Результат	ККД (%)	Посилання
12	100	передача	60	[38]
70	74	передача + відображення	-	[12]
60	8	передача + поглинання	97 (поглинання) 60 (передача)	[39]
60	-	відображення	-	[44]
±65	74	відображення	-	[43]
60	70	поглинання	-	[45]
65	100	відображення	80	[46]
70	-	передача	70	[46]
60	36	передача	54	[47]
±60	-	поглинання	99,58	[48]
50	-	відображення	-	[49]
60	-	відображення	90	[50]
30	-	поглинання	95	[42]

Де, (-) – не дано або не вдалося зробити.

## 2 ПЛАЗМОНИ

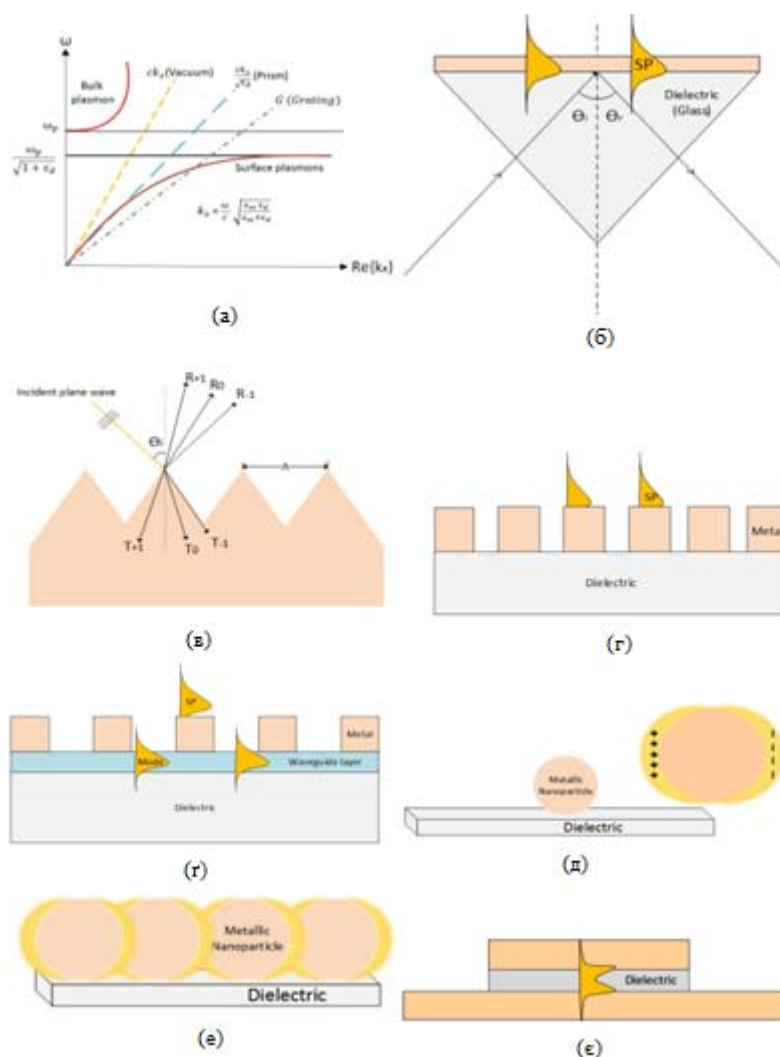
Плазмон — це квант плазмового коливання. Виникнення плазмонів відноситься до Римської імперії IV століття нашої ери; Кубок Лікурга є одним із відомих прикладів плазмонів. Вона містить наночастинки золота на склі та фільтрує різні (кольори) довжини хвилі у відображенні (зелений) і режим трансмісії (червоний).

З моменту свого створення плазмони були реалізовані для багатьох застосувань, таких як світло випромінювальні діоди (LED), біосенсори, лазерна абляція, сонячні елементи, нанолазери, поверхнево-розширена раманівська спектроскопія (SERS), хвилеводи, та літографія.

### 2.1 Поверхневі плазмонні поляритони

Поверхневі плазмони являють собою коливання електронної густини відносно фіксованих іонів. локалізуються на поверхнях металевих конструкцій. Індукція поверхневого заряду супроводжується електромагнітними коливаннями і відома як поверхневі плазмонні поляритони (SPP), де поляритони стосуються до зв'язаних коливань заряджених частинок і електромагнітних хвиль. Так само SPP здатні до руху вздовж поверхні розділу двох матеріалів, що мають негативну та позитивну діелектричну проникність, тобто межа розділу метал-діелектрик. Крім того, поверхневий плазмонний резонанс (SPR) є резонансним збудженням електронів провідності, стимульованих через падаючі електромагнітні хвилі на межі метал-діелектрик.

На рисунку 2.1 показано різні способи генерації плазмонів. Як показано на рисунку 2.1 а, SPR, що генеруються на межі розділу діелектрик-метал, не мають достатнього імпульсу (порівняно зі світлом) для поширення вздовж границі розділу.



а) – дисперсійне відношення поверхневих плазмонів порівняно зі світлом у вакуумі та в діелектричному середовищі; б) – падаюче світло на скляну призму з золотим напленням на одній з граней; в) – дифракційна решітка з періодом  $\Lambda$ ; г) – дифракційна решітка зі змінним показником заломлення та шляхом падаючого світла; ґ) – резонанси керованої моди (GMR); д) – реакція окремої наночастинки на діелектрику на падаюче світло; е) – показує реакцію решітки наночастинок на кут падіння; є) – ГСП резонанс, особливий вид FP – каверна з тонкою діелектричною плівкою і однією металевою усіченою плівкою зверху

Рисунок 2.1 – Способи генерації плазмонів

Тому застосовуються різні способи узгодження імпульсу, наприклад, призми (рисунок 2.1 б), які також називають конфігурацією Отто, та металеві ґратки з періодом  $\Lambda$ . Ґратки відбивають з періодом  $\Lambda$  відбивають і пропускають світло в різних режимах дифракції, як показано на рисунку 2.1 в. Аналогічно, як видно з рисунка 2.1 г, змінюючи показники заломлення і шлях падаючого світла, а також вводячи хвилевід між періодичною решіткою і підкладкою, що призводить до резонансів керованої моди (GMR), як показано на рисунку 2.1 е. Крім того, локалізація SPR досягається, коли світло падає на Металеві наночастинки на діелектричній підкладці, як показано на рисунку 2.1 є. Більше того, результати можуть бути можна покращити, збільшивши кількість наночастинок у вигляді решітки, що призводить до з'єднання всіх локалізованих поверхневих плазмонів, зумовлених кожною металевою наночастинкою у решітці. Продемонстровано ефект збільшення кількості MNP продемонстровано на рисунку 2.1 є. Нарешті, щілинний приповерхневий плазмон (ППП) може генеруватися в діелектричному проміжку між усіченим і подовженим металевими шарами, як показано на рисунку 2.1 є.

2.1.1 Конфігурація Отто. На рисунку 2.1 б показана базова установка конфігурації Отто, де призма складається з шару золота (Au) на одній з її прямокутних граней.

Коли когерентна світлова хвиля падає на скло/метал (зазвичай Au) під кутом  $\theta$  і більшим за критичний кут  $\theta_c(\arcsin(\sqrt{\varepsilon_m/\varepsilon_d}))$ , де  $\varepsilon_d$  та  $\varepsilon_m$  – діелектричні діелектричні проникності скла і металу відповідно, і задовольняються умови  $\varepsilon_d > \varepsilon_m$ , і світло повністю відбивається назад назад у скло. Однак електричне поле, що поширюється вздовж напрямку  $x$  з амплітудою експоненціально затухає вдалині від межі розділу фаз і являє собою евалюаційну хвилю. Аналогічно, електричне поле пов'язане з СЕС, має вигляд:

$$E_j = (E_x^i, 0, E_z^j) \exp\{i(k_{spp}px - \omega t)\} \exp(-\alpha_j |z|), \quad (2.1)$$

де  $j$  –  $m$  для металу і  $d$  для діелектрика відповідно.

Слід зазначити, що SPP можна збуджувати лише р-поляризованим світлом р-поляризованим світлом, тобто поперечною магнітною (ТМ) модою, що поширюється вздовж межі поділу метал/діелектрик з амплітудним спадом з обох боків. Дисперсійна формула SPP має вигляд:

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon(\omega) \cdot \varepsilon_m}{\varepsilon(\omega) + \varepsilon_m}}, \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon(\omega)$  – діелектрична функція металу.

$\alpha_j$  – реальна частина  $\varepsilon_j$ , та має вигляд:

$$\alpha_d = \frac{\omega}{c} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{\varepsilon(\omega) + \varepsilon_m}}, \quad (2.3)$$

$$\alpha_m = \frac{\omega}{c} \cdot \frac{\varepsilon(\omega)}{\sqrt{\varepsilon(\omega) + \varepsilon_m}}. \quad (2.4)$$

У взаємодії металів зі світлом на оптичних частотах діелектрична проникність часто є комплексним числом через поведінку вільних електронів. Дійсна частина  $\varepsilon_m$ ,  $\alpha_m$  визначає частину діелектричної проникності, яка не передбачає втрати або поглинання енергії та відіграє вирішальну роль у визначенні дисперсійного відношення SPP, яке визначає його характеристики розповсюдження. Він впливає на хвильовий вектор SPP ( $k$ ), впливаючи на його довжину хвилі та довжину поширення.

Хоча використання призми для генерації SPR на межі поділу метал-діелектрик є перешкодою для її мініатюризації, її використовують у біосенсорах завдяки простоті конструкції та чутливості до зміни показника заломлення, спричиненої показника заломлення, спричиненої адсорбцією або десорбцією молекул на її поверхні. З іншого боку, решітчасті SPR широко досліджуються завдяки можливості їх мініатюризації та широкому спектру застосувань, таких як біосенсорика, сонячні батареї, спектральна візуалізація і кольорова фільтрація.

2.1.2 Одновимірна – 1D дифракційна решітка. Решітчасті SPR дозволяють зв'язати падаюче світло з SPP через решітку, де умови резонансу досягаються за рахунок дифузії падаючого світла. Умови резонансу досягаються за рахунок дифракції падаючого світла.

Коли плоска хвиля монохроматичного світла з довжиною хвилі  $\lambda$  падає під кутом  $\theta_i$  на періодично гофрований матеріал з періодичністю  $\Lambda$ , світло дифрагує в прямому (пропускання) і назад (відбиття), як показано на рисунку 2.1 с. Дисперсійне співвідношення для ґратчастого зв'язку для подолання невідповідності імпульсів між енергією фотона, що падає, і генерованої електромагнітної хвилі. електромагнітних хвиль, що генеруються, має вигляд:

$$k_{spp} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_m \cdot \sin^2 \theta_i} \pm m \cdot G, \quad (2.5)$$

де  $m$  – порядок дифракції;

$G = 2\pi/\Lambda$  зворотна ґратка з періодом  $\Lambda$ .

Одномірна дифракційна решітка вздовж хвилеводної пластини (пластина матеріалу між двома матеріалами з меншими показниками заломлення, що утворюють хвилевід) називається хвилеводним модовим зв'язком. Умови резонансу виконуються, коли кут дифрагованої моди падаючого світла збігається з кутом падаючого світла збігається з кутом падаючої хвилі (рисунок 2.1 е). Ці хвилі просочуються крізь решітки, і інтерференція просочених і дифрагованих хвиль створює відгук фільтра, як показано на рисунку 2.1 е.

Каплан та ін. продемонстрували високоефективний кольоровий фільтр на основі хвилеводного з'єднувача з регульованою смугою пропускання [33]. Він складався з хвилеводного шару (нітрид кремнію) між шаром з низьким показником заломлення шаром з низьким показником заломлення, тобто діоксидом кремнію ( $\text{SiO}_2$ ). Металева решітка була реалізована на буферному шарі на рівні стеку (буферний шар/хвилевідний шар/підкладка) з використанням методу наноімпринтної літографії (NIL).

Джерело падаючого світла з боку решітки було налаштоване на ТМ поляризацію з нульовим кутом падіння. Довжина хвилі світла, що пропускається, залежала від періоду решітки, а смуга пропускання можна було регулювати, змінюючи товщину буфера, що давало змогу налаштовувати колір, змінюючи фізичного розміру пристрою. Хоча отримані результати показали передачу до 90%, з регульованою смугою пропускання, вона була дуже чутливою до кута нахилу.

Аналогічно було досліджено ультратонку структуру GMR метал (Al)-діелектрик ( $\text{TiO}_2$ ) [93]. Оптичний тонкий шар Al був сформований за допомогою електронно-променевої літографії як плакування на діелектричному направляючому шарі. В результаті стала можливою кольорова фільтрація завдяки виникненню хвилі падіння та витікання напрямлених мод шару  $\text{TiO}_2$ . Результати показали смугу пропускання 60, 70 і 90 нм для синього, зеленого і червоного для синього, зеленого і червоного відповідно, з ефективністю передачі до 73%, але з кутовою дисперсією. В іншому дослідженні вплив матеріалу серцевини при контрасті низького показника заломлення був реалізований з використанням  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в якості серцевини з ультратонкою алюмінієвою решіткою [34]. Такий контраст дозволив отримати SPR на довжині хвилі релеєвської аномалії [35]. Результати виявилися досить багатообіцяючими – 80% ефективності та приблизно 20 нм смуга пропускання. Пристрій було виготовлено з використанням звичайного процесу зняття за допомогою лазерної інтерференційної літографії. Однак конструкція демонструвала кутову чутливість.

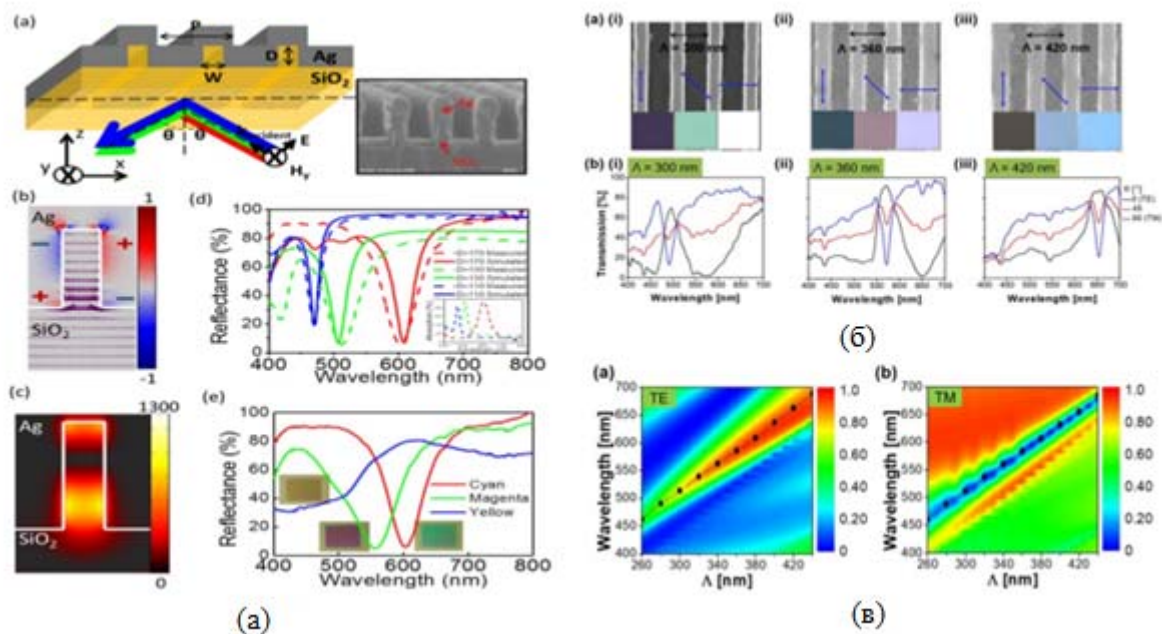
З іншого боку, кутова чутливість 1D решітки стала корисною в діелектричній конструкції резонансного кольорового фільтра з керованим режимом і можливістю регулювання кута для адитивних кольорових фільтрів. Він показав ефективність приблизно 94%, 96% і 99% з зеленим і червоним кольоровими фільтрами, відповідно. Розроблена решітка з нітриду кремнію була нанесена на скляну підкладку за допомогою УФ-лазерної інтерферометричної літографії за допомогою УФ-лазерної інтерферометричної літографії.

Повідомляється, що ширина смуги пропускання пікселів становила 12 нм. Аналогічно, Koirala та ін. [36] представили високоефективний поляризаційно-керований структурний кольоровий фільтр на основі ультратонкої 1D резонансної Al на основі тонкої резонансної гратчастої структури з нітридом кремнію в якості керованого шару. Було запропоновано, що 0,5 робочого циклу (необхідний для виконання резонансної умови керованої моди) дозволяє пропускання в режимах TE і TM.

Наскільки нам відомо, це перший випадок, коли таке налаштування було використано в режимі передачі режимі передачі. Таку ж конструкцію було використано при заміні алюмінієвої решітки на решітку з гідрованого аморфного кремнію (H: $\alpha$ -Si). кремнію (H: $\alpha$ -Si) у повністю діелектричній поляризаційно адаптованій трансрефлекторній структурній багатоколірній пікселів [37]. Вона показала ефективність передачі 95% і 90% в режимі TM і TE, відповідно (рисунок 2.2 A, C); однак, допуск на кут покращився до 35°. Подібні результати були досягнуті за допомогою Al з щілинами, заповненими діелектриком (SiO<sub>2</sub>), що дозволило підвищити EOT для режиму TE, за рахунок використання ГМР. отже, SPR відповідають за EOT в режимі TM. Далі решітки покриті тонким шаром решітки додатково покриті тонким шаром SiO<sub>2</sub>, що покращило роботу пристрою. Хоча інтенсивність кольору в TE покращилася, збільшення смуги пропускання призвело до низької насиченості кольору. Крім того, пристрій залишився чутливим до кута нахилу.

У роботі [38] запропоновано плазмовий субтрактивний кольоровий фільтр з високим коефіцієнтом пропускання. Бажані результати були досягнуті завдяки використанню контрінтуїтивного явища надзвичайно низької передачі (ELT). Було виготовлено оптично тонку плівку срібла (Ag) з візерунком з 1D нанограток для досягнення субтрактивного кольору. Долина пропускання, з ефективністю від 60 до 70%, може бути налаштована в усьому видимому діапазоні видимому діапазоні, змінюючи періодичність розташування срібних решіток. Крім того, ця конструкція здатна фільтрувати субтрактивний колір лише з кількома

наноцілинами, близькими до оптичної дифракційної межі ( $\lambda/2$ , тобто, від 200 до 350 нм).



а) – схема плазмонної нанокаверни разом із виготовленим пристроєм. Розподіл заряду і напрямок вектора Пойнтінга показано за допомогою симулятора. Показано вплив розміру наноцілин на спектри відбиття показано теоретично та експериментально, а також результати для кольорів СМУ; б) – зображення за допомогою растрового електронного мікроскопа (РЕМ) виготовлених багатоколірних пікселів та їхні спектри відбиття багатоколірних пікселів та їхнє спектральне пропускання. Камерне зображення отриманого яскравого кольору показує його залежність від періоду ґратки і кута поляризації; в) – верифікація ГМР для ТЕ і ТМ спектрів пропускання мод

Рисунок 2.2 – Схема плазмонної нанокаверни

Залежність кольорових фільтрів на основі ГМР від дисперсії кута падіння світла та напрямку поляризації була предметом занепокоєння. Симетрична двовимірна решітка симетрична двовимірна решітка, 2D-версія [33], вирішила

проблеми, з якими зіткнулися у вищезгаданих прикладах. Поляризаційно-незалежна смугова фільтрація незалежна смугова фільтрація стала можливою завдяки GMR між ортогонально дифракційними хвилями, як у режимі TE, так і в режимі TM. Зміна піку ґратки призводила до зміни центральної частоти. Представлена конструкція демонструвала смугу пропускання 13, 14 і 17 нм для синього, зеленого і червоного кольорів. червоного кольорів. При цьому ефективність залишається постійною на рівні 85%. Крім того, етапи виготовлення включали електронно-променеву літографію та сухе травлення. Аналогічно, 2D-версія генерувала широку поляризаційну контрольовану кольорову гаму.

Кольорові фільтри на основі одномірної дифракції допускають небажану кутову чутливість у результатах. Хоча виготовлення кутових нанорезонаторів вимагає більшої кількості етапів виготовлення і передових технологій, вони виявляються кращим варіантом з точки зору продуктивності, наприклад, кута поляризації технології, це кращий варіант з точки зору його характеристик, наприклад, кута поляризації та кутова нечутливість.

Нещодавно дифракційні ґратки вивчали як хвильові сповільнювачі - здатні змінювати напрямок поляризації світла. Чотирьох кратна фільтрація кольору була досягнута у видимій області за рахунок використання плазмонного фазового сповільнювача (PPR). Він складався з періодичного масиву срібних нанодротів, які підтримували Локалізовані поверхневі плазмонні резонанси (LSPRs), які можуть викликати сильний фазовий зсув для TM або TE режиму. Таким чином, за допомогою безбарвного аналітичного поляризатора можна було отримати чотири різні кольори з одного виготовленого пристрою.

## 2.2 Локалізовані поверхневі плазмонічні резонанси

Локалізований поверхневий плазмонний резонанс включає комбіноване коливання MNP і пов'язане з ним коливання електромагнітного поля (рисунок 2.1 f). Резонансна довжина хвилі ( $\lambda_{res}$ ) залежить від форми, розміру, складу MNP і локального оптичного середовища частинок. Як правило, він відбувається у видимій та ближній ІЧ-області спектра для НП благородних металів (Au, Cu та Ag).

Спектральна смуга пропускання локалізованого поверхневого плазмону (LSP) становить приблизно 80~100 нм FWHM, що набагато більше, ніж спектральна ширина смуги зміни коефіцієнта відбиття SPPs, тобто 50 нм. Ця збільшена спектральна ширина може бути зменшена шляхом збільшення кількості наночастинок.

Виникнення екстраординарної оптичної передачі (ЕОП), зумовленої зв'язком поверхневих плазмонів у поверхневій решітці стало проривом. Вона отримала широке застосування, а її застосування включають доставку ліків, візуалізацію, фільтрацію кольорів, дисплеї з високою роздільною здатністю та високочутливе зондування. Оскільки дослідження в галузі плазмоніки прискорюються завдяки відкриттям нових матеріалів і методів виготовлення, цей огляд зосереджується на та оцінює ці розробки. Періодичні субхвильові наночастинки будь-якої форми, матеріалу і достатньої кількості для LSPR, поводяться з падаючим світлом так само, як електрика з атомними кристалів на субатомному рівні. У цьому розділі обговорюються та оцінюються роботи з фотонних кристалів, виконані на сьогоднішній день обговорюються і оцінюються з точки зору їхньої ефективності як кольорових фільтрів. Розділ включає нанопористі плівки, гібридні структури, метаповерхні та конструкції на основі GSP, що вивчалися до цього часу.

2.2.1 Наноотвори. Пориста металева плівка на діелектрику при збудженні джерелом білого світла призводить до виникнення ЕОП і лише пропускає світло

певної довжини хвилі ( $\lambda_{res}$ ).  $\lambda_{res}$  залежить від періодичності і геометричної діелектричної проникності металу та діелектрика відповідно.

Також  $\lambda_{res}$  залежить від розташування дірок у кристалічній решітці дірок. Аналогічно, режим роботи, тобто пропускання або відбивання структури, також залежить від форми структури, також залежить від форми наночастинок.

Локалізоване поле в нанодірках і наночастинках широко досліджується. Повідомлялося, що повідомлялося, що ЛСПР в наноотворах залежить від періодичності ґратки, однак, на нього менше впливає в масиві метаповерхонь. Аналогічно, процес виготовлення нанодірок на металевих плівках є простішим порівняно з метаповерхнями. Тим не менш, підвищення резонансної якості в наноотворах є досить складним завданням. Тому застосування перфорованої металевої плівки (зазвичай біосумісної, наприклад, Au/Ag) на діелектричному шарі обмежується біосенсорними сенсорами. З іншого боку, застосування субхвильових нанодірок не обмежується електромагнітними хвилями, теоретично доведено, що різні акустичні поглиначі в когерентних умовах можуть бути досягнуті за допомогою ефективних глибоких субхвильових дірчастих твердих пластин, таких як сталь.

Запропоновано 2D діелектричну субхвильову діелектричну решітку на основі діелектрика для підсвічування зворотного боку (BIS) КМОН-датчиків зображення (CIS). Вона складалася з гексагонального масиву наноотворів для червоного та синього кольорів, та квадратного нанорозмірного масиву для отримання зеленого кольору з кремнієвою прокладкою між шаром фотодіодів і решіткою. Пристрій був виготовлений з полі-Si матеріалів, підготовлених методом осадження  $\alpha$ -Si з подальшим високотемпературним відпалом у печі. Конструкція продемонструвала багатообіцяючі результати передачі, тобто 60–80% ефективності з кутовою інваріантністю до  $\pm 20\%$ . Висока ефективність передачі була досягнута завдяки високому показнику заломлення і низькому поглинанню  $\alpha$ -Si, що сприяло покращенню спектральних характеристик. Крім того, були досліджені отвори різної форми також були досліджені, і показали багатообіцяючі результати, а також забезпечили гнучкий механізм

налаштування. Наприклад, CMOS-сумісний поляризаційно-перемикальний масив асиметричних хрестоподібних нанодірок асиметричної форми в надтонкій плівці Al. Оптична фільтрація на основі механічних властивостей дозволила в одній конструкції кодувати два інформаційні стани кодувати два інформаційні стани, які можна декодувати, змінюючи кут поляризації падаючого білого світла. Однак максимальна ефективність передачі субтрактивних кольорів була недостатньою, тобто 14% при варіації кута падіння.

Наноотвори з еталонем FP продемонстрували ефективні результати. Чанг та ін. продемонстрували ефективний структурний фільтр для кольорового друку на основі плазмонних метаповерхонь з тонким стеклом MIM. Щоб уникнути кольорових перехресних перешкод, отвори на перфорованій плівці Ag фрезерували за допомогою фокусованого іонного пучка (FIB), у гексагональному масиві. Потім конструкцію покрили тонким прозорим полімерним шаром, ПММА. Зміна резонансна довжина хвилі –  $\lambda_{res}$  внаслідок накладання покривається геометричним регулюванням. багатобіччючі результати і дозволила отримати чисті ідеальні резонанси поглинання приблизно 90% з високою добротності. Крім того, конструкція була нечутливою до кута приблизно до  $70^\circ$ . що відповідає кутовій стійкості порожнини ФП. Однак, використання Ag в цій конструкції призвело до додаткових етапи виробництва, такі як нанесення адгезійного шару між склом і шарами Ag та PMMA, щоб уникнути окислення Ag. Нещодавно було продемонстровано ефективність передачі 60% за рахунок збільшення щільності коаксіальних отворів оптимізованого розміру в коаксіальному світловоді. оптимізованого розміру в коаксіальній гексагональній решітці (з більшими отворами) на стеку MIM Al/скло/Al [40]. Хоча конструкція демонструвала кутову інваріантність приблизно  $60^\circ$  якість кольору погіршувалася зі збільшенням збільшенням кількості коаксіальних отворів.

2.2.2 Гібридні колірні фільтри Наноотвір-Нанодиск. Кумар та ін. [39] з гібридною структурою нанодірка-нанодиск, наскільки нам відомо, були

першими, хто продемонстрував систему, здатну отримувати кольорові відбитки з яскравим полем і роздільною здатністю до дифракційної межі. до дифракційної межі (тобто 10 000 dpi).

Для отримання бажаних результатів сила розсіювання резонаторів (наночастинок) збільшували, піднімаючи їх над заднім металевим відбивачем (Ag/Au), завдяки чому світло певної довжини хвилі відбивалося назад до ока глядача. Повна палітра кольорів була отримана шляхом зміни діаметру та проміжків між нанодисками без зміни періодичності масиву. Провали у відбитому спектрі свідчили про наявність резонансу Фано, який був результатом широкого спектра наноотворів і нанодисків з гострими піками СПР. Ця робота була розширена за рахунок використання алюмінію замість Ag. Це проклало шлях до економічно ефективної і стабільної структури, порівняно з коротким терміном зберігання Ag. Його високопродуктивна літографія також дає йому перевагу над Au і Ag. Більше того, діапазон друкованих плазмових кольорів було розширено з приблизно 15 до більш ніж 300 кольорів шляхом просторового змішування і регулювання нанорозмірних інтервалів дискретних наноструктур на основі алюмінію (рисунок 2.3 а, б).

Нещодавно просторову роздільну здатність приблизно 141 000 dpi з широкою гамою і великим кутом інваріантом була досягнута шляхом реалізації кругових гібридних наноструктурних масивів «нанодірка-нанодиск» на основі незв'язаних локалізованих поверхневих плазмонних поляритонів (LSPP) [41] (рисунок 2.3 в). Значення  $\lambda_{res}$  у видимому діапазоні змінюється скоріше за рахунок зміни діаметра нанодиск-нанодіркової структури, ніж її періодичністю.

Таким чином, окремий нанодиск-нанодірка може працювати як окремий піксель, що призводить до субдифракційної граничної роздільної здатності. Результати включали як теоретичні, так і експериментальні результати для субтрактивних кольорів.

Ультратонкий гексагональний масив гібридної структури нанодиск-нанодірка згенерував широку гаму кольорів, високу яскравість кольору та поляризаційно незалежні субтрактивні кольори з роздільною здатністю 77 000



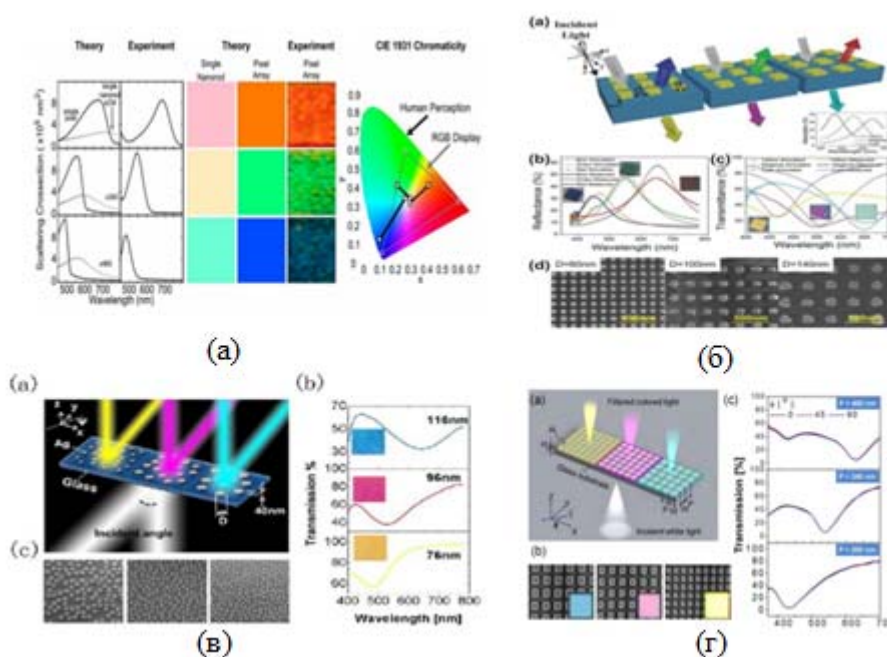
сторони масивів наноотворів, кольорів у всьому видимому діапазоні, з можливістю налаштування яскравості, відтінку і насиченості, а також щільності пікселів 12 700 точок на дюйм. Однак відфільтровані кольори були дуже насиченими.

Нечутливий до кута нахилу стійкий до подряпин гібридний дисково-дірчастий плазмовий кольоровий фільтр на основі плазмоніки був було продемонстровано з використанням шару ПММА на скляній підкладці. Для виготовлення використовувався NIL де кремнієві підкладки, що використовуються для тиснення, були виготовлені за допомогою EBL і подальшого сухого травлення. Крім того, зразки були виготовлені за допомогою гарячого тиснення та випаровування металу. Пізніше за допомогою електронно-променевого випаровування було нанесено алюміній. Гібридизація плазмонних мод завдяки нанодисків і масиву наноотворів дозволила досягти кутової нечутливості до  $60^\circ$ .

2.2.3 Метаповерхні. Метаматеріали з субхвильовою товщиною, такі як нанодиски, наносфери, нанотрубки та тонкі плівки, здатні маніпулювати хвильовим фронтом падаючого світла, змінюючи його фазу, амплітуду або кут поляризації.

Його застосування включає: маскування, маніпуляцію поляризацією маніпуляції з поляризацією, лінзи з високою роздільною здатністю і досконалі поглиначі. Ефективність метаповерхонь як кольорових фільтрів показали чудові результати; цей розділ містить звіт про роботу у цій галузі.

Було продемонстровано надтонкий масив пластин Ag на кремнеземі (рисунок 2.4 В). Ag був осаджений за допомогою магнетронного розпилення за допомогою магнетронного розпилення з наступним FIB. На  $\lambda_{res}$  впливає зміна розмірів пластинки, отже, її можна змінювати у видимому діапазоні. Структура показала кутову чутливість до  $60^\circ$  у режимах пропускання та відбивання. Кутова нечутливість пояснюється тим, що LSPR має нанорозмірну решітку. Однак, ефективність пропускання становить до 40%, а використання Ag для КМОП-пристроїв має свої недоліки.



а) – експериментальні та теоретичні результати яскравих кольорів, отриманих завдяки наностержням Al у вигляді як одиночного наностержня, так і в гексагональному масиві; б) – принципова схема нанолатки Ag на скляній підкладці з різною періодичністю, що забезпечує кутову інваріантність (до  $60^\circ$ ) адитивного та віднімаючого забарвлення. адитивну та субтрактивну кольорову фільтрацію при пропусканні та відбиванні відповідно; в) – масив двовимірних випадково розподілених срібних нанодисків на скляній підкладці з покращеною кутовою нечутливістю до  $60^\circ$  для відбитих кольорових фільтрів було продемонстровано; г) – структурна схема тонкого нанопластиру Al на скляній підкладці, ця конструкція фільтрує білий колір на окремі субтрактивні кольори, змінюючи кроку масиву

Рисунок 2.4 – Високополяризовані куточутливі CMOS-сумісні алюмінієві наностержні, розташовані в гексагональній решітці і збуджені через призму

На графіку для змодельованих та експериментальних спектрів із вставкою кольорового зображення показує отримані результати. СЕМ дає змогу зблизька

розглянути виготовлений масив нанопатчів. Схематична діаграма випадково розподілених нанодисків Ag,  $\lambda_{res}$  змінювали, змінюючи діаметр нанодисків. Спектри пропускання з кольоровим зображенням на вставці показують якість отриманого кольору. Якість кольору видно на SEM та фотографіях виготовлених фільтрів. Поляризаційна незалежність перевірена шляхом побудови спектрів відбиття під різними кутами поляризації.

Двовимірний – 2D масив непрозорих, але фізично тонких масивів Al нанопатчів на склі, продемонстрував дуже ефективну плазмову субтрактивну фільтрацію кольору, використовуючи SP-опосередковану селективну передачу через нього. Тут пропускання пригнічувалося непрозорими нанопатками замість ELT. Спектральне положення долини пропускання регулювалося за допомогою зміни періодичності нанопаток, і реалізували палітру субтрактивних кольорів (рисунок 2.4 D).

Високополяризовані куточутливі CMOS-сумісні алюмінієві наностержні, розташовані в гексагональній решітці і збуджені через призму, створювали яскраві, висококонтрастні кольори 100:1 з розміром  $25 \times 25$  мкм (рисунок 2.4 A). Тут використовується дифракційний зв'язок далекого поля для звуження смуги пропускання, а фізичні розміри наностержня дозволяють адитивно змінювати колір по всьому спектру. переналаштування кольору по всьому спектру. Однак використання призми для збудження є перешкодою для його інтеграції та мініатюризації.

Було показано масив двовимірних випадково розподілених срібних нанодисків на скляній підкладці з покращеною кутовою нечутливістю до  $60^\circ$  для відбитих кольорових фільтрів (рисунок 2.4 C). Це стало можливим завдяки відмові від гібридизованого LSPR та ізоляції нанодисків. Від'єднаний LSPR забезпечив кращу кутову чутливість порівняно зі з'єднаним LSPR. Колір налаштовували, змінюючи діаметра нанодисків, при цьому мінімальна відстань, щоб уникнути зчеплення LSPR, між нанодисками становила 80 нм. Широка серія кольорових фільтрів з кольорами від жовтого до блакитного. Показана широка серія кольорових фільтрів з кольорами від жовтого до

блакитного були виготовлені з діаметром нанодисків в межах 66 – 166 нм. Кругла форма наноструктури забезпечила поляризаційну нечутливість і показала хорошу яскравість і високий колірний контрастність у видимому діапазоні. Кутова нечутливість була додатково покращена до 70° за допомогою випадково розподілених нанодисків і наноотворів, виготовлених за допомогою водневого силісесквіоксану (HSQ) і плівок Ag на кремнієвій підкладинці. Характеристики кольорових фільтрів на основі LSPR наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики кольорових фільтрів на основі LSPR

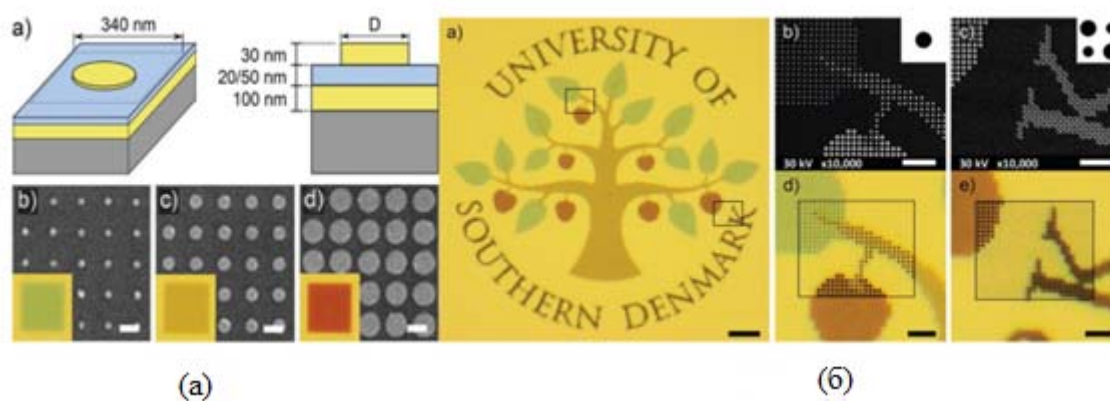
Наноотвір			
Інваріантність кута (°)	FWHM (нм)	ККД (%)	Просторова роздільна здатність (dpi)
±20	N/A	60 – 80	N/A
0	N/A	14	N/A
70	55	98	N/A
60	145	60	N/A
Нанодірковий гібрид			
N/A	N/A	N/A	100,000
±40	N/A	N/A	141,000
0	N/A	60	77000
0	N/A	N/A	127,000
60	N/A	N/A	N/A
Матова поверхня			
60	N/A	40	100,000
±8	N/A	75	100,000
60	N/A	N/A	100,000
Розривний поверхневий плазмон			
60	110	N/A	100,000
60	N/A	N/A	100,000

де N/A – нема інформації.

2.2.4 Поверхневі плаزمони. Плазмон на щілинній поверхні (GSP) – це особливий вид плазмонної метаповерхні, в якій субхвильовий діелектричний прошарок діелектричний прошарок затиснутий між оптично товстим металом і металевими субхвильовими частинками розташованими в періодичному або квазіперіодичному порядку.

Субхвильовий тонкий діелектричний прошарок посилює поле в МІМ і забезпечує ближньопольовий зв'язок між ФПП двох інтерфейсів. (рисунок 2.1 h).

Плазмовий кольоровий фільтр з субхвильовою роздільною здатністю на основі конфігурації МІМ, здатний підтримувати GSP, був продемонстрований для ефективного відображення різних кольорів у субхвильовому діапазоні (рисунок 2.5).



а) – принципова схема плазмонного наномікроскопічного зображення з круговою щілиною з високим ступенем; б) – точний кольоровий друк на оптичному мікроскопічному зображенні демонструє яскраві кольори з високим контрастом, а також демонструє, що навіть піксельні деталі забарвлені, яскраві кольори з високою контрастністю і демонструє, що навіть однопіксельні деталі є кольоровими і розрізняються

Рисунок 2.5 – Плазмовий кольоровий фільтр з субхвильовою роздільною здатністю

Тут масив з періодом 340 нм, що містить круглі щілинні плазмонні резонатори з Au/SiO<sub>2</sub> та Au, було виготовлено методом одноступеневої електронно-променевої літографії. Тут  $\lambda_{res}$  варіюється шляхом зміни діаметром нанодисків і дозволяє досягти кутової нечутливості до 60° з поляризаційною

залежністю. Крім того,  $\lambda_{res}$  не залежить від наявності покриття, що забезпечує хімічну і механічну хімічну та механічну стійкість пристрою.

Продуктивність вищезгаданого прикладу було додатково покращено за рахунок використання стеку Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al MIM у нанодискових резонаторах GSP. Тут кожен нанорезонатор розглядається як окремий елемент кольору. Таким чином, отриманий колір є ефектом поглинання кольору кожним з резонаторів у масиві. Зміна діаметра нанодиска і періодичності масиву покриває весь видимий діапазон видимому діапазоні з насиченими кольорами і темними кольорами на межі оптичної дифракції. Присутність Al робить його міцним і надійним, відкидаючи необхідність накладання, яким у цьому випадку може бути червоне зміщення  $\lambda_{res}$ .

### 3 КОЛЬОРОВИЙ ФІЛЬТР НА ОСНОВІ ДІЕЛЕКТРИКА

Згідно з теорією розсіяння, всі тіла, що розсіюють, можуть бути представлені ефективними густинами магнітної та/або електричної поляризованості. Розсіювання світла малими частинками ґрунтується на розв'язанні дифракційних задач. Розсіяне поле окремої ізольованої діелектричної сфери з радіусом  $r_0$  і відносним показником заломлення  $n$  можна розкласти в багатополосний ряд з  $2m$ -полосним членом розсіяного електричного поля розсіяного електричного поля, пропорційного до

$$a_m = \frac{n \cdot \psi_m(n \cdot x) \cdot \psi'_m(x) - \psi_m(x) \cdot \psi'_m(n \cdot x)}{n \cdot \psi_m(n \cdot x) \cdot \xi'_m(x) - \xi_m(x) \cdot \psi'_m(n \cdot x)}, \quad (3.1)$$

тоді, як  $2$ - $m$  полюсний член розсіяного магнітного поля пропорційний до

$$b_m = \frac{\psi_m(n \cdot x) \cdot \psi'_m(x) - n \cdot \psi_m(x) \cdot \psi'_m(n \cdot x)}{\psi_m(n \cdot x) \cdot \xi'_m(x) - n \cdot \xi_m(x) \cdot \psi'_m(n \cdot x)}, \quad (3.2)$$

$$x = k_0 \cdot r_0, \quad (3.3)$$

де  $k_0$  – хвильове число вільного простору;

$r_0$  – радіус магнітного поля;  $\psi_m(x)$ ,

$\xi_m(x)$  – функції Ріккати-Бесселя.

Прості числа вказують на похідність відносно аргументів. Коефіцієнт розсіяння  $a_m$  і  $b_m$  пов'язані з електричним і магнітним відгуком сфери, відповідно.

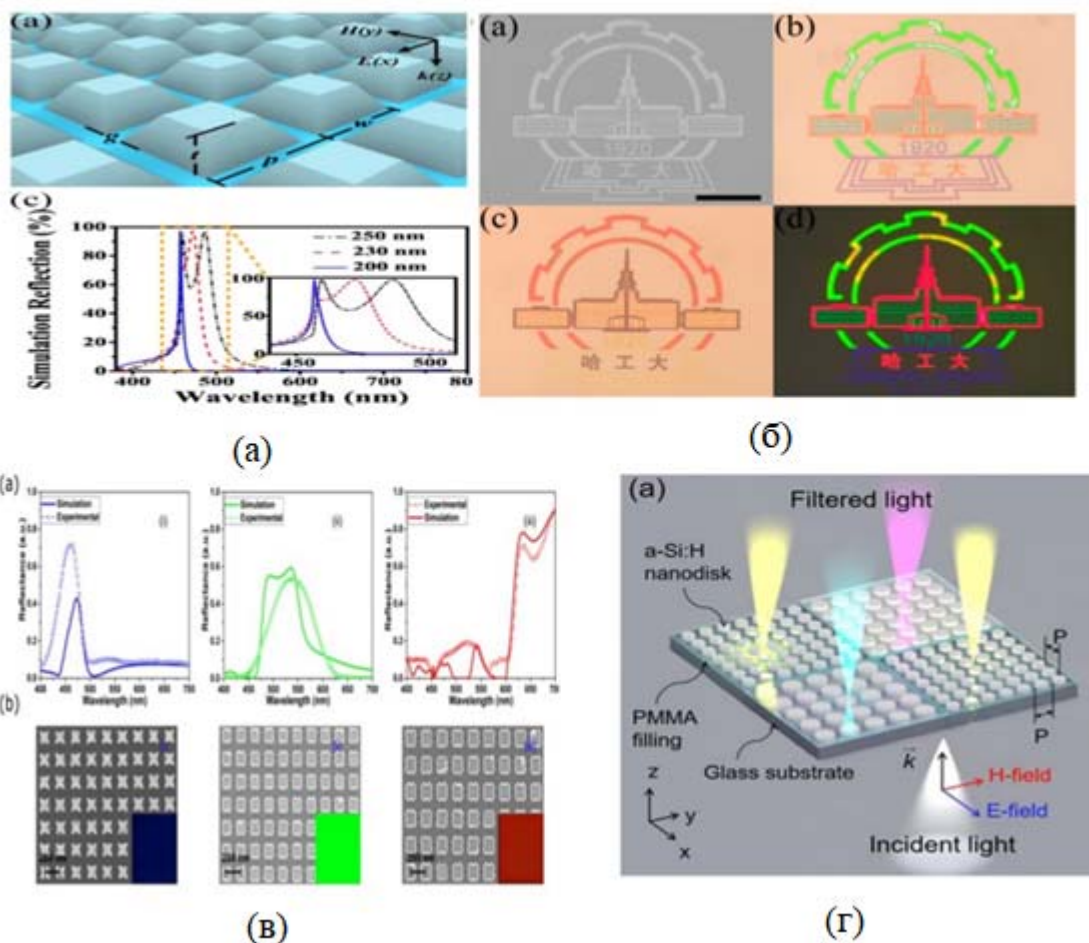
Тут перший і другий резонанси діелектричних сфер з найбільшою довжиною хвилі відповідають електричним і магнітним диполям. Діелектричні резонатори здатні концентрувати електромагнітну енергію в різних режимах зі збільшенням показника заломлення  $n$ , що призводить до підвищення

добротності і дозволяє отримати гострі Міє-резонанси в малих сферичних частинках з великою діелектричною діелектричною проникністю. Аналогічно, магнітний відгук діелектричних резонаторів у відповідь на магнітну складову зовнішніх електромагнітних хвиль має значення при реалізації метаматеріалів з від'ємним індексом з ізотропними властивостями. З іншого боку, металеві наночастинки здебільшого демонструють анізотропний оптичний магнітний відгук і схильні до значних до значних омичних втрат, які зростають зі збільшенням частоти, що робить його непридатним для сигналів з меншою довжиною хвилі, таких як синій сигналів з меншою довжиною хвилі, таких як синій колір у видимому діапазоні. Завдяки високій добротності та низьким втратам кольорові фільтри на основі діелектричних матеріалів з високою діелектричною проникністю вивчалися і демонструвалися широко вивчалися і демонструвалися.

Цей розділ включає в себе надзвичайні дослідницькі роботи, виконані в цій галузі. Повнокольоровий друк на метаповерхнях з оксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ) з трапецієподібними наноструктурами наноструктурами у формі трапеції, розташованими у квадратній решітці. Високі піки відбиття, а також яскравий контраст були отримані у всьому видимому діапазоні. Виготовлення включало типовий процес підйому процес. Використовуючи переваги резонансів Фано, відбитий колір також був досягнутий від метаповерхні  $\text{TiO}_2$  метаповерхні з набагато меншими розмірами пікселів. Таким чином, була створена яскрава, висококонтрастна структура з високою роздільною здатністю кольору (рисунок 3.1 (8) а, в).

Було помічено, що насиченість кольору для більш високої бажаної довжини хвилі погіршується через присутності резонансів Мі високого порядку (квадратична мода) на меншій довжині хвилі. Ця проблема була було вирішено шляхом використання мультидіелектричних метаповерхонь з  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$  зверху вниз на кремнеземній підкладці. Відповідність індексів між шарами дозволяє придушити багатополярні моди на нерезонансній довжині хвилі і призводить до надзвичайного посилення монохроматичності спектрів відбиття.

Він безпрецедентно розширився і отримав 171% простору  $S_{RGB}$ , 127% простору Adobe RGB та 57% простору CIE.



а) – принципова схема кольорового фільтра на основі  $TiO_2$ , спектри відбиття показують залежність фільтра від розмірів пристрою; б) – друк кольорових зображень демонструється на прикладі СЕМ-зображення логотипу зверху з пропусканням і відбиттям кольорових зображень під світловим мікроскопом; в) – результати моделювання та експериментів для адитивних кольорів всіх діелектричних метаповерхонь на основі хрестоподібних резонаторів; г) – дев'яносто відсоткові ефективні відбиваючі кольорові фільтри з гідрогенізованими нанодисками  $\alpha$ -Si у квадратній решітці

Рисунок 3.1 – Висококонтрастна структура з високою роздільною здатністю кольору

Нещодавно було висловлено припущення, що використання релеєвських аномалій на відносно короткій довжині хвилі в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (наностовпчики) на кварцових підкладках призводить до придушення вищих мод. Однак бічний кут падіння був використаний для отримання яскравих кольорів у режимах пропускання.

Хрестоподібний 2D масив нанорезонаторів на основі  $\alpha\text{-Si}$ , продемонстрований Вішалом та ін., показав поляризаційно нечутливі результати з високою якістю і широкою кольоровою гамою (рисунок 3.1 С). Високу чистоту кольорів було отримано шляхом оптимізації резонансних властивостей, які легко налаштовуються за допомогою зміни структурних параметрів. Отримана резонансна довжина хвилі додатково налаштовується шляхом зміни співвідношення сторін нанорезонаторів. Отримані результати показали поляризаційно нечутливі незалежні резонанси з високим коефіцієнтом пропускання.

Однак питання кута падіння не вдалося вирішити. Повністю діелектричні поляризаційно-залежні кольорові пікселі відбиття з субхвильовою роздільною здатністю до 85 000 dpi були продемонстровані. Тут наноблочні резонатори  $c\text{-Si}$  були розташовані у квадратній решітці, що дозволяє отримувати чіткі яскраві кольори у видимому діапазоні, змінюючи її фізичну геометрію. Результати показали, що ці окремі пікселі можна легко розрізнити в картатому візерунку, і не допускають змішування кольорів. При цьому була досягнута нечутливість до кута падіння лише  $20^\circ$ . Роздільна здатність на субхвилях була додатково покращена до 100 000 точок на дюйм завдяки використанню монокристалічних  $\text{Si}$  нанодисків-резонаторів з металевою маскою.

Це забезпечило високу роздільну здатність за рахунок послаблення взаємодію між двома резонаторами до такої міри, що навіть для пікселя, який містить один нано-резонатор, відфільтрований колір не буде змішуватися. Субтрактивний кольоровий фільтр СМУ показав високу ефективність і якість кольорів з гібридними  $a\text{-Si-Al}$  метаповерхнями нанодисків на підкладці  $\text{Si}$ .

Нанодиск підтримує режим МД-резонансу і є обмежений нанодиском завдяки нанодиску Al у верхній частині. Було зареєстровано майже нульовий провал відбиття і поширюється на видимий режим за рахунок зміни діаметра нанодисків. Однак, інваріантність кута падіння кутова інваріантність становила лише  $25^\circ$ . Результати для жовтого кольору можна покращити, якщо застосуванням прямокутної решітки, як теоретично представлено. Дев'яносто відсоткові ефективні відбиваючі кольорові фільтри з гідрогенізованими нанодисками  $\alpha$ -Si у квадратній решітці були реалізовані в роботі (рисунок 3.1 D).

Залежно від довжини хвилі характеристики фільтрації визначаються ED і MD резонансами через Mie розсіюванням Mi. Яскраві субтрактивні кольори були налаштовані шляхом зміни структурних параметрів, таких як період та радіус нанодисків.

Всі метаповерхні на основі кремнію (кремнієві наностовпчики), витравлені на скляній підкладці, були пофарбовані в діелектричний колір з періодом 1 мкм були теоретично та експериментально досліджені. Чим далі один від одного наностовпчики не піддавалися зв'язку, і кожен нанорезонатор працював як індивідуальний кольоровий фільтр, де відгук ED і MD можна налаштовувати, змінюючи співвідношення сторін кожної наночастинки.

Крім того, було запропоновано економічне рішення для широкосмугового антивідбивання через поверхні Si, текстуровані лазерним методом. Дослідження показало, що добре впорядковані нанодоти Si (SiNWs) з високим співвідношенням сторін покращують продуктивність в УФ-видимому-ІЧ діапазоні. Аналогічно, оздоблення Si MNPs також зменшує оптичне відбиття. Гібридні антивідбивні поверхні продемонстрували відбиття нижче 1%. Всі досліджені кольорові фільтри на основі розсіювання Mi, виготовлені з нанорезонаторів з високим показником заломлення узагальнено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Узагальнені характеристики кольорових фільтрів виготовлених з нанорезонаторів з високим показником заломлення

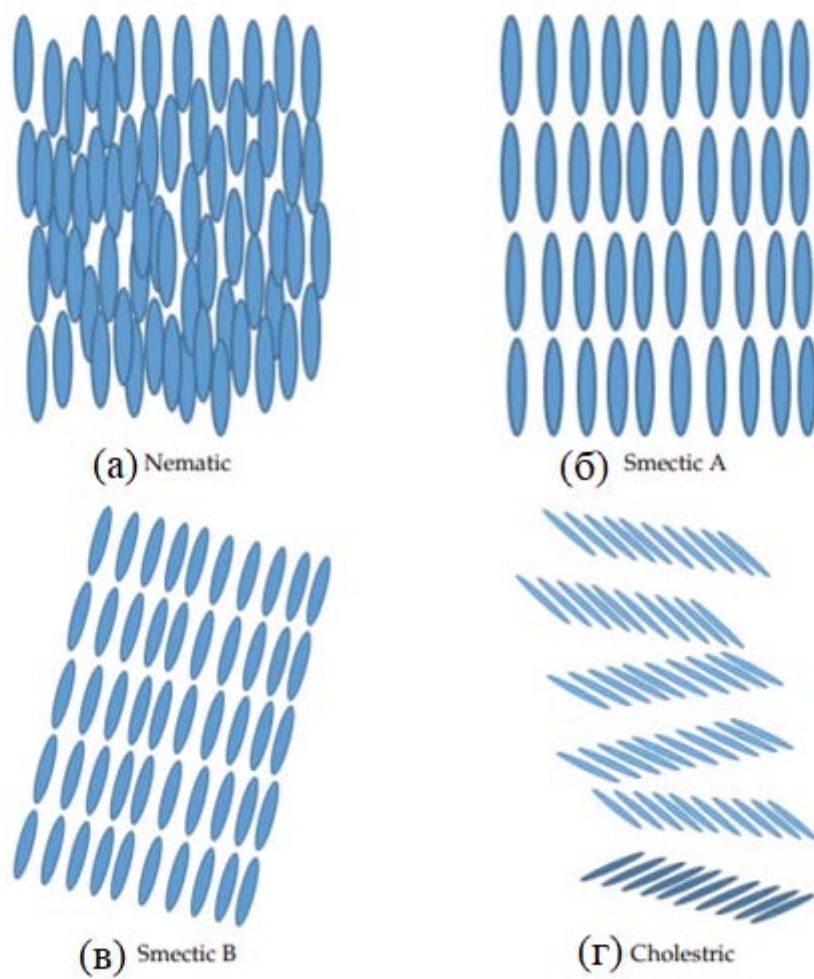
Інваріантність кута (°)	FWHM (nm)	ККД (%)	Просторова роздільна здатність (dpi)
60	30	64	16,000
20	N/A	N/A	85,000
N/A	N/A	100	100,000
26	50-60	Близ. 0	N/A
0	N/A	90	N/A
0	N/A	N/A	25,400

## 4 ПЛАЗМОННІ КОЛЬОРОВІ ФІЛЬТРИ НА ОСНОВІ РІДКИХ КРИСТАЛІВ

Рідкий кристал, з найвищим двозаломленням за показником заломлення, низьким порогом переходу між різними станами та універсальними керованими методами створення переходів, виділяється з-поміж усіх вищезгаданих видів. Крім того, великий діапазон двопронезаломлення у видимому діапазоні та ближньому інфрачервоному діапазоні, висока інфрачервоному діапазоні, висока пропускна здатність, сумісність з оптоелектронними матеріалами та гнучке керування вирівнювання рідких кристалів, тобто за допомогою світла, електрики та акустичних хвиль, робить його найкращим кандидатом. Загалом, існує три фази рідких кристалів: 1 – нематична; 2 – смектична; і 3 – холестерична.

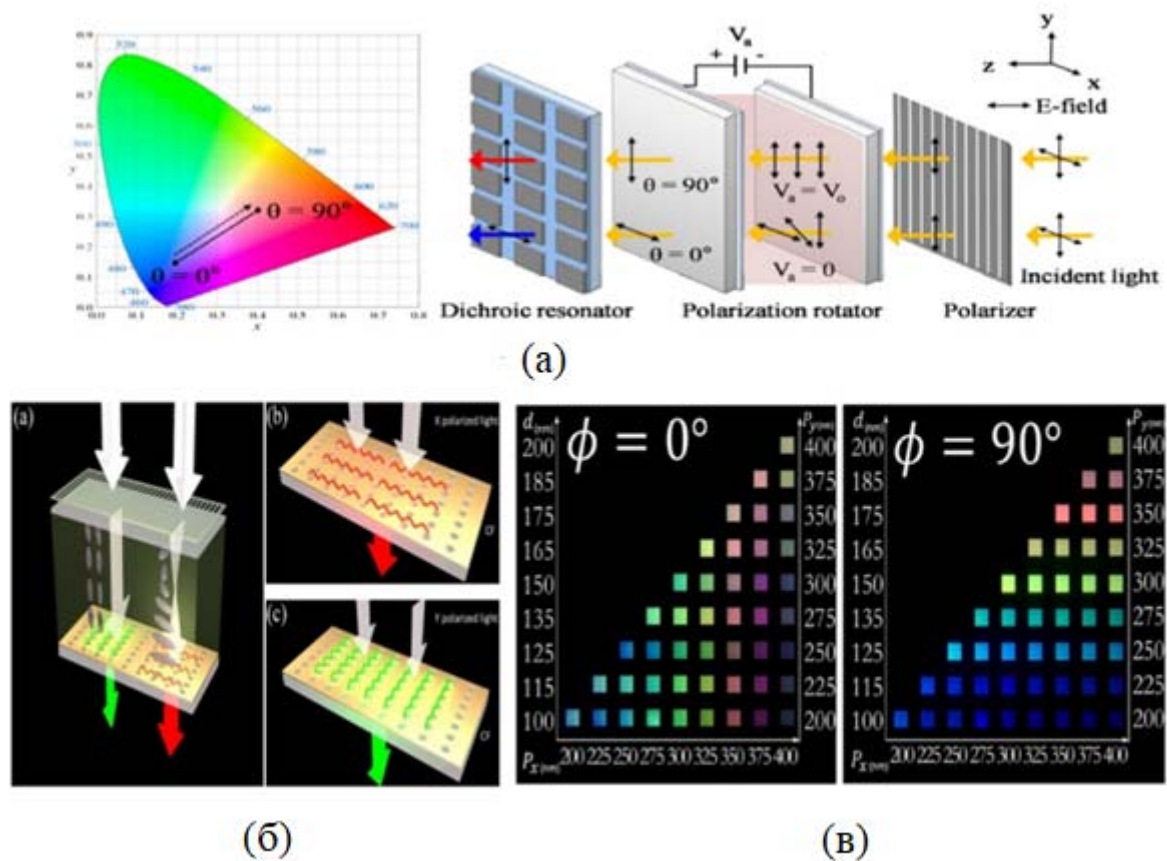
У нематичному стані (рисунок 4.1 а) молекули підкоряються лише трансляційному порядку, тоді як у смектичній фазі всі молекули мають як трансляційний, так і орієнтаційний порядок (рисунок 4.1 б, с). У холестеричній фазі, особливому різновиді нематичної фази, (рисунок 4.1 d) фаза рідини показує розподіл молекул у кількох площинах, перпендикулярних до спіральної осі. Молекулярна молекулярна хіральність визначає напрямок закручування, тобто правосторонній чи лівосторонній.

У цьому розділі розглянуто приклади останніх досліджень кольорових фільтрів на основі рідкокристалічної плазми та зроблено огляд. Високоєфективний електрично перестроюваний кольоровий фільтр з дихорними резонаторами було отримано за допомогою поляризаційного ротатора на основі РК (рисунок 4.2 А). Зміна прикладеної напруги обертала поляризацію в LC і впливала на результати від дихорних резонаторів. Дихорічні резонатори складаються з резонансу керованої моди через шар діелектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$  і дифракції, зумовленої 2D прямокутною Al-решіткою. Поляризаційний ротатор на основі LC дозволив електрично налаштувати колір у видимому діапазоні з ефективністю до видимому діапазоні з високою ефективністю аж до вузької смуги пропускання.



а) – нематична фаза; б) – фаза смектика А; в) – фаза смектика В; г) – холестерична фаза

Рисунок 4.1 – Фази рідких кристалів



а) – схема електрично перестроюваного кольорового фільтра, що використовує видимий дихронічний резонатор з підхвильовою металоелектричною резонансною структурою видимого дихроїчного резонатора з субхвильовою метало-діелектричною резонансною структурою в поєднанні з контролером поляризації на основі рідинного конденсатора; б) – принципова схема електрично перестроюваного кольорового фільтра, що використовує TN-LC і прямокутну решітку наноотворів на алюмінієвій плівці для керування поляризацією падаючого світла; в) – оптичні фотографії надрукованих кольорів у режимі ТМ і ТЕ

Рисунок 4.2 – Кольорові фільтри на основі рідких кристалів

Досліджено Al-решітку з крученим нематичним рідким кристалом (TN-LC), що інтегрує комірку, для динамічної фільтрації кольорів динамічної

кольорової фільтрації. Комірка складається з метаповерхонь Al-решітки, виготовлених на склі з оксиду індію та олова (ITO) в якості верхнього шару. Оксид індію та олова (ITO), як верхній шар. Нижня пластина складається зі скла ITO зі спіновим покриттям PMMA. TN-LC був введений за допомогою капілярної дії в проміжок між пластинами. TN-LC дозволяє змінювати поляризації падаючого світла, в той час як ця зміна може бути змінена шляхом зміни напруги на пластині, що дозволяє здійснювати електричне налаштування кольору. Ця ідея була реалізована в електрично ЛСПР з електричним перемиканням кольору на основі TN-LC (рисунок 4.2 В, С).

Тут одна з поляризаційних пластин TN-LC замінена прямокутним масивом наноотворів на основі Al плівкою на основі Al; однак як інший електрод використовували скляну підкладку, покриту оксидом індію та олова (ITO). Шари LC шари, сформовані між обома підкладками, є взаємно ортогональними для досягнення конфігурації TN-LC коли світло потрапляє на дисплей. Тут асиметричний масив наноотворів як вихідний фільтр дозволяє відображати два різні кольори в режимі TE і TM, а зміна поляризації може бути викликана подачею напруги через TN-LC.

Однак є приклади, розглянуті в цьому огляді, які самі по собі є показовими. Отже, все ще існує потреба в дослідженні матеріалів і нових технологій проектування, щоб дослідити вдосконалення існуючих конструкцій. Результати цього огляду узагальнено на рисунку 4.3. Він дає загальне порівняння ключових показників ефективності розглянутих технологій для наноструктурних кольорових фільтрів.

З цього дослідження випливає, що кольорові фільтри на основі ФП з матеріалами з втратами забезпечують високу кутову інваріантність та поляризаційну незалежність. Крім того, виготовлення порожнин з ФП вимагає простих методів осадження і є економічно вигідним; однак, маючи справу з тонкими плівками з втратами (доведено, що вони мають (доведено, що вони мають менші втрати, ніж їхні аналоги Au, Ag та Al) стає складним завданням і вимагає особливої обережності. Останнім часом для отримання відповідних

металевих показників заломлення застосовуються нові методології, такі як використання випареної форми Au/Ag тощо, які показали ефективні результати і заслуговують на подальше дослідження в майбутньому. З точки зору результатів, як правило, він має низьку якість передачі кольору та обмежену кольорову гаму та просторову роздільну здатність.

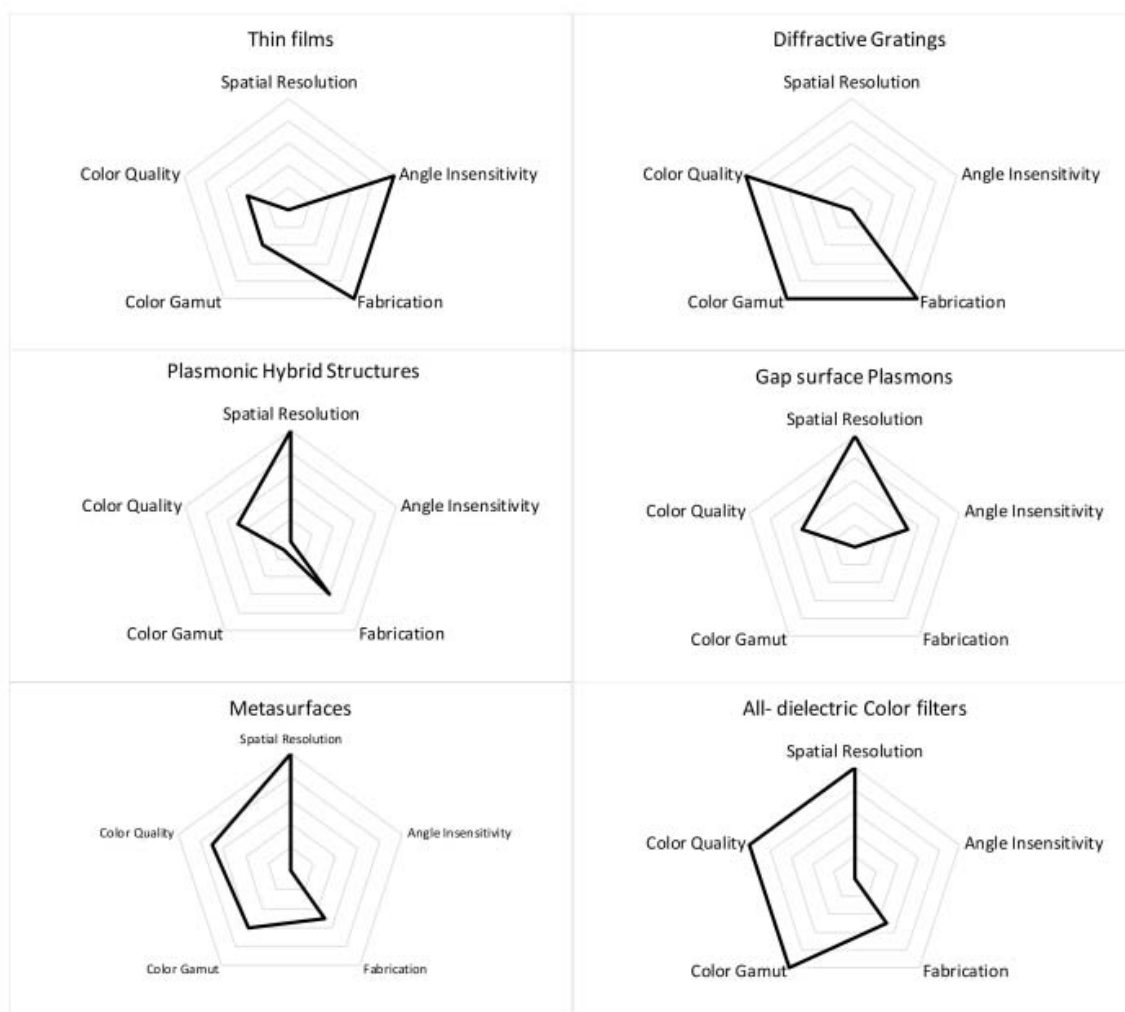


Рисунок 4.3 – Діаграми ключових показників ефективності для наноструктурних кольорових фільтрів

Незважаючи на використання благородних металів у піонерських конструкціях плазмових кольорових фільтрів, сьогодні Al віддається перевага перед Au, Cu та Ag. Ця перевага пояснюється його сумісністю з пристроями країн

СНД, довговічністю та надійністю. Крім того, алюміній є третім за поширеністю матеріалом на Землі, а також має можливості для переробки.

Загалом, структури на основі 1D решітки схильні до чутливості до кута огляду з прийнятною якістю кольорів. Аналогічно, слід зазначити, що кольорові фільтри на основі GMR забезпечують високу якість кольорів але зазвичай з низькою просторовою роздільною здатністю. Хоча вони не потребують складних етапів виготовлення, вони потребують більшої кількості решіток і займають більшу площу. Крім того, через свою асиметричну геометрію, вона суворо залежить від поляризації, але це також робить її гарним кандидатом для поляризаційних настроюваних кольорових фільтрів.

Більше того, прогрес у технологіях нановиробництва та методологіях моделювання проклав шлях до точного та контрольованого виготовлення наноструктур на основі плазмонів. Таким чином, це робить кольорові фільтри на основі плазмоніки виділяються серед своїх аналогів високим дослідницьким потенціалом. Однак сильна залежність  $\lambda_{res}$  від геометрії пристрою вимагає жорсткого контролю критичних розмірів особливо в процесі виготовлення метаповерхонь, кольорових фільтрів на основі GSP та гібридної структури нанодірка-нанодиск гібридних структур.

## ВИСНОВКИ

В ідеалі кольоровий фільтр повинен мати високу якість передачі кольору, широку гаму, інваріантність кута падіння, високу просторову роздільну здатність, сумісність з КМОП і незалежність від кута поляризації, а також високу пропускну здатність та економічно ефективні технології виготовлення. Реально, структурний кольоровий фільтр з усіма вищезгаданими якостями не існує, а заміна кольорових фільтрів на основі пігментів поки що не існує.

Другий розділ огляду присвячений активним плазмонним кольоровим фільтрам на основі LC, що дозволяє здійснювати кольорове в плазмонних структурах, що дозволяє змінювати  $\lambda_{res}$  у видимому діапазоні без жодних без зміни його розмірів. Ця методика має дослідницький потенціал. Тому рідкі кристали з великим двозаломленням, швидким перемиканням між станами та його реалізацією за допомогою ефективних конструкцій таких як гібридні структури нанодірки-нанодиски та діелектричні метаматеріали для фільтрації кольорів тощо, потребує подальшого вивчення.

З огляду на структури на основі LSPR можна зробити висновок, що наноотвори через їхню високу кутову дисперсію, низької просторової роздільної здатності та обмеженої кольорової гами, нанодірки замінюються більш досконалими структурами. Перші гібридна структура нанодірка-нанодиск, що використовує резонанс Фано, проклала шлях до просторової просторової роздільної здатності аж до дифракційної межі і стала уособленням для конструкцій, де просторова роздільна здатність більше ніж дифракційна межа або дорівнює їй. Аналогічно, метаповерхні показали кращі результати, але все ще мають нижчу кутову інваріантність завдяки LSPR, яку можна вдосконалити за допомогою нових методик. Нарешті, кольорові фільтри на основі GSP також забезпечили високу кутову інваріантність і просторову роздільну здатність з обмеженою кольоровою гамою.

Вивчено всі досліджувані кольорові фільтри на основі діелектриків з високим показником заломлення (типу  $\alpha$ -Si,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  та ін.) з нанорезонаторами. та ін.) нанорезонаторів. Він вже привернув до себе належну увагу завдяки своїй сумісності з технологією CMOS. Загалом, кольорові фільтри на основі діелектриків мають високу кутову чутливість, але пропонують високу просторову роздільну здатність завдяки високому контрасту показників заломлення нанорезонаторів та його оточення. У випадку аморфного/кристалічного кремнію вони забезпечують широке покриття гами, але поглинання кольору при меншій довжині хвилі робить його непридатним для синіх кольорів. Хоча кольорові фільтри на основі  $\text{TiO}_2$  фільтри на основі  $\text{TiO}_2$  дозволяють уникнути поглинання червоного кольору (при 650 нм), це призводить до появи режимів вищих порядків на нерезонансній довжині хвилі. Останнім часом характеристики інших діелектричних матеріалів на основі кубічних наноструктур  $\text{Si}_3\text{N}_4$  наноструктур на основі кубічного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  показали похвальну продуктивність, пригнічуючи вищі моди і покращуючи монохроматичність монохроматичності вищих резонансних довжин хвиль за рахунок використання релеєвських аномалій на коротких довжині хвилі. Отже, вказуючи на дослідницькі можливості в цій галузі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wyszecki, G.; Stiles, W.S. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 1982.
2. Bayer, B.E. *Color Imaging Array*. US Patent 3971065, 20 July 1976.
3. Meth-Cohn, O.; Smith, M. What did W. H. Perkin actually make when he oxidised aniline to obtain mauveine? *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 1* 1994, 1, 5–7.
4. Oprian, D.D.; Asenjo, A.B.; Lee, N.; Pelletier, S.L. Design, chemical synthesis, and expression of genes for the three human color vision pigments. *Biochemistry* 1991, 30, 11367–11372.
5. Meléndez-Martínez, A.J.; Britton, G.; Vicario, I.M.; Heredia, F.J. Relationship between the colour and the chemical structure of carotenoid pigments. *Food Chem.* 2007, 101, 1145–1150.
6. Hao, Z.; Iqbal, A. Some aspects of organic pigments. *Chem. Soc. Rev.* 1997, 26, 203–213.
7. Yue, W.; Gao, S.; Lee, S.; Kim, E.; Choi, D. Highly reflective subtractive color filters capitalizing on a silicon metasurface integrated with nanostructured aluminum mirrors. *Laser Photonics Rev.* 2017, 11, 1600285.
8. Wang, Y.; Zheng, M.; Ruan, Q.; Zhou, Y.; Chen, Y.; Dai, P.; Yang, Z.; Lin, Z.; Long, Y.; Li, Y. Stepwise-nanocavity-assisted transmissive color filter array microprints. *Research* 2018, 2018, 8109054.
9. Ebbesen, T.W.; Lezec, H.J.; Ghaemi, H.; Thio, T.; Wolff, P. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature* 1998, 391, 667.
10. A. Pashchenko, O. Gritsunov, O. Babichenko Energy states of particles in a quantum sized structure with a complex shaped band diagram // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries* № 4 (14), 2020 p. 176-185; (DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.176>)

11. Chou, S.Y.; Krauss, P.R.; Renstrom, P.J. Nanoimprint lithography. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.* 1996, 14, 4129–4133.
12. Park, C.S.; Shrestha, V.R.; Lee, S.S.; Choi, D.Y. Trans-reflective color filters based on a phase compensated etalon enabling adjustable color saturation. *Sci. Rep.* 2016, 6, 25496.
13. Chhowalla, M.; Teo, K.; Ducati, C.; Rupesinghe, N.; Amaratunga, G.; Ferrari, A.; Roy, D.; Robertson, J.; Milne, W. Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition. *J. Appl. Phys.* 2001, 90, 5308–5317.
14. Ghiradella, H. Light and color on the wing: Structural colors in butterflies and moths. *Appl. Opt.* 1991, 30, 3492–3500.
15. Kinoshita, S.; Yoshioka, S.; Miyazaki, J. Physics of structural colors. *Rep. Prog. Phys.* 2008, 71, 076401.
16. Zhang, K.; Tang, Y.; Meng, J.; Wang, G.; Zhou, H.; Fan, T.; Zhang, D. Polarization-sensitive color in butterfly scales: Polarization conversion from ridges with reflecting elements. *Opt. Express* 2014, 22, 27437–27450.
17. Wang, G.; Chen, X.; Liu, S.; Wong, C.; Chu, S. Mechanical chameleon through dynamic real-time plasmonic tuning. *ACS Nano* 2016, 10, 1788–1794.
18. Duan, X.; Kamin, S.; Liu, N. Dynamic plasmonic colour display. *Nat. Commun.* 2017, 8, 14606.
19. Park, C.H.; Yoon, Y.T.; Shrestha, V.R.; Park, C.S.; Lee, S.S.; Kim, E.S. Electrically tunable color filter based on a polarization-tailored nano-photonics dichroic resonator featuring an asymmetric subwavelength grating. *Opt. Express* 2013, 21, 28783–28793.
20. Song, M.; Wang, D.; Peana, S.; Choudhury, S.; Nyga, P.; Kudyshev, Z.A.; Yu, H.; Boltasseva, A.; Shalaev, V.M.; Kildishev, A.V. Colors with plasmonic nanostructures: A full-spectrum review. *Appl. Phys. Rev.* 2019, 6, 041308.
21. Lee, T.; Jang, J.; Jeong, H.; Rho, J. Plasmonic-and dielectric-based structural coloring: From fundamentals to practical applications. *Nano Converg.* 2018, 5, 1–21.

22. Nemati, A.; Wang, Q.; Hong, M.; Teng, J. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices. *Opto-Electron. Adv.* 2018, 1, 180009. 23. Yariv, A.; Yeh, P. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*; Oxford Univ.: Oxford, UK, 2006.

24. Born, M.; Wolf, E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013.

25. Bohren, C.F.; Huffman, D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2008.

26. Minas, G.; Ribeiro, J.; Martins, J.S.; Wolffenbuttel, R.; Correia, J. An array of Fabry-Perot optical-channels for biological fluids analysis. *Sens. Actuators A Phys.* 2004, 115, 362–367.

27. Minas, G.; Wolffenbuttel, R.; Correia, J. An array of highly selective Fabry-Perot optical channels for biological fluid analysis by optical absorption using a white light source for illumination. *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* 2006, 8, 272.

28. Spisser, A.; Ledantec, R.; Seassal, C.; Leclercq, J.L.; Benyattou, T.; Rondi, D.; Blondeau, R.; Guillot, G.; Viktorovitch, P. Highly selective and widely tunable 1.55- $\mu\text{m}$  InP/air-gap micromachined Fabry-Perot filter for optical communications. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 1998, 10, 1259–1261.

29. Lee, P.H.; Lan, Y.C. Plasmonic Waveguide Filters Based on Tunneling and Cavity Effects. *Plasmonics* 2010, 5, 417–422.

30. Yu, Q.; Zhou, X. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer. *Photonic Sens.* 2011, 1, 72–83.

31. Otto, A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Z. Phys. A Hadron. Nucl.* 1968, 216, 398–410.

32. Kretschmann, E.; Raether, H. Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light. *Z. Naturforschung A* 1968, 23, 2135–2136.

33. Kaplan, A.F.; Xu, T.; Jay Guo, L. High efficiency resonance-based spectrum filters with tunable transmission bandwidth fabricated using nanoimprint lithography. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 99, 143111.

34. Mazulquim, D.B.; Lee, K.J.; Yoon, J.W.; Muniz, L.V.; Borges, B.H.V.; Neto, L.G.; Magnusson, R. Efficient band-pass color filters enabled by resonant modes and plasmons near the Rayleigh anomaly. *Opt. Express* 2014, 22, 30843–30851.
35. Rayleigh, L. On the dynamical theory of gratings. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Contain. Pap. Math. Phys. Character* 1907, 79, 399–416.
36. Koirala, I.; Shrestha, V.R.; Park, C.S.; Lee, S.S.; Choi, D.Y. Polarization-controlled broad color palette based on an ultrathin one-dimensional resonant grating structure. *Sci. Rep.* 2017, 7, 40073.
37. Koirala, I.; Shrestha, V.R.; Park, C.S.; Gao, S.; Lee, S.S.; Choi, D.Y. All Dielectric Transmissive Structural Multicolor Pixel Incorporating a Resonant Grating in Hydrogenated Amorphous Silicon. *Sci. Rep.* 2017, 7, 1–7.
38. Zeng, B.; Gao, Y.; Bartoli, F.J. Ultrathin Nanostructured Metals for Highly Transmissive Plasmonic Subtractive Color Filters. *Sci. Rep.* 2013, 3, 2840.
39. Kumar, K.; Duan, H.; Hegde, R.S.; Koh, S.C.; Wei, J.N.; Yang, J.K. Printing colour at the optical diffraction limit. *Nat. Nanotechnol.* 2012, 7, 557.
40. He, X.; Liu, Y.; Beckett, P.; Uddin, H.; Nirmalathas, A.; Unnithan, R.R. Transmission enhancement in plasmonic nanohole array for colour imaging applications. In *Proceedings of the AOS Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT) and Australian Conference on Optics, Lasers, and Spectroscopy (ACOLS) 2019, Melbourne, Australia, 9–12 December 2019*; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2019; Volume 11200, p. 112003M.
41. Zhao, J.; Yu, X.; Zhou, K.; Yang, X.; Yu, Y. Wide-Gamut and Polarization-Independent Structural Color at Optical Sub-diffraction-Limit Spatial Resolution Based on Uncoupled LSPPs. *Nanoscale Res. Lett.* 2019, 14, 1–7.