

DOI: 10.35681/1560-9189.2022.24.1.262795

УДК 535.4: 621.317

**А. А. Крючин<sup>1</sup>, В. М. Рубіш<sup>1</sup>, О. В. Міца<sup>2</sup>, О. Г. Мельник<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

<sup>2</sup>Ужгородський національний університет  
вул. Університетська, 14, 88000 Ужгород, Україна

## Оптичні метаповерхні для систем формування зображень

*Представлено результати аналізу властивостей і технологій створення оптичних метаповерхонь для систем обробки та трансформації оптичних зображень. Визначено базові технології виготовлення оптичних метаповерхонь і матеріалів для створення оптичних метаповерхонь. Особливу увагу приділено аналізу методів використання активних метаповерхонь. Наведено дані про перспективність використання халькогенідних напівпровідників з фазовими переходами як матеріалів для активних метаповерхонь.*

**Ключові слова:** метаповерхні, субхвильові масиви, нанолітографія, наноструктуровані елементи, поляризація світла, субхвильові відстані.

### Вступ

Перспективною технологією створення дифракційних оптичних елементів вважається використання оптичних метаповерхонь, які складаються з наноструктурованих елементів, розташованих у субхвильових масивах. Метаповерхні при взаємодії з електромагнітним полем падаючої хвилі здатні здійснювати контроль та керування хвильового фронту електромагнітного поля, а саме аналізувати та змінювати фазу, амплітуду та поляризацію світла [1–4]. Металінзи (метаповерхні) мають багато ступенів свободи для керування хвильовим фронтом, що дає ряд переваг перед об'ємними оптичними елементами. Метаповерхні дозволяють створювати надтонкі плоскі та багатофункціональні оптичні компоненти, що дає можливість істотно зменшити розміри та складність виготовлення оптичних елементів, а також реалізовувати нові функції з обробки оптичних зображень. Виготовлення метаповерхонь базується на технологічних процесах, які використовуються у виробництві напівпровідникових нанорозмірних елементів [1, 5–7]. Метаповерхні створюють у вигляді мікрорезонаторів або «метаатомів», які дозволяють реалізувати «плоску фотоніку» в оптичних системах і нові процеси взаємодії з падаючим електромагнітним випромінюванням, які суттєво відрізняються від тих, що спостерігаються при використанні тривимірних (3D) об'ємних матеріалів [1, 6, 7].

© А. А. Крючин, В. М. Рубіш, О. В. Міца, О. Г. Мельник

Перспективність метаповерхневої оптики полягає в ефективному керуванні електромагнітними хвилями, яке не може бути реалізоване традиційною об'ємною оптикою. Метаповерхні дозволяють успішно здійснювати корекцію сферичних, хроматичних і залежних від кута падіння аберацій [4–9]. Здійснюючи просторове регулювання геометричних параметрів «метаатомів», можна керувати відбитим хвильовим фронтом або хвильовим фронтом, який пройшов крізь об'єкт [1–4].

Однією із найбільш поширених реалізацій метаповерхні є металінзи, які дозволяють без втрати продуктивності замінити об'ємні лінзи та об'єкти наноструктурованою, легкою та компактною тонкою плівкою [5, 6]. Цінність впровадження концепції метаповерхонь полягає в реалізації нових функцій, які традиційні оптичні системи не можуть реалізувати. Метаповерхні, що складаються з планарних структур, можуть бути виготовлені із використанням методів нанолітографії, у тому числі технології прямого лазерного запису на неорганічних резистах і нанодруку [4, 10, 11]. За допомогою метаповерхонь з нанорозмірних стрижнів можна зробити плоскі лінзи без хроматичної аберації у всьому оптичному діапазоні [6–8]. Метаповерхні мають великий інформаційний потенціал і можуть сприяти майбутньому розвитку високоінтегрованих мікронанооптоелектронних систем [3].

Перспективним напрямом дослідження в галузі створення метаповерхонь є активні метаповерхні, оптичні характеристики яких можна динамічно налаштовувати після виготовлення, що дозволяє значно розширити можливості дифракційної оптики. Реконфігуровані метаповерхні можуть створюватися на основі матеріалів з фазовими переходами, наприклад сплавів  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) [3]. Вивчення метаматеріалів і метаповерхонь викликає інтерес не тільки з фундаментальної точки зору, але й відкриває широкі прикладні можливості зі створення приладів для управління електромагнітним полем, включаючи нові типи електромагнітних сенсорів, компактних антен, лінз з високою роздільною здатністю, створенню об'єктів, прихованих для спостереження у певному частотному діапазоні, поляризаторів хвиль та інші [1, 4–9].

## **1. Аналіз областей застосування метаповерхонь**

Метаповерхні є узагальненим класом електромагнітних структур, що включає ґратки різних типів, частотно-селективні поверхні, високоімідансні поверхні та ін. Перевага метаповерхонь полягає в тому, що вони на декілька порядків тонші ніж звичайні оптичні елементи, такі як лінзи або хвильові пластини. Мала товщина дозволяє розробляти мініатюрні та компактні оптичні системи. Метаповерхні мають функціональні властивості об'ємних метаматеріалів, але відрізняються компактними розмірами, малими втратами, простотою виготовлення, кращим ступенем інтеграції в існуючі технології наноелектроніки. Потенційні можливості метаповерхонь включають, але не обмежуються такими властивостями як електромагнітна прозорість і можливість маскування, управління фазовим фронтом [5]. Типову структуру метаповерхні показано на рис. 1. Вона представляє собою періодичну структуру, яка складається з нанорозмірних багат шарових стрижнів, розташованих на субмікронних відстанях. Метаповерхня, наведена на рис. 1, була використана для реалізації невзаємного відбиття світла [7].

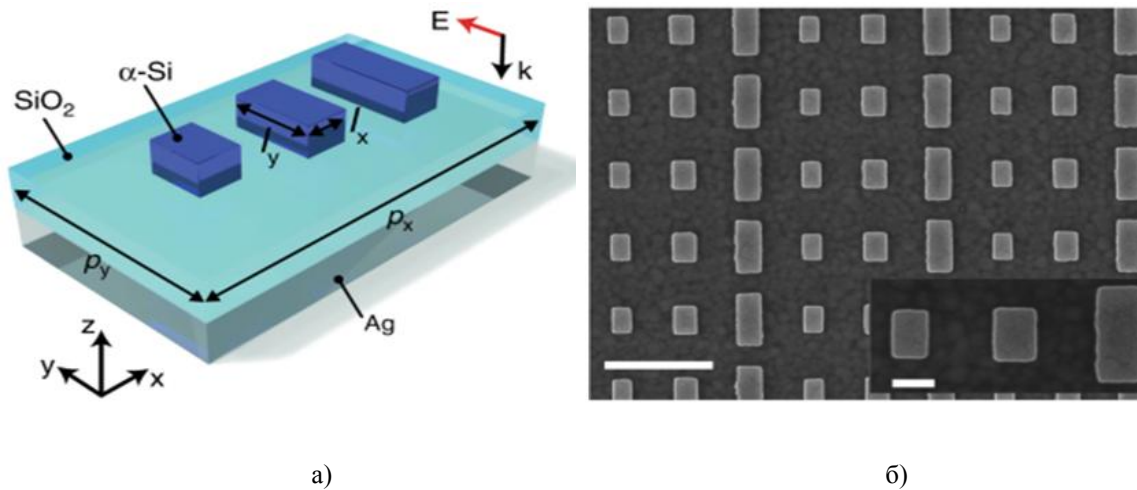


Рис. 1. Структура типової метаповерхні: а) тривимірна структура елементарної комірки метаповерхні, яка складається з трьох  $\alpha$ -Si нанострижневих антен. Товщина срібної підкладки, шару  $\text{SiO}_2$  та наноантен  $\alpha$ -Si становить 200, 50 та 150 нм, відповідно; б) зображення метаповерхні  $\alpha$ -Si, отримане методом польової емісійної скануючої електронної мікроскопії (FESEM). Масштаб на головному рисунку та на вставці становлять 1 мкм і 200 нм, відповідно [7]

### 1.1. Створення систем з надвисокою числовою апертурою з використанням метаповерхонь

Використання метаповерхонь (металінз) дозволяє значно збільшити числову апертуру (NA) оптичних систем. Найбільше збільшення апертури було досягнуто при використанні метаповерхні, виготовленої з кремнію. Один із підходів збільшення NA було реалізовано за допомогою занурення в імерсійну рідину (рис. 2, а, б). Було досягнуто значення  $NA = 1,1$  при використанні імерсійної рідини з показником заломлення  $n = 1,5$ . Такий підхід особливо вигідний для матеріалів з низьким показником заломлення, оскільки ефективність фокусування не погіршується під час занурення. Тим не менш, занурення в імерсійну рідину обмежує робочу відстань товщиною підкладки, як видно з рис. 2, а, б, а також максимальним значенням числової апертури NA, яку можна досягти. Іншою важливою ознакою для металінз з високим NA є дискретизація, яка визначається відстанню між сусідніми «метаатомами» (тобто розміром елементарної комірки) [12].

### 1.2. Використання метаповерхонь для проведення математичних обчислень

Обчислювальні метаповерхні здатні виконувати математичні операції над вхідним електромагнітним полем, впливаючи на розподіл амплітуди, фази, поляризації і частоти. Швидкий прогрес у розробці обчислювальних метаповерхонь надає виняткові можливості для оптичної обробки зображень, у тому числі створення покращеного зображення, що відкриває широкий спектр нових застосувань для розпізнавання образів у реальному часі [3]. Одним із застосувань метаповерхонь можуть стати виконання аналогових математичних обчислень [13]. Вдалося виготовити метаповерхню, що здатна здійснювати математичні операції диференціювання та інтегрування (знаходить похідні та інтеграли функцій). Своєрідний

«аналоговий комп'ютер» змінює характеристики (амплітуду та фазу) лазерного променя, який спрямовують на метаповерхню [13]. Для реалізації такої операції метаповерхня складається з масиву золотих нанострижнів, розміщених на золотій плівці, яка покрита шаром  $\text{SiO}_2$ . При підсвічуванні метаматеріалу лазерним променем з довжиною хвилі 800 нм світло збуджує поверхневі плазмони, які розповсюджуються у проміжному шарі діоксиду кремнію.

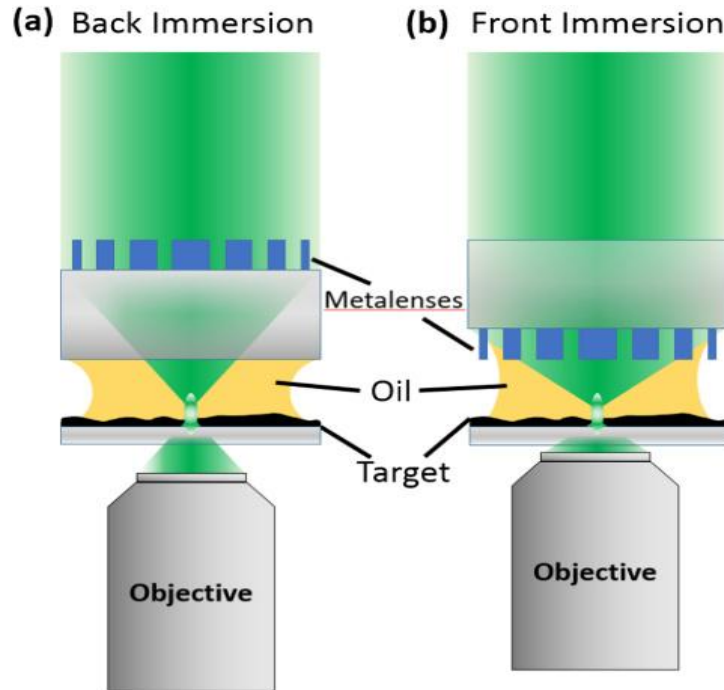


Рис. 2. Схема створення імерсійних систем з надвисокою числовою апертурою із використанням метаповерхонь [11]

### 1.3. Метаповерхні у боротьбі з підробками та створенні систем безпеки

Оптичні індикатори (OVD), як захисні елементи, широко використовуються для боротьби зі зростаючою кількістю підробок товарів і користуються величезним попитом для запобігання загрозам підробок. Метаповерхні, які створені з упорядкованих наноструктур заданої форми, можуть допомогти у вирішенні проблеми боротьби з підробками різних товарів. Це пов'язане з тим, що оптичні елементи на основі метаповерхонь можуть зберігати набагато більше інформації (>100 разів), ніж звичайні оптичні елементи (наприклад, райдужна голограма) та вибірково відображати потрібне зображення з урахуванням кута, кольору та поляризації захисного елемента. Звичайні OVD піддаються небезпеці шахрайського тиражування через досягнення в технології друку та широко поширеним методам копіювання елементів захисту. Загальний підхід до створення елементів захисту на основі метаповерхонь представлено на рис. 3 [14].

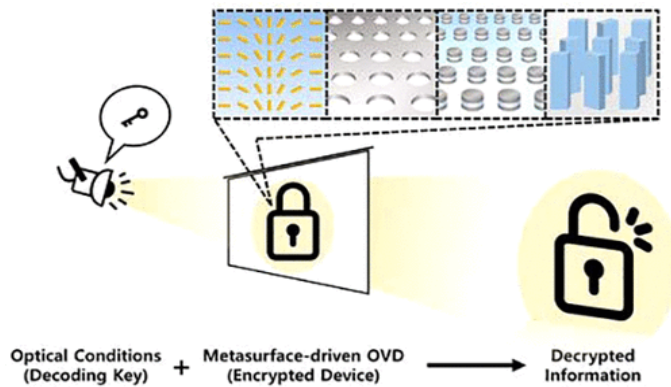


Рис. 3. Загальний підхід у використанні метаповерхонь для здійснення боротьби з підробками товарів оптичними методами[14]

#### 1.4. Створення «невзаємних» оптичних елементів

На основі метаповерхні можуть бути створені елементи, які відбивають світло під різними кутами залежно від того, з якого боку приходить падаючий промінь (рис. 4). Наноструктурований двовимірний метаматеріал здатний керувати процесом відбивання випромінювання (змінювати напрямок розповсюдження відбитого променя).

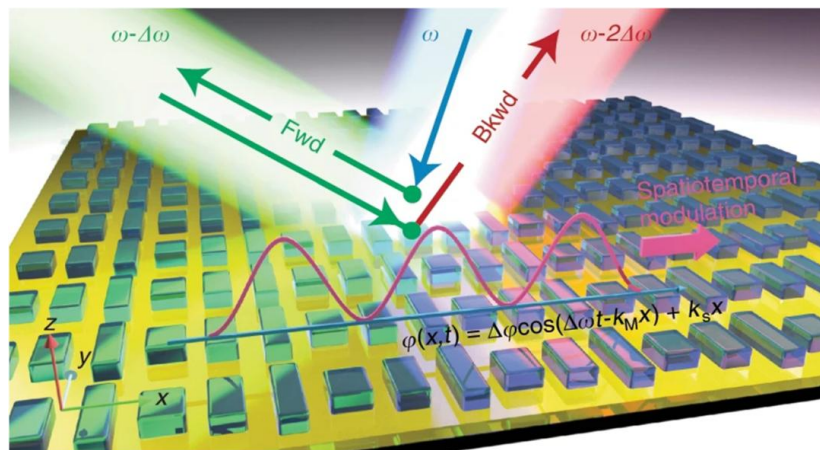


Рис. 4. Схема експерименту з «невзаємною» метаповерхнею [7]

Порушення оптичної взаємності, тобто «вимкнення» відбивання в одному із напрямків, може бути корисним для багатьох практичних застосувань, наприклад, в оптичних комунікаційних мережах, де відбивання від дефектів в оптоволокну створюють додаткові перешкоди та знижують швидкість передачі даних [7].

#### 1.5. Метаповерхні для управління світлом залежно від стану його поляризації

Діелектричні метаповерхні, які мають двоприменезаломлення, дозволяють керувати оптичною поляризацією в просторі. Метаповерхня може кодувати необмежену кількість голографічних зображень або керувати світлом практично в знач-



ній кількості напрямків поляризації. Новий спосіб управління поляризованим світлом дозволяє реалізувати оптичні елементи (решітки, лінзи й, загалом, голограми), функція дальнього поля яких може перемикатися на основі падаючої поляризації. Метаповерхні дозволяють створювати лінзи, які фокусують поляризоване випромінювання у різні місця, голограми у дальньому полі з визначеною круговою поляризацією та решітки, що спрямовують світло до порядку +1 або -1 (залежно від того, яка з двох ортогональних поляризацій використовується). Поляризаційний базис, до якого чутлива метаповерхня, фіксується в дальньому полі [15]. Метаповерхневі голографічні пристрої можуть подолати обмеження на поляризаційну нечутливість деяких матеріалів і реалізувати векторну голографію. Поляризаційне мультиплексування розширює діапазон застосування метаповерхонь. Високоєфективне голографічне поляризаційне мультиплексування може бути реалізовано за допомогою метаповерхонь, що складаються з анізотропних субхвильових діелектричних еліптичних або прямокутних резонаторів, які можуть обробляти визначену інформацію в різних каналах поляризації [16].

### 1.6. Технологія метаповерхні для створення малогабаритних камер

Мініатюризація датчиків зображень в останні десятиліття зробила сучасні камери поширеними в багатьох сферах, включаючи медичні системи формування зображень, смартфони, системи безпеки, робототехніку та автономне водіння транспортними засобами. Тим не менше, створення пристроїв для формування зображень значно менших розмірів може забезпечити нові застосування в наноробототехніці, біологічних дослідженнях живих об'єктів. Нове покоління метаповерхонь дозволяє створити фотокамери малого розміру (рис. 5), розмір яких становить всього  $0,5 \times 0,5$  мм. Вона формує зображення такої ж якості, як і об'ємні відеокамери в 500 000 разів більшого розміру. Хоча датчики з субмікронними пікселями існують, подальша мініатюризація не могла бути реалізована внаслідок фундаментальних обмежень звичайної оптики.

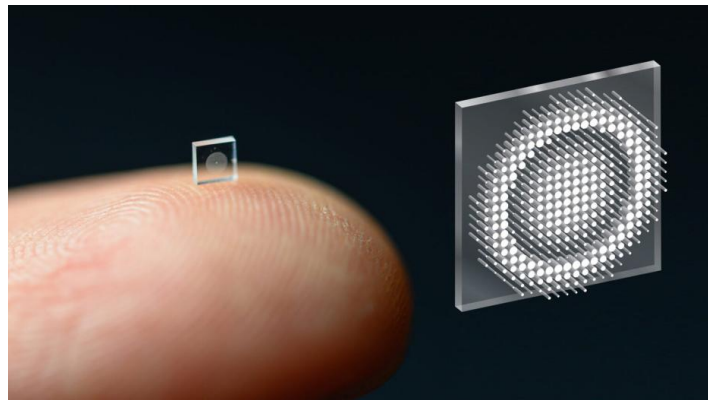


Рис. 5. Зображення мініатюрної камери, виготовленої на основі метаповерхонь [17]

Нанооптичні пристрої для формування зображення можуть дати можливість створення нових підходів при формуванні зображень [17]. Метаповерхнева оптика створює шлях до створення ультрамалих пристроїв, однак існуючі методи обробки зображень не дозволяють досягти бажаної високої якості зображення. Про-

понується використовувати алгоритми реконструкції зображення на основі нейронних функцій (так звану нейронну нанооптику) для формування зображень високої якості з використанням метаповерхневої оптики [18].

### 1.7. Металінзова оптична флуоресцентна мікроскопія для візуалізації *in vivo*

Для візуалізації та аналізу біологічних зразків (живі організми, тканини та клітини) потрібні методи мікроскопії, які забезпечують отримання тривимірної інформації з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Флуоресцентна візуалізація зображення тонких об'єктів у живих зразках забезпечує потужний спосіб дослідження клітинної та субклітинної динаміки в біології та клінічних застосуваннях. Серед сучасних мікроскопічних систем візуалізації в останні роки стала популярною плоска оптична флуоресцентна мікроскопія (light sheet fluorescent microscopy (LSFM)) [19]. Під час вимірювання за допомогою LSFM зразок зазвичай освітлюється збоку за допомогою тонкого оптичного елемента з перетяжкою, меншою розмірів елементів зразка, що досліджується. Сигнал флуоресценції з освітленої ділянки можна спостерігати вздовж осі детектування, яка ортогональна до площини збудження оптичною металінзою. Завдяки унікальній ортогональній схемі між системами збудження і аналізу LSFM має ряд переваг, включаючи велике поле зору, високу роздільну здатність зображення та низьке фотопошкодження. Ця ефективна техніка візуалізації дозволила вирішити багато проблем у різних галузях. Однак, при використанні LSFM-технології виникає низка проблем, одна з яких пов'язана з громіздкими оптичними компонентами. Перспективним шляхом ефективного вирішення цієї проблеми є впровадження метаповерхневої фотоніки. Складність системи LSFM можна істотно зменшити шляхом використання плоских метаповерхневих лінз. Використання металінз для дослідження живих об'єктів (*C. elegans*) зображено на рис. 6. Розроблені ультратонкі металінзи дозволяють значно зменшити систему освітлення в LSFM [20]. Металінза з нанорозмірною товщиною була виготовлена з використанням нанострижнів GaN. Використання оптичної системи з металінзами дозволяє досліджувати внутрішню структуру *C. elegans* з субмікронною роздільною здатністю.

### 1.8. Застосування метаповерхонь для просвітлення оптичних поверхонь

Перспективним напрямком є застосування метаповерхонь, що створені на основі використання наноотворів у металевих і багатошарових плівках, для просвітлення оптичних поверхонь і підвищення поглинання світла у тонкоплівкових сонячних батареях. Наноструктурована плівка, що представляє собою періодичний масив субхвильових отворів у підкладці, дозволяє виконати умови інтерференційного гасіння відбитого світла в широкому спектральному інтервалі, а не на одній довжині хвилі, як у випадку використання гомогенної плівки (рис. 7). Це зумовлено додатковим, частото-залежним фазовим зсувом, що виникає при відбиванні від метаповерхні, який підлаштовує повну фазу за умови «чвертьхвильової» просвітлюючої пластини. Формально це відповідає аномальній дисперсії показника заломлення плівки за відсутності поглинання. Даний принцип дії покриття є оригінальним, а саме покриття є абсолютно новим видом покриттів, яким просвіт-

люють оптичні поверхні [21, 22]. Була запропонована двошарова ( $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ ) антивідбиваюча структура, нанесена на кремнієву (Si) підкладку з гексагональним розміщенням отворів [22].

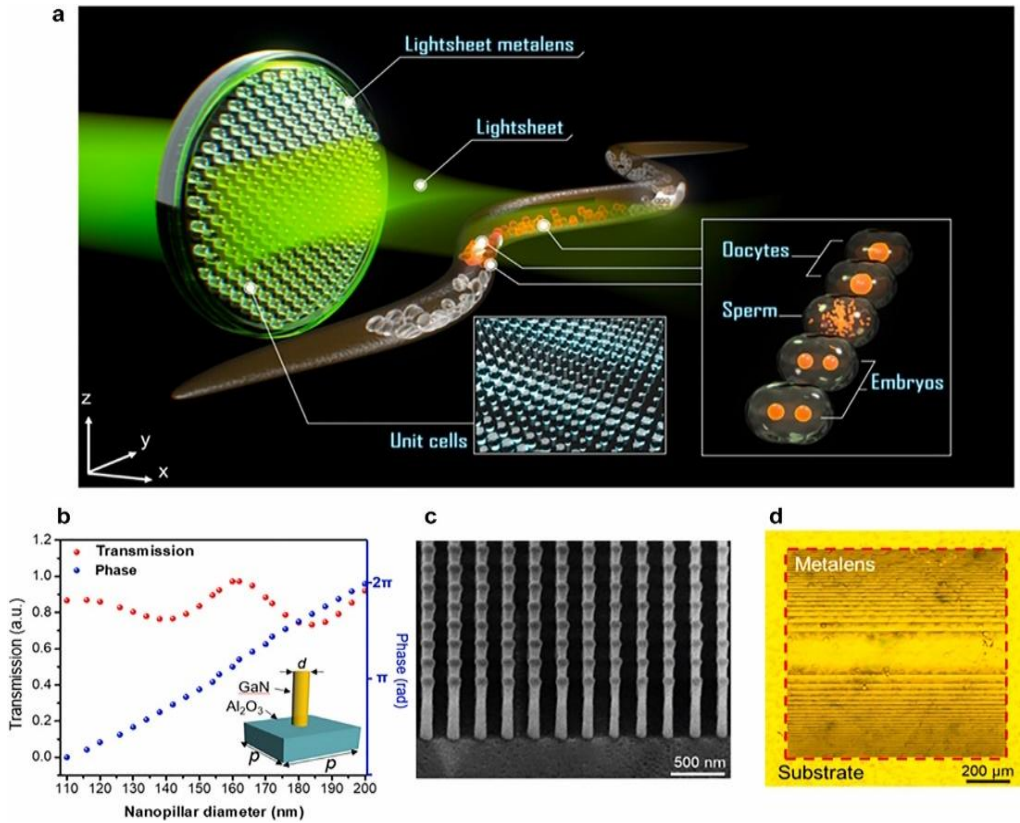


Рис. 6. Металінзи в технології плоскої оптичної флуоресцентної мікроскопії: а) схема LSFM для флуоресцентної візуалізації об'єкта *C. elegans*. Металінза складається з 800-нанометрових діелектричних нанострижнів для локальної модуляції фази. На вставці показано флуоресцентні зображення ооцитів, сперматозоїдів та ембріонів *C. Elegans*; б) результати моделювання фазової модуляції (сині точки) і пропускання (червоні точки) нанострижнів з різними діаметрами. На вставці наведено геометричні параметри нанострижнів — діаметр  $d$  та період елементарної комірки  $p$  (300 нм); в) зображення, що отримане на скануючому електронному мікроскопі (SEM-зображення), нанострижнів у металінзі; д) зображення металінзи, що отримане за допомогою оптичного мікроскопу [20]

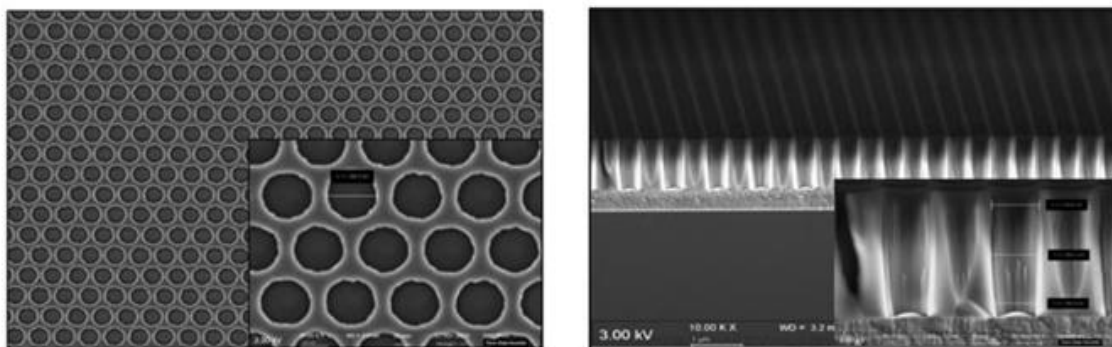


Рис. 7. Просвітлююча метаповерхня у вигляді двовимірного масиву субмікронних отворів [21]



## 1.9. Створення ахроматичних фокусуєчих систем

Ахроматизація має важливе значення для забезпечення роботи оптичних приладів у широкосмуговому діапазоні. Для ахроматичного фокусування розроблений метакоректор — одношарове покриття на основі метаматеріалу, яке дозволяє усунути хроматичну аберацию відразу в усьому оптичному діапазоні, тобто забезпечити збіг фокусних відстаней для всіх кольорів відразу. Нове покриття, яке складається з нанорозмірних стрижнів (рис. 8) можна використовувати для маніпулювання фазою, амплітудою та поляризацією світла [23].

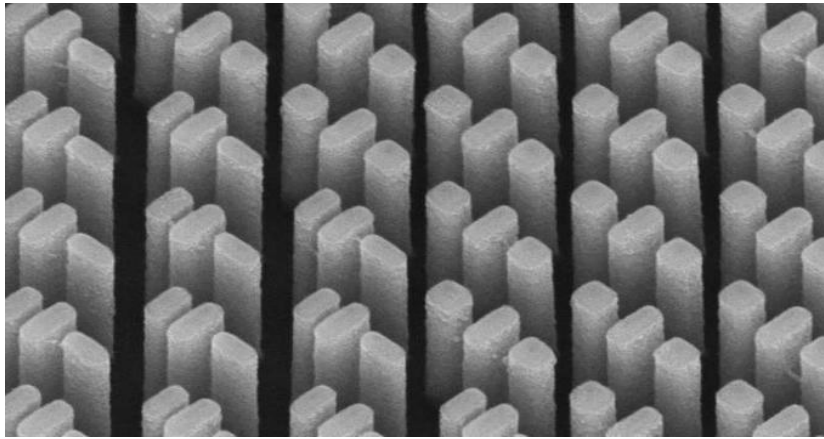


Рис. 8. Метаповерхня, виготовлена з нанорозмірних стрижнів [23]

## 2. Вибір матеріалів для створення метаповерхонь

Для отримання унікальних властивостей метаматеріалу необхідно реалізувати в ньому як електричний, так і магнітний відгук. У зв'язку з цим, історично перші метаматеріали розроблялися на основі металевих наноструктур. Такий підхід дозволяє найбільш природно отримувати мікроскопічні кругові струми, що призводить до магнітного відгуку матеріалу. Завдяки виникненню плазмонів на межі метал-діелектрик такі матеріали отримали назву плазмонних метаматеріалів. У цьому напрямку були досягнуті великі успіхи та побудовані різні функціональні пристрої — формувачі хвильового фронту, елементи управління поширенням світлового пучка, лінзи, голограми. Однак, метали в оптичній області спектра є непрозорими, що відразу різко обмежує їхнє застосування через вкрай малу ефективність у пропусканні. Високі оптичні втрати плазмонних метаматеріалів призвели до зміщення уваги в бік діелектричних матеріалів. Приклади металінів, виготовлених з різних матеріалів, наведені на рис. 9 [12].

Завдяки низькому оптичному поглинанню, високому коефіцієнту заломлення, а також простоті виготовлення для виготовлення метаповерхонь широко використовують діелектричні матеріали. Для видимих довжин хвиль використовуються діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ), нітрид галію ( $\text{GaN}$ ) і нітрид кремнію ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), а у ближньому і середньохвильовому інфрачервоному діапазонах довжин хвиль часто використовуються полікремній ( $p\text{-Si}$ ) та аморфний кремній ( $a\text{-Si}$ ), тоді як для ультрафіолетового діапазону підходять нітрид алюмінію ( $\text{AlN}$ ) і діоксид гафнію ( $\text{HfO}_2$ ) [12]. Кристалічний кремній ( $c\text{-Si}$ ) також можна використовувати у видимому діа-

пазоні, причому його високий показник заломлення є особливо вигідним [3, 12]. Вибір  $\text{TiO}_2$  та  $\text{GaN}$  є очевидним, оскільки вони не мають втрат у видимій ділянці спектра, а показник заломлення знаходиться в інтервалі 2,0–2,4, що забезпечує високий контраст [12]. Кристалічний кремній є цікавою альтернативою, оскільки він має високий показник заломлення ( $\sim 4$ ) і відносно низьке поглинання навіть у видимому діапазоні (0,01; 0,1). В [7, 12] повідомлялося про досягнуту ефективність до 67 % при 532 нм, що лише незначно нижче, ніж при використанні  $\text{TiO}_2$ .

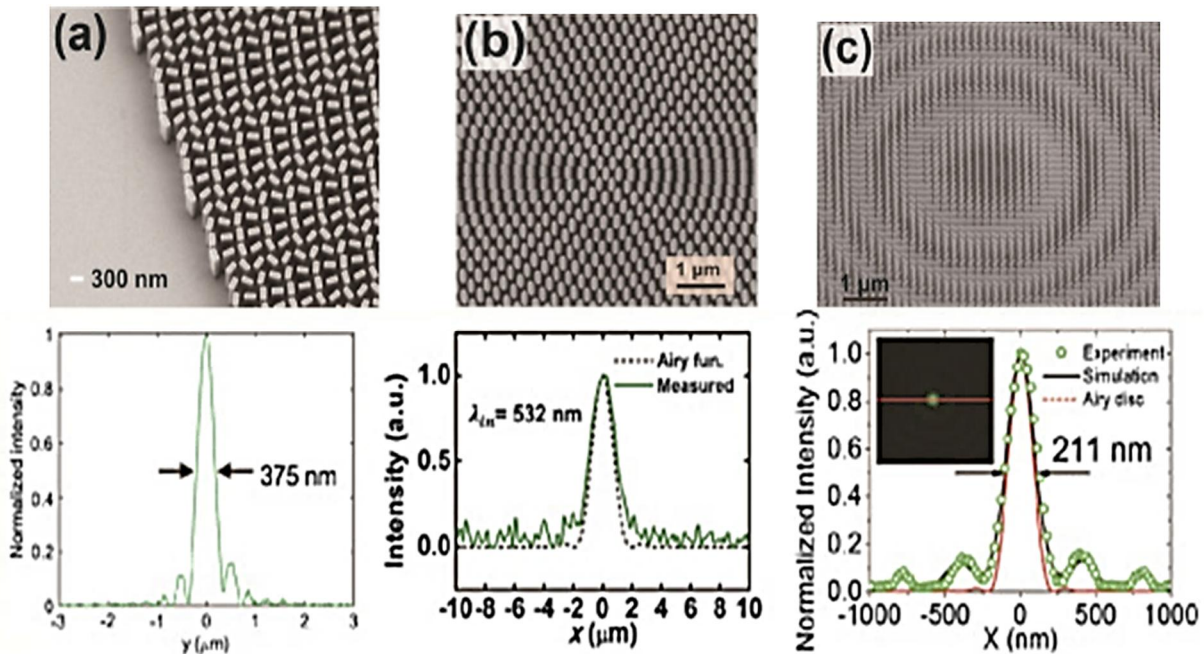


Рис. 9. Приклади металінз, виготовлених з  $\text{TiO}_2$  (а),  $\text{GaN}$  (б) і  $\text{c-Si}$  (в) та їхні відповідні характеристики фокусування. Дані наведені для довжини хвилі 532 нм [12]

### 3. Технологія виготовлення метаповерхонь

Технологія виготовлення метаповерхонь передбачає формування нанорозмірних структур для реалізації можливостей управління потоком світла [3, 7, 12]. Метаповерхні зазвичай складаються з періодичних, квазіперіодичних або випадково розташованих субхвильових антенних решіток, які виготовлені з металевих або діелектричних структур із певною геометрією. Метаповерхні виготовляються за планарною технологією створення нанорозмірних структур. Виготовлення метаповерхонь стало можливим завдяки розвитку технологій нанолітографії [10] та створенню методів проектування метаповерхонь [3]. Метаповерхні зазвичай створюються шляхом формування масивів мініатюрних анізотропних розсіювачів світла (тобто резонаторів), нанесених на діелектричну підкладку. Відстань між антенами та їхні розміри набагато менші за довжину хвилі. В результаті метаповерхні можуть формувати оптичні хвильові фронти довільної форми з субмікронною роздільною здатністю [3, 12]. Різкі та контрольовані зміни оптичних властивостей метаповерхні досягаються шляхом реалізації взаємодії між світлом і оптичними розсіювачами («оптичні антени»), які можуть приймати різноманітні форми — металеві або діелектричні мікро/наночастинки та отвори, створені в металевих

плівок. Метаповерхні в загальному вигляді представляють собою нановізерунки (нанорозмірні структури), які створюються за допомогою технології нанолітографії на поверхні тонкого шару напівпровідника або металу. Варіантом метаповерхні є метаповерхня, що складається із сотень тисяч крихітних V-подібних антен, сформованих на поверхні тонкої золотої фольги. Така структура надає можливості для високоточного та високоефективного керування потоком світла, які можна буде використовувати при створенні високочутливих датчиків, голографічних дисплеїв з високою роздільною здатністю [16]. Метаповерхні виготовляють з використанням технологічних процесів, які використовуються при виробництві напівпровідникових елементів (електронна променева літографія та глибока УФ-літографія). Перспективною технологією створення метаповерхонь вважається інтеграція на одній поверхні кількох оптичних компонентів. Метаповерхні використовують плазмонні явища для контролю відбивання світла і формування хвильових фронтів [1]. Характеристики деяких метаповерхонь наведено в таблиці.

Характеристики типових метаповерхонь [4]

NA	Фокус, мкм	$\lambda$ мкм	Максимальна товщина, нм	Мінімальна товщина, нм	Ефективність
0,2	67	0,53	600	50	92
0,6	200	0,532	600	250	87
0,97	25	1,550	950	200	92

Метаоптика, яка включає метаматеріали, метаповерхні та металінзи, має явні переваги перед звичайною дифракційною оптикою в обробці поляризаційних сигналів світла (у побудові поляризаційних зображень, високоефективних поляризаторів і поляризаційно-чутливої оптики) [4]. Крім того, їхні субхвильові розміри надзвичайно корисні в інтегрованій оптиці та фотоніці, де щільність є критичним параметром для впровадження технології [4]. Також розробляються метаповерхні, в яких у металевій плівці створюють отвори спеціальної форми, та досліджуються процеси проходження світла через таку поверхню при її опроміненні з різних боків. Було виявлено надзвичайно важливі ефекти: крізь отвори, розміри яких становлять кілька десятків або сотень нанометрів, світло ефективно проходить; така плівка з одного боку пропускає світло, а з іншого — не пропускає (спостерігається ефект оптичної невзаємності) [7].

#### 4. Створення та використання активних метаповерхонь

Перспективним завданням на сьогоднішній день є створення діелектричних метаповерхонь, що перебудовуються (активних метаповерхонь). Оскільки форма та геометричні розміри наночастинок визначають властивості метаповерхні, всі характеристики задаються в процесі її виготовлення. Таким чином, характеристики метаповерхонь і створених з них оптичних елементів і пристроїв є статичними. Однак, величезна область застосувань вимагає створення динамічних оптичних

елементів, наприклад лінз зі змінною фокусною відстанню, динамічних голограм, пристроїв управління напрямком поширення світлового пучка. Перспективним напрямом досліджень метаповерхонь є методи створення активних метаповерхонь, оптичні характеристики яких можуть бути після виготовлення динамічно налаштовані. Це дозволяє реалізувати безліч застосувань, які не можна досягнути традиційною оптикою [23–26]. Розробка оптики, що переконфігурується на основі активних метаповерхонь, є складною проблемою, оскільки оптичні характеристики необхідно оптимізувати в кількох станах. Перспективність метаповерхневої оптики полягає в довільному керуванні електромагнітними хвилями з оптично тонким форм-фактором, який не може бути отриманий традиційною об'ємною оптикою. Інтегрована з активними компонентами плоска, піксельна архітектура метаповерхні додатково полегшує локальне та глобальне налаштування їхніх оптичних відгуків. Ці пристрої, які мають можливості налаштовуватися, зазвичай відомі як активні метаповерхні [24]. Одним із перспективних методів контролю оптичного відгуку метаповерхні є контрольована зміна показника заломлення середовища навколо метаповерхні. Переважна більшість активних метаповерхонь базується на використанні двох груп матеріалів —  $\text{VO}_2$  та сплавів системи германій-сурма-телур [24].

Використання сплаву  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST), що змінює фазу, дає можливість створити повністю діелектричну метаповерхню, яку можна активно переконфігурувати. Завдяки контрольованим фазовим переходам у сплавах GST можна створювати активні метаповерхні, які демонструють різноманітні функціональні можливості. З використанням активних метаповерхонь, що складаються з різних стрижнів GST в аморфному та кристалічному станах, можна реалізувати багаторівневу модуляцію сигналу та аномальний кут відбиття (рис. 10). На рис. 10,*a* наведена ілюстрація принципу роботи активної метаповерхні, створеної з матеріалу з фазовим переходом. Відбиваюча метаповерхня складається з масиву наностержнів GST з різними фазовими станами та Au-дзеркала, розділених додатковим шаром. При нормальному освітленні (1550 нм) метаповерхня може змінювати свій кут відбивання, модулюючи фазовий стан кожного наностержня GST. Рис. 10,*b* ілюструє правило вибору елементарної комірки активної метаповерхні. Змінюючи фазові стани двох стрижнів GST різної геометрії, можна реалізувати трирівневу градієнтну фазову модуляцію.

Схема реалізації селективної модифікації фазово-змінної метаповерхні наведена на рис. 11. Стрижні GST метаповерхні наносяться на TiN електроди (показані жовтим кольором). Їхні фазові стани можна змінювати шляхом подачі імпульсів електричного струму через електрод.

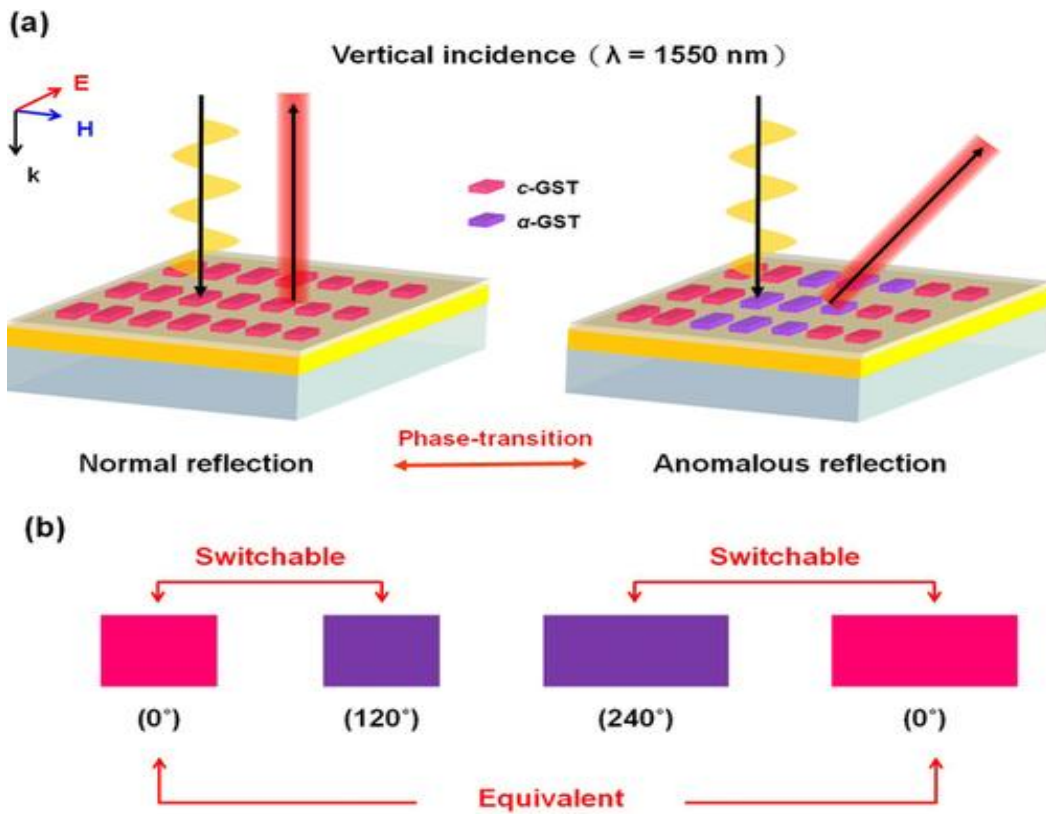


Рис. 10. Активна метаповерхня [25]

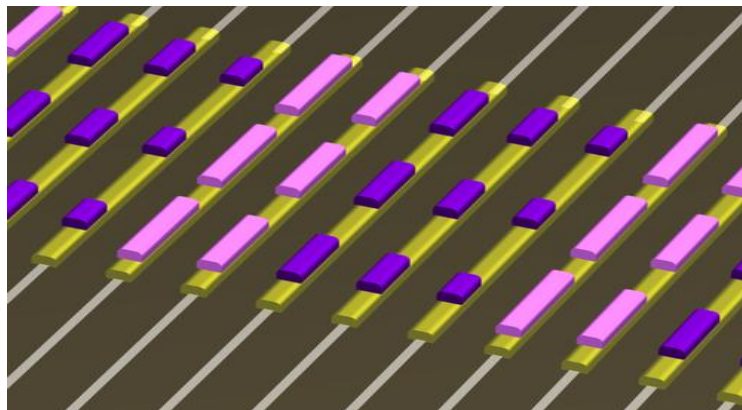


Рис. 11. Схема реалізації селективної модифікації фазово-змінної метаповерхні [26]

## Висновки

1. Одним із найбільш перспективних напрямів створення плоскої (дифракційної) оптики є використання метаповерхонь, які створюються на основі методів нанолітографії. Метаповерхні забезпечують нову технологічну основу для перетворення оптичних компонентів на тонкі плоскі елементи.

2. Області використання метаповерхонь постійно розширюються та дозволяють створювати системи ефективного керування потоками оптичного випромінювання.



3. Активні метаповерхні з плоскою, піксельною архітектурою дозволяють налаштувати локальні та глобальні характеристики оптичних систем, відкриваючи таким чином нові можливості для динамічного управління хвильовим фронтом.

1. Capasso F. The future and promise of flat optics: a personal perspective. *Nanophotonics*. 2018. Vol. 7, No. 6. P. 953–957. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0004>.

2. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Mater*. 2014. Vol. 13. P. 139–150. <https://doi.org/10.1038/nmat3839>.

3. He-Shanshan, Wang-Ruisi and Luo Hailu. Computing metasurfaces for all-optical image processing: a brief review. *Nanophotonics*. 2022. Vol. 11, No. 6. P. 1083–1108. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0823>.

4. Banerji S., Meem M., Majumder A., Guevara Vasquez F., Sensale-Rodriguez B., and Menon R. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses. *Optica*. 2019. Vol. 6, No. 6. P. 805–810. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.000805>.

5. Chen Hou-Tong, Taylor Antoinette J., Yu Nanfang. A review of metasurfaces: Physics and applications. *Reports on Progress in Physics*. 2016. Vol. 79, No. 7. 076401. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/7/076401>.

6. Devlin R.C., Khorasaninejad M., Ting Chen Wei, Oh J., Capasso F. High-efficiency metasurfaces for visible spectrum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. Vol. 113, No. 38. P. 10473–10478. DOI: 10.1073/pnas.1611740113.

7. Guo X., Ding Y., Duan Y., and Ni X. Nonreciprocal metasurface with space-time phase modulation. *Light: Science & Applications*, 2019. Vol. 8, No. 123. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0225-z>.

8. Wei Ting Chen, Alexander Y. Zhu, Jared Sisler, Yao-Wei Huang, Kerolos M.A. Yousef, Eric Lee, Cheng Wei Qiu, Federico Capasso. Broadband Achromatic Metasurface Refractive Optics. *Nano Letters*. 2018. Vol. 18, No. 12. P. 7801–7808. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b03567>.

9. The Dawn of New Optics: Emerging Metamaterials. URL: [https://www.photonics.com/Articles/The\\_Dawn\\_of\\_New\\_Optics\\_Emerging\\_Metamaterials/a64154#:~:text=One%20goal%20of%20a%20tunable,holographic%20displays%2C%20and%20quantum%20levitation](https://www.photonics.com/Articles/The_Dawn_of_New_Optics_Emerging_Metamaterials/a64154#:~:text=One%20goal%20of%20a%20tunable,holographic%20displays%2C%20and%20quantum%20levitation)

10. Петров В.В., Крючин А.А., Куницький Ю.А., Рубіш В.М., Лапчук А.С., Костюкевич С.О. Методи нанолітографії. – Київ: Наук. думка, 2015. 262 с.

11. Kryuchyn A.A., Petrov V.V., Rubish V.M., Trunov M.L., Lytvyn P.M., Kostyukevich S.A. Formation of Nanoscale Structures on Chalcogenide Films. *Phys. Stat. Solidi B*. 2017. Vol. 255. No. 1700405. <https://doi.org/10.1002/pssb.201700405>.

12. Liang H., Martins A., Ben-Hur V. Borges, Zhou J., Martins E.R., Li J., Krauss T.F. High performance metalenses: numerical aperture, aberrations, chromaticity, and trade-offs. *Optica*. 2019. Vol. 6, No. 12. P. 1461–1470. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.001461>.

13. Pors A., Nielsen M.G., Bozhevolnyi S.I. Analog Computing Using Reflective Plasmonic Metasurfaces. *Nano Letters*. 2015. Vol. 1. P. 791–797 <https://doi.org/10.1021/nl5047297>

14. Jung C., Kim G., Jeong M., Jang J., Dong Z., Badloe T., Yang J.K.W., Rho J. Metasurface-Driven Optically Variable Devices. *Chem. Rev.* 2021. Vol. 121, No. 21. P. 13013–13050. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00294>.

15. Rubin N.A., Zaidi A., Dorrah A.H., Shiand Z., Capasso F. Jones matrix holography with metasurfaces. *Science Advances*, 2021. Vol. 7, No. 33. Article number: eabg7488 DOI:10.1126/sciadv.abg7488.

16. Wei Q., L.Huang, T. Zentgraf, Y. Wang. Optical wave front shaping based on functional metasurfaces. *Nanophotonics*, 2020. Vol. 9, No. 5 P. 987–1002. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0478>.

17. The Dawn of New Optics: Emerging Metamaterials [https://www.photonics.com/Articles/The\\_Dawn\\_of\\_New\\_Optics\\_Emerging\\_Metamaterials/a64154#:~:text=One%20goal%20of%20a%20tunable,holographic%20displays%2C%20and%20quantum%20levitation](https://www.photonics.com/Articles/The_Dawn_of_New_Optics_Emerging_Metamaterials/a64154#:~:text=One%20goal%20of%20a%20tunable,holographic%20displays%2C%20and%20quantum%20levitation).

18. Tseng E., Colburn S., Whitehead J. Neural nanooptics for high-quality thin lens imaging. *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12, No. 6493. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26443-0>.

19. Olarte O.E., Andilla J., Gualda E.J., Loza-Alvarez P. Advances in Optics and Photonic. *Light-sheet microscopy: a tutorials*. 2018. Vol. 10, No. 1. P. 111–179. <https://doi.org/10.1364/AOP.10.000111>.
20. Luo Y., Tseng M.-L., Vya S. Meta-lens light-sheet fluorescence microscopy for in vivo imaging. *Nanophotonics*. 2021. Vol. 11, No. 6. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0748>.
21. Jeon J., Bhattarai K., Kim D.K., et al. A Low-loss Metasurface Antireflection Coating on Dispersive Surface Plasmon Structure. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, No. 36190. <https://doi.org/10.1038/srep36190>.
22. Nye N.S., Swisher A., Bungay C., Tuenge S., Mayer T., Christodoulides D.N., Rivero-Baleine C. Design of broadband anti-reflective metasurfaces based on an effective medium approach. Proc. SPIE, 10181, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR II, 101810J (11 May 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2262026>.
23. Chen Wei Ting, Zhu A.Y., Sisler J., Huang Yao-Wei, Yousef Kerolos M.A., Lee E., Qiu Cheng-Wei, Capasso F. Broadband Achromatic Metasurface-Refractive Optics. *Nano Letters*, 2018. Vol. 18, No. 12. P. 7801–7808 <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b03567>.
24. Shalaginov M.Y., Campbell S.D., An S. Design for quality: reconfigurable flat optics based on active metasurfaces. *Nanophotonics*, 2020. Vol. 9, No. 11. P. 3505–3534. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0033>.
25. Cheng Hung Chu, Ming Lun Tseng, Jie Chen. Active dielectric metasurface based on phase-change medium. *Laser and Photonic Review*. 2016. Vol. 10, No. 6. P. 986–994. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600106>.
26. Gu T., Hu J. Chalcogenide glass metasurfaces from fluid instabilities. *Nat. Nanotechnol.* 2019. Vol. 14, No. 12. P. 309–311. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0374-5>.

Надійшла до редакції 31.03.2022