

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

ІЛЬЧЕНКО СВІТЛАНА ГРИГОРІВНА

УДК 535: 535.3: 535.016:
535.530.182: 621.373.8

**ОПТИЧНІ РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ
МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИЧНИХ
БАГАТОШАРОВИХ НАНОСТРУКТУР**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Міжнародному центрі «Інститут прикладної оптики»
Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор

Тараненко Віктор Борисович,

Міжнародний центр «Інститут прикладної оптики»
НАН України, директор

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор

Фітьо Володимир Михайлович

професор кафедри фотоніки Національного університету
«Львівська політехніка»

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Кадан Віктор Миколайович,

Інститут фізики НАН України
провідний науковий співробітник
відділу фотонних процесів

Захист дисертації відбудеться «16» вересня 2021 р. о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.159.01 при Інституті фізики НАН України за адресою: 03028, Київ, проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту фізики НАН України

Автореферат розісланий «12» серпня 2021 р. _____

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Чумак О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Постійний інтерес до створення та дослідження нових композитних резонансних оптичних багатошарових структур зумовлений їхніми незвичайними властивостями. Зокрема для фотонних кристалів характерним є наявність дозволених/заборонених частотно-кутових зон, що дозволяє спостерігати ефекти повільного світла [1], аномальну дифракцію [2], кутову фільтрацію [3] тощо. Для отримання ультразвукового оптичного резонансу було запропоновано використання складних двовимірних чи тривимірних фотонно-кристалічних елементів із селективними властивостями в комбінації з широко-кутовим фільтром [4]. Такі структури забезпечують селективне пропускання та/або відбивання в залежності від кутів падіння променю. Вони зазвичай складні у розрахунках та у виготовленні.

Резонанси в плазмонних структурах широко використовуються в суперлінзах з роздільною здатністю, що перевищує дифракційний ліміт [4], в біосенсорах [5], [6] тощо. Структури, що містять шар металу, відомі своїми резонансними властивостями, але вони характеризуються ще й значним поглинанням на межі поділу метал-діелектрик. Тому актуальною є розробка способів зменшення втрат оптичного випромінювання в згаданих структурах. Зазначимо, що уже знайдені методи компенсації оптичних втрат в металевих наноструктурах шляхом додавання матеріалів з оптичним підсиленням [7].

В літературі зустрічаються підходи, в яких запропоновано комбінувати різні матеріали для отримання заданих оптичних ефектів. Наприклад, для покращення спектральної селективності кольорових голограм, що створені за допомогою ефекту поверхневого плазмонного резонансу [8] у шарі металу, що знаходиться між підкладкою та фоточутливим матеріалом, наносять додатковий шар діелектрика.

Шаруваті структури, що складаються з послідовності діелектричних матеріалів, мають широке практичне застосування: оптичні покриття, дзеркала, поляризаційні поділювачі світлових пучків тощо. Такі структури можуть бути просторово-симетричними, як дзеркала Брегга, або мати різні товщини шарів, наприклад, чирповані дзеркала. Як показано в роботі [9], збільшення товщини останнього шару просторово-періодичної структури підсилює оптичне поле в ньому.

У роботі використовується метод зменшення дисипації енергії в шаруватих діелектричних структурах з порушеною симетрією шляхом додавання шару металу. У запропонованих багатошарових метал-діелектричних структурах (МДС) відбувається локалізація оптичного поля в останньому шарі структури за межами металу. Такі структури – одновимірні, тому вони прості у виготовленні та проведенні розрахунків.

Ключові слова: метал-діелектричні багатошарові наноструктури; сенсор зміни показника заломлення; лазерний модулятор; лазерний кутовий селектор; нелінійно-оптичні властивості полімерів на основі полівініліденфториду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалась у Міжнародному центрі «Інститут прикладної оптики» НАН України. Дослідження, що становлять зміст дисертації, виконувались у рамках бюджетних тем: (1) Науково-дослідна робота молодих учених НАН України у 2015-2016 р. «Розробка нових методів запису та відтворення кольорового тривимірного зображення голограм на основі поверхневого плазмонного резонансу» Реєстраційний № 0115U005160; (2) НДР «Розвиток лазерних методів напилення, прецизійних вимірювань та створення плазмонних голографічних структур» № держреєстрації 0116U004563, 2016-2018 р.; (3) НДР «Дифракційні та дисперсійні наноструктури: фундаментальні властивості та методи створення», № держреєстрації 0112U007774, 2012-2017 р; (4) НДР «Дифракційні і фотонно-кристалічні структури: фундаментальні властивості та застосування», 1118U003470, 2018-2022 р; (5) «Створення дослідного зразка компактного твердотілого лазера високої яскравості з фотоннокристалічним кутовим селектором» № держреєстрації 0120U100631, 2020 р.

Мета роботи полягає у дослідженні підходів для створення багатошарових МДС з малими втратами енергії, вивченні їх оптичних властивостей та можливостей практичного застосування.

Для досягнення мети дисертаційної роботи поставлено наступні **завдання**:

- 1) дослідити дисперсійні властивості МДС для керування спектрально-кутовою селективністю джерел оптичного випромінювання;
- 2) проаналізувати вплив дійсної та уявної частин діелектричної проникності матеріалів на форму спектрально-кутової залежності коефіцієнта відбивання поблизу резонансу;
- 3) оцінити вплив матеріалу з кубічним нелінійним відгуком в останньому шарі запропонованої структури на коефіцієнт відбивання світла;
- 4) дослідити фотоіндуковані зміни оптичних характеристик полімерів на основі полівініліденфториду (PVDF) при імпульсному лазерному збудженні пікосекундної тривалості;
- 5) дослідити можливості практичного застосування МДС та полімерів на основі PVDF.

Об'єкт дослідження – резонансні багатошарові МДС та плівки полімерів на основі PVDF з нелінійно-оптичним відгуком.

Предмет дослідження – спектрально-кутові характеристики МДС; фотоіндуковані зміни та ефективність генерації оптичних гармонік полімерів на основі PVDF.

Методи дослідження: матричне моделювання параметрів МДС та процесів її взаємодії з лазерним випромінюванням; спектроскопія поглинання та відбивання в УФ, видимій та ІЧ областях; методика самовпливу лазерного випромінювання та генерації оптичних гармонік при імпульсному пікосекундному (пс) лазерному збудженні на довжині хвилі 1064 нм.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропонована нова багатошарова МДС, що характеризується вузьким кутовим відгуком коефіцієнта відбивання (з шириною резонансу ≤ 1 град) та високим коефіцієнтом підсилення поля в останньому шарі при резонансному куті падіння. Розраховано та експериментально підтверджено спектрально-кутові характеристики структури: вузький провал коефіцієнта відбивання, зміна фази відбитого променю та підсилення поля в останньому шарі на прикладі виготовленого зразка $\text{Ag}/[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2]_3$.

2. Проведено аналіз резонансних спектрально-кутових характеристик багатошарової МДС в широкому діапазоні довжин хвиль (400-1600 нм) і кутів падіння оптичного випромінювання (0-90 град). Знайдено умови існування вузьких спектрально-кутових резонансів, оптичні поля яких локалізовані в останньому діелектричному шарі, і відносно широких резонансів Тамма, поля яких локалізовані на межі метал-діелектрик.

3. Теоретично і експериментально продемонстровано ефект оптичної невзаємності для хвиль, відбитих від багатошарової МДС з її протилежних сторін.

4. Теоретично та експериментально показана можливість отримання вузького піку коефіцієнта відбивання (< 1 град) у запропонованій МДС, в якій наночастинка металу замінено на шар діелектрика із затуханням або композиції нанорозмірного шару Cr з шаром SiO_2 .

5. Для багатошарової МДС з керрівською нелінійністю останнього шару проведено теоретичний аналіз динамічних змін коефіцієнта відбивання в залежності від інтенсивності падаючого випромінювання при кутах падіння, близьких до резонансного. Показано існування низькопорогової бістабільності коефіцієнта відбивання.

6. Вперше досліджено нелінійно-оптичний відгук полімерів PVDF і кополімеру вініліденфториду з трифторетиленом $\text{P}(\text{VDF-TrFE})$ при збудженні одиночними пікосекундними лазерними імпульсами на довжині хвилі 1064 нм в широкому діапазоні пікової інтенсивності випромінювання від 0.01 до 2000 ГВт/см^2 . Досліджено ефективність генерації оптичних гармонік полімерів, поверхня яких була функціоналізована наночастинами ZnO .

Практичне значення одержаних результатів.

1. Показано можливість використання МДС для підвищення чутливості сенсорів зміни показника заломлення, аналогічних до сенсорів на основі ефекту поверхневого плазмонного резонансу.
2. Вперше на прикладі зразка $\text{Cr}/\text{SiO}_2/[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2]_3$ підтверджено можливість застосування МДС як внутішньорезонаторного кутового селектору для покращення характеристик випромінювання в широкоапертурних лазерах.
3. Запропоновано використання МДС з нелінійним шаром як висококонтрастного модулятора лазерного випромінювання.
4. Показано перспективи використання кополімеру $\text{P}(\text{VDF-TrFE})$ як нового типу покриття кювет у системах біовізуалізації та для різних методів характеризації наночастинок. Завдяки ефективному нелінійно-оптичному

відгуку P(VDF-TrFE) є перспективним для багатьох оптичних застосувань, таких як сенсори та надшвидкі перемикачі.

Особистий внесок здобувача. Представлені в дисертації та в наукових працях результати одержано за безпосередньої участі здобувачки на всіх етапах роботи. Відповідно до поставлених завдань вона брала участь у дослідженнях зразків полімерів, проведених у роботах [1*, 2*]. Експериментальні результати цих робіт виконано здобувачкою спільно з іншими співавторами. Зразки для досліджень, описаних у роботах [1*, 2*], виготовлено Департаментом наук про здоров'я, Університет "Magna Græcia", Катандзаро, Італія, якими також проведено частину досліджень з їх характеристикації. Дослідження фотоіндукованих змін оптичного поглинання та показника заломлення, а також ефективності генерації оптичних гармонік полімерних плівок проводилося в Лабораторії нелінійно-оптичної діагностики новітніх матеріалів Інституту фізики НАН України. Математичне моделювання та аналіз результатів робіт [3*-5*] виконано здобувачкою разом із співавторами. Зразки, що досліджено у роботах [6*, 7*], виготовлено Лабораторним центром фізичних наук та технології оптичного покриття, Вільнюс, Литва. Спільно з науковим керівником та іншими співавторами здобувачка брала участь у написанні всіх наукових статей та підготовці їх до публікації. Отримані результати доповідалися на міжнародних наукових конференціях, у тому числі особисто здобувачкою [1*-4*], а також у формі стендових доповідей, у підготовці яких здобувачка брала активну участь.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертації доповідались на семінарах Міжнародного центру «Інститут прикладної оптики» НАН України, а також представлені на вітчизняних та міжнародних конференціях, зокрема: International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Ukraine, (2013, 2016, 2019); Material of IV International Conference for Young Scientists "Low Temperature Physics", Kharkiv, Ukraine, (2015); Scientific and Technical Conference Laser Technologies. Lasers and Their Application, Truskavets, Ukraine, (2015, 2017, 2019); International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials, Ukraine (2015, 2016, 2017, 2019, 2020); Advanced research workshop "Advanced nanomaterials for detection of CBRN", Odessa, Ukraine, (2019)

Публікації. Основні матеріали роботи представлено в 7-ми наукових публікаціях у фахових наукових журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, а також у 16-ти тезах вітчизняних та міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел (135 найменувань на 13 сторінках). Обсяг дисертації складає 120 сторінок. Вона містить 55 рисунків та 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими програмами і темами досліджень, які виконувались у Міжнародному центрі «Інститут прикладної оптики» НАН України, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо апробації роботи, публікації та особистий внесок здобувачки, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела щодо дослідження типів резонансів в шаруватих наноструктурах. Основну увагу зосереджено на структурах з нанесеною металевою плівкою (поверхневий плазмонний резонанс) [10], на багатошарових діелектричних дзеркалах [11] та гібридних структурах (оптичні резонанси Тамма і Фано). [12, 13].

Для згаданих структур резонанси зумовлені затухаючими хвилями, що поширюються уздовж межі розділу двох середовищ і проникають в них на відстань, меншу довжини хвилі. В таких локалізованих затухаючих хвилях вся енергія концентрується у вузькій області поблизу межі розділу двох середовищ. Хвилі можуть збуджуватися різними способами: дифракція на краю, повне внутрішнє відбивання, поверхневі плазмони з використанням багатошарових діелектричних структур [8] тощо. Перші два способи не забезпечують високу інтенсивність поля на поверхні. Для отримання електромагнітного поля високої інтенсивності (висока в порівнянні з внутрішньоатомним полем), не руйнуючи зразок, можна використовувати відомі методи підсилення локального поля. Саме це реалізується в двох інших способах.

Другий розділ присвячено моделюванню нової МДС з вузьким спектрально-кутовим резонансом - провалом – різким зменшенням інтенсивності відбитого променя, її теоретичному та експериментальному дослідженні.

Запропонована багатошарова МДС складається з нан шару металу (М), періодично повторюваних комбінацій пар діелектричних шарів з високим/низьким (Н/Л) показниками заломлення з товщинами $\sim \lambda/4$, а останній L шар має вдвічі більшу товщину. В такій структурі збудження і підсилення хвиль відбувається як в ТЕ-, так і в ТМ-поляризації [3*].

Для моделювання МДС використано метод матриць розсіяння, що описує поширення хвиль у плоских шаруватих структурах [14]. У цьому методі враховуються відбивання Френеля та пропускання на границях шарів структури з урахуванням граничних умов, товщин шарів та їх показників заломлення. За допомогою цього методу в роботах [3*], [4*] теоретично показано існування вузького провалу у кутовому розподілі коефіцієнта відбивання для ТЕ - поляризації. При цьому, оптимізацію товщини шарів та показників заломлення матеріалів для досягнення мінімуму коефіцієнта відбивання та максимального коефіцієнта підсилення поля в останньому шарі структури проведено методом Монте-Карло. Для цього забезпечено варіацію товщини кожного шару в межах ± 5 нм, що може бути практично реалізовано. Аналіз

дисперсійних кривих (в координатах кут падіння на структуру – довжина хвилі) коефіцієнта відбивання (Рис.1), підсилення поля та зсуву фази дає можливість виявити області існування резонансу. Водночас з'являється можливість керувати властивостями структури. На інтерфейсі між діелектричною структурою типу дзеркала Брегга і металевою плівкою виникають локалізовані хвилі - т.з. оптичні поверхневі стани Тамма (ОСТ) [12, 15]. Аналогічно до збудження поверхневих плазмон-поляритонів (ППП), поява ОСТ призводить до просторової локалізації електромагнітного поля поблизу інтерфейсу дзеркало/метал. Однак, на відміну від ППП, ОСТ існують як для ТМ-, так і для ТЕ-поляризацій і спостерігається поляризаційне розділення спектрального положення резонансу Тамма. ОСТ можна виміряти експериментально за допомогою резонансу в спектрі відбивання/пропускання. У класичному випадку мода Тамма – це широка суцільна лінія (Рис.1 а). Збільшення товщини останнього шару у дзеркалі Брегга призводить до появи хвильової моди, що перетинає моду Тамма та «розриває» її (Рис. 1 б). В результаті, отримуємо гібридну моду – моду Тамма, що переходить в хвильову моду при кутах, більших ніж кут повного внутрішнього відбивання. Такий ефект характерний тільки для ТЕ-поляризації та дозволяє отримувати значно вужчий резонанс у порівнянні з класичним ОСТ. Тому подальше дослідження представлено саме для цієї поляризації.

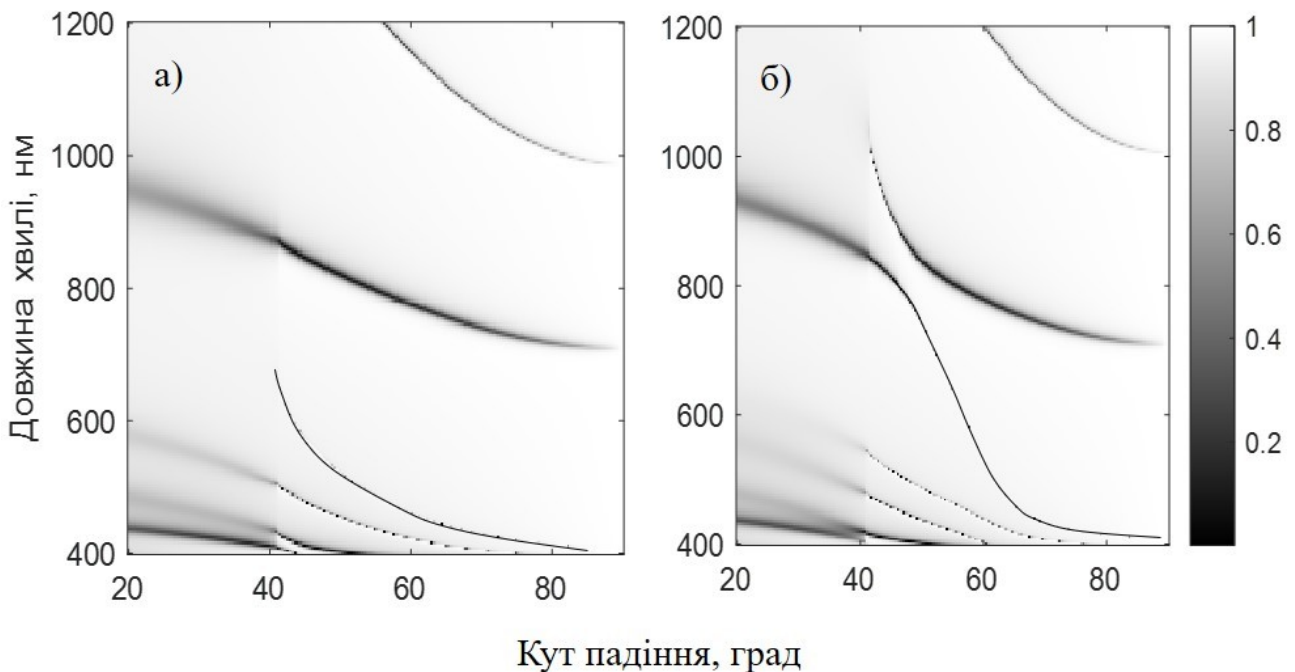
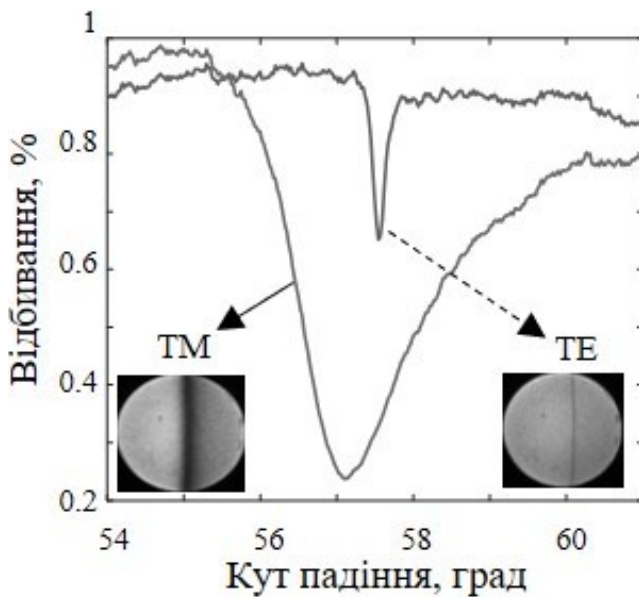


Рис. 1. Розрахована карта оптичних поверхневих станів Тамма для структури метал/дзеркало Брегга (а) та структури із збільшеною товщиною останнього шару (б)

На основі проведених оптимізаційних розрахунків МДС, Лабораторним центром фізичних наук та технологій оптичного покриття (Вільнюс, Литва) було виготовлено зразки методом вакуумного термічного напылення [6*, 7*]. Вони складаються з нан шару срібла та діелектричної структури – трьох пар шарів із високим/низьким показником заломлення ($\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$,

$n(H/L) = 2,3216 / 1,4721$ на довжині хвилі $\lambda = 632.8$ нм). При однаковому куті падіння світла на структуру можна спостерігати провали в кутовому розподілі інтенсивності відбитого променя, ширина провалу $0.01/1$ град для ТЕ-/ТМ-поляризацій, відповідно (Рис.2).



Керувати спектрально-кутовою селективністю структури можна, змінюючи товщини шарів як металу, так і діелектриків. Це відкриває можливості для широкого практичного використання.

Структури на основі ефекту ППР вже довели свою придатність, як сенсори зміни показника заломлення, оскільки вони можуть досить точно вимірювати зміни, що виникають поблизу поверхні металевої плівки, де локалізовано затухаюче поле. Зміна показника заломлення

Рис. 2. Результат вимірювання кутових спектрів коефіцієнта відбивання від структури з $M(HL)_3$ ширина резонансу для ТЕ-/ТМ-поляризацій становить $0.01/1$ град. На фото – відбивання від структури для ТЕ - /ТМ-поляризацій.

досліджуваного матеріалу призводить до зміни умов резонансу. Таким чином, визначити характеристики матеріалу в режимі реального часу можна вимірюючи динамічний відгук ППР. Наразі широко використовується структура ППР сенсору, яка складається лише з однієї тонкої металевої плівки, нанесеної на основу скляної призми (конфігурація Кречмана), в якій ППР збуджується в ТМ-поляризації і затухаюче поле утворюється поблизу поверхні металевої плівки. У такій конфігурації ППР має значні втрати при розповсюдженні і тому спектрально-кутовий резонанс має велику ширину, що обмежує роздільну здатність та чутливість ППР сенсорів. Розроблена МДС дозволяє зменшити втрати при розповсюдженні та підсилює затухаюче поле для ТЕ-поляризації, що дозволяє збільшити роздільну здатність та чутливість сенсору [4*]. Керувати чутливістю сенсору можна також збільшуючи або зменшуючи кількість пар HL у МДС.

Вище описані результати отримані при збудженні притиснутих хвиль у МДС за допомогою призми. На Рис.3 наведено спектри пропускання (Т), відбивання (R) та втрат (A) МДС на плоских підкладках. Для довжин хвиль від 600 до 1100 нм експериментальні дані збігаються з теоретично розрахованими. Розглянуто два випадки збудження хвиль в МДС: з боку підкладки (R, A) та нанесеного покриття (R^* , A^*). Пропускання в обох випадках однакове, проте у відбиванні спостерігається невзаємність. Цей ефект

можна пояснити, якщо розглянути розподіл поля в шарах структури. У першому випадку відбувається поглинання першим шаром структури – металом. В другому випадку навпаки: енергія поширюється по шарах діелектричної структури, в результаті чого утворюється хвильоводна мода, що призводить до більших втрат.

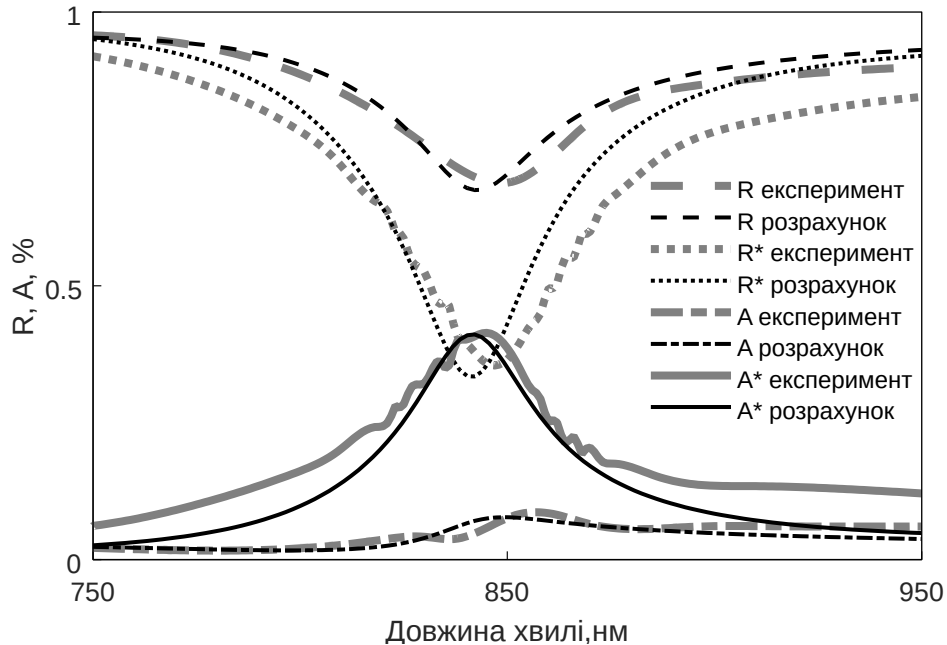
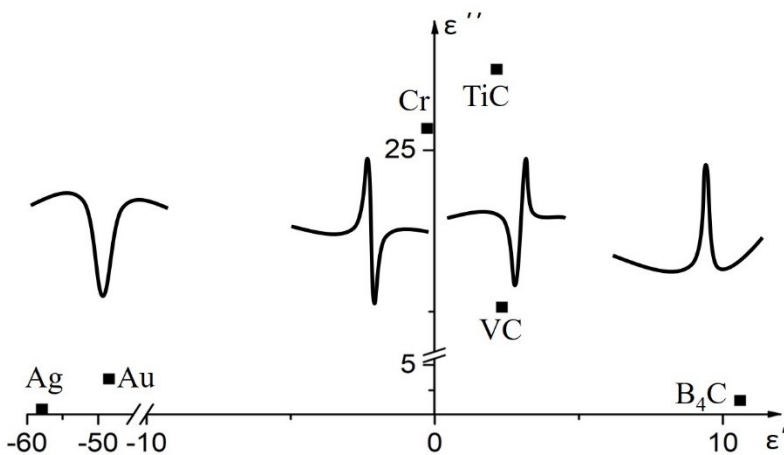


Рис. 3. Відбивання (R) та втрати (A) в МДС для зразків на плоских підкладках: збудження хвиль в МДС з боку підкладки (R , A) та нанесеного покриття (R^* , A^*)

У **третьому розділі** викладено результати наших досліджень залежності форми коефіцієнта відбивання біля резонансного кута від значень дійсної та уявної частин діелектричної проникності матеріалів першого шару МДС. Показано, що, вибираючи матеріали шарів, можна контролювати форму кривої у відбиванні також можливо отримати не тільки провал у відбиванні, а й пік.

Показано, що залежно від величини дійсної та уявної частини діелектричної проникності матеріалу поглинаючого шару, наприклад, V_4C , TiC , Cr , можна виділити чотири типи кривої коефіцієнта відбивання поблизу резонансного кута, а саме: провал, пік, та два комбінованих пік/провал і провал/пік (Рис.4). Контроль форми кривої відбивання може бути корисним для розробки сенсорів та кутових селекторів.

Рис. 4. Залежності значень уявної частини діелектричної проникності першого шару матеріалу від дійсної частини діелектричної проникності на довжині хвилі 1064 нм.



Як показано на Рис.4, можна отримати не тільки провал у інтенсивності відбитого лазерного випромінювання, а й надвузький резонансний пік [6*]. Цей ефект застосовується в розробленому одновимірному кутовому селекторі, який є призмою з нанесеною МДС (Рис.5). Запропонована конструкція базується на ідеї отримання у відбиванні вузького кутового резонансу [9]. Такий елемент перспективний для застосування як внутрішньорезонаторний кутовий селектор у широкоапертурних лазерах [7*].

Щоб з'ясувати можливість створення надвузького висококонтрастного піку в кутовому спектрі інтенсивності відбитого променя, були розраховані конфігурації діелектричних шарів, знайдено оптимальний матеріал першого шару структури та його товщину. МДС розраховано для нанесення на основу стандартної прямокутної призми, виготовленої з плавленого кварцу, який є найдоступнішим матеріалом (Рис.5.) для запропонованого експерименту.

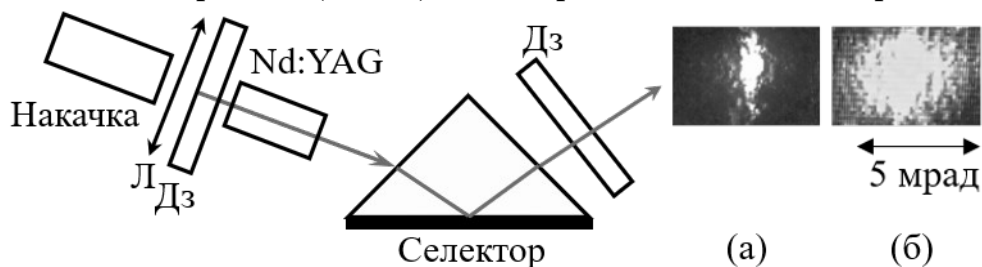


Рис. 5. Схема лазерного резонатора із селектором. На фото поперечний профіль лазерного пучка в дальній зоні: (а) з використанням внутрішньорезонаторного кутового селектора та (б) без нього.

Експериментально реалізовано схему твердотілого лазера з діодною накачкою з одним запропонованим кутовим селектором. Довжина лазерного резонатора становить 50 мм. Діодна накачка на довжині хвилі 808 нм та регульованій потужності до 800 Вт фокусується лінзою Л на лазерному кристалі Nd:YAG через дихроїчне дзеркало Дз з просвітленням на 808 нм, що майже повністю відбиває на довжині хвилі лазерної генерації 1064 нм. Збудження активного середовища відбувається в імпульсному режимі з частотою 20 Гц та тривалістю імпульсу 250 мкс, що відповідає часу життя іонів Nd^{3+} в інверсному стані.

Селектор розміщений між лазерним кристалом і вихідним дзеркалом. На фото показані поперечні розподіли інтенсивності лазерного випромінювання, зроблені на екрані ПЗЗ-камерою на відстані близько 1 м від вихідного дзеркала: на Рис. 5 а представлено поперечний профіль лазерного пучка при генерації з використанням кутового селектора, поперечний профіль лазерного пучка для схеми без селектора зображений на Рис 5 б.

Отже, спостерігається ефект фільтрації поперечних лазерних мод вздовж однієї осі, що проявляється за наявності одного внутрішньорезонаторного кутового селектора. Випромінювання лазера без селектора є неполяризованим. Поляризація відбувається внаслідок використання запропонованої структури, що передбачено розрахунками. Таким чином, отримано одновимірну кутову фільтрацію поперечних мод та поляризацію генерації лазера за допомогою одного селектора.

У четвертому розділі представлено результати моделювання властивостей МДС, в якій матеріал останнього шару характеризується керрівською нелінійністю типу а. Продемонстровані різні режими нелінійного відбивання від структури. Цікавими є бістабільні перемикання між низькими та високими значеннями коефіцієнта відбивання, які виникають при малій інтенсивності падаючого світла. Цей ефект зумовлений значним підсиленням оптичного поля в нелінійному шарі в умовах повного внутрішнього відбивання. Така нелінійна структура була запропонована для використання як оптично-керованого лазерного внутрішньорезонаторного модулятора [5*]

Оптична бістабільність характеризується двома різними стабільними станами при однаковій інтенсивності падаючого променю. Вона може спостерігатися в нелінійних системах із зворотним зв'язком, а саме: в нелінійних інтерферометрах Фабрі – Перо та МДС.

Для МДС коефіцієнт відбивання R та інтенсивність поля I_0 для фіксованого кута падіння θ описується стаціонарною системою рівнянь:

$$R = 1 - \frac{Q(\Delta n)}{\beta}, I_0 = \frac{\Delta n}{n_2} Q(\Delta n) \quad (1)$$

де Q – коефіцієнт підсилення поля, Δn - зміна показника заломлення останнього нелінійного шару.

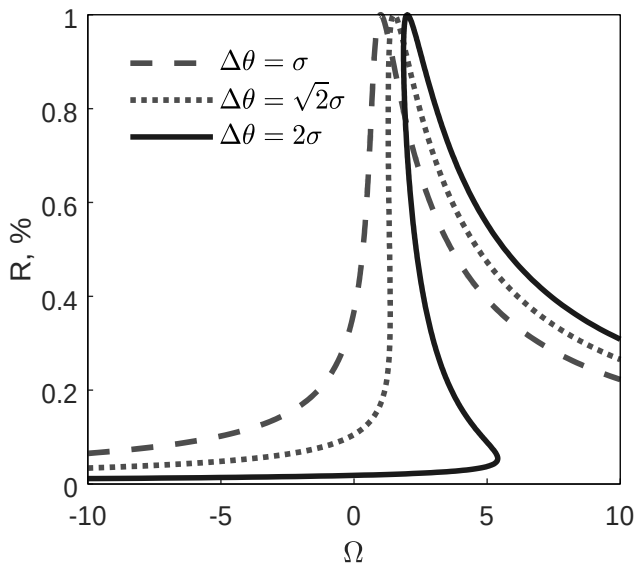
Щоб описати динамічну поведінку коефіцієнта підсилення поля $Q(t)$ та показника заломлення $n(t)$ для МДС з нелінійним шаром, було модифіковано систему лазерних кінетичних рівнянь. Вона набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} Q(t) &= \frac{1}{\tau_1} \left[\beta \cdot \exp \left[\frac{-(\Delta \theta - \alpha \cdot \Delta n)^2}{\sigma^2} \right] - Q(t) \right] \\ \frac{d}{dt} \Delta n(t) &= \frac{-\Delta n(t)}{\tau_{21}} + \frac{1}{\tau_{22}} [n_2 I_0 Q(t) - \Delta n(t)], \end{aligned} \quad (2)$$

де $\Delta \theta$ - кут зміни положення мінімуму, Δn - зміна показника заломлення останнього нелінійного шару, σ – ширина резонансу, α – кутова чутливість

структури; β – максимальне значення коефіцієнта підсилення поля Q , n_2 – нелінійно-оптичний показник заломлення, τ_{21} , τ_{22} – час релаксації та час збудження n_2 , I_0 – інтенсивність падаючого світла.

Розв'язуючи системи рівнянь (1, 2) можна отримати залежності коефіцієнта відбивання R від параметра $\Omega = I_0 n_2 \beta$ для різних початкових точок $\Delta\theta$ (Рис.6). Безрозмірний параметр Ω характеризує лінійну залежність між нелінійним коефіцієнтом показника заломлення n_2 , максимальним значенням коефіцієнта підсилення поля β та інтенсивністю падаючого світла I_0 . Суцільною лінією показано бістабільну поведінку коефіцієнта відбивання. Бістабільність у відбиванні нелінійної МДС подібна до бістабільності у звичайному плоскому хвилеводі [16]. Для граничного випадку $\Delta\theta = \sqrt{2}\sigma$ невизначеність коефіцієнта відбивання має місце при певній критичній інтенсивності.



Це може призвести до динамічних нелінійних процесів, таких як автоколивання. У цьому випадку може мати місце стабільна солітоноподібна просторово-часова неоднорідність.

У **п'ятому розділі** представлено результати дослідження нелінійно-оптичного відгуку полімеру PVDF та його кополімеру P(VDF-TrFE), як матеріалів з кубічною нелінійністю при збудженні одиночними пікосекундними лазерними імпульсами на довжині хвилі 1064 нм

у широкому динамічному діапазоні пікової інтенсивності випромінювання (від 0.01 до 2000 ГВт/см²). Досліджено (i) фотоіндуковані зміни показника заломлення і оптичне поглинання та (ii) генерацію третьої оптичної гармоніки при пікосекундному лазерному збудженні на довжині хвилі 1064 нм.

Рис. 6. Коефіцієнт відбивання R структури в залежності від зміни кута падіння $\Delta\theta$.

Проаналізовано фотоіндуковані зміни повного та приосьового пропускання в порівнянні з піковою інтенсивністю лазера для зразків P(VDF-TrFE) різної товщини (1; 1.2; 1.3; 1.5 та 40 мкм.) – одного із важливих

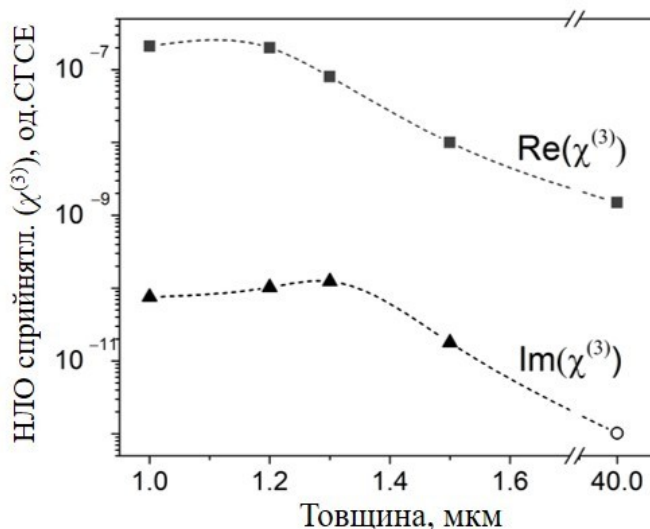


Рис.7. Порівняння дійсних $\text{Re}(\chi^{(3)})$ та уявних $\text{Im}(\chi^{(3)})$ частин кубічної НЛО сприйнятливості в залежності від товщини плівки покриття при піко лазерному збудженні на довжині хвилі 1064 нм. Кружком позначено абсолютне значення $\text{Im}(\chi^{(3)})$ для зразка товщиною 40 мкм.

параметрів покриття (Рис. 7). В результаті проведених експериментів показано, що плівки P(VDF-TrFe) продемонстрували ефективний рефрактивний НЛО відгук – ефект самофокусування – з $\text{Re}(\chi^{(3)}) \sim 10^{-8}$ од.СГСЕ, що насичується при інтенсивності збудження близько 1 ГВт/см^2 . Спостерігалось незначне фотозатемнення плівок $\text{Im}(\chi^{(3)}) \sim 10^{-11}$ од.СГСЕ.

У роботі використовувалася методика дослідження ефективності генерації третьої гармоніки від колоїдних суспензій гармонічних наночастинок (ГНЧ) методом сканування сигналу в напрямку розповсюдження пучка накачки від інтерфейсів комірки з прокачкою колоїдного розчину. Досліджено кополімер P(VDF-TrFe) нанесений на кварцове скло як частину експериментальної комірки для вивчення ефективності генерації третьої гармоніки в колоїдних суспензіях ГНЧ ZnO (Рис. 8).

Звичайні скляні стінки комірки адсорбують ГНЧ під час тривалих нелінійних оптичних вимірювань, що може погіршити оцінку величин ефективності перетворення частоти лазерного випромінювання. Порівняння сигналів комірок, покритих P(VDF-TrFe), зі звичайним склом показало, що використання покриття зменшує адгезію НЧ на його інтерфейсі, що перевіряється реєстрацією сигналу третьої гармоніки. На Рис. 8 показаний сигнал третьої гармоніки, виміряний скануванням інтерфейсів проточної комірки. Експериментальні дані представляють чотири піки, які відповідають інтерфейсам комірки: повітря/скло, скло/рідина, рідина/скло та скло/повітря, відповідно. Спочатку були проведені вимірювання ГТГ на межі розділу проточної комірки з циркуляцією етанолу. Для того, щоб продемонструвати ефективність покриття, концентрація ГНЧ становила $\sim 1 \text{ мг/мл}$, а час циркуляції був до 30 хвилин. Слід зазначити, що експеримент з високою концентрацією НЧ проводився лише для того, щоб продемонструвати ефективність прилипання ГНЧ, що є неправильним для чітких вимірювань в межах методики сканування інтерфейсів.

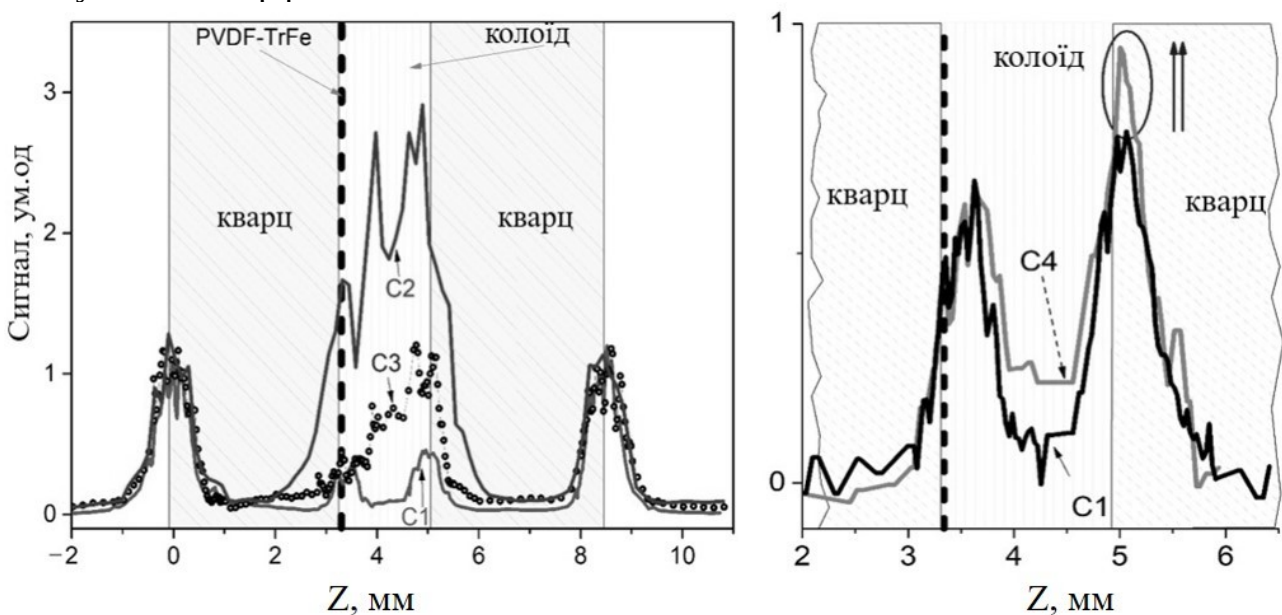


Рис. 8. Сканування протічної комірки з колоїдною суспензією наночастинок. а) сигнали третьої гармоніки з різними концентраціями колоїдної суспензії ГНЧ

ZnO в етанолі: C1 - етанол, C2 - ГНЧ ZnO в етанолі (~ 1 мг/мл), C3 - етанол у системі циркуляції через ~ 30 хв вимірювань колоїдної суспензії ГНЧ ZnO. (б) порівняння початкового відгуку етанолу C1 та C4 етанолу з меншою концентрацією (~ 0.1 мг/мл) колоїдної суспензії ГНЧ ZnO через 30 хв після початку вимірювань. Піки відповідають інтерфейсам проточної комірки.

На наступному етапі колоїдну суспензію відкачували з циркуляційної системи і замінювали чистим етанолом. Отримані результати демонструють відтворюваність вимірювань на інтерфейсі з непокритими та покритими внутрішніми стінками комірки: величина піку третьої гармоніки на поверхні, що не має покриття, збільшилась у 2 рази, тоді як сигнал на поверхні покриття залишався незмінним. В результаті, показано перспективність використання хімічно стійкого та чутливого кополімеру P(VDF-TrFe) як покриття нового типу. Його можна використати для покриття кювет в системах біовізуалізації та для характеристики наночастинок. Завдяки ефективному нелінійно-оптичному відгуку, P(VDF-TrFe) є перспективним для багатьох оптичних застосувань, зокрема у сенсорних пристроях, у надшвидких перемикачах, у лазерах, що генерують ультракороткі імпульси, тощо.

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Вперше показано існування вузького кутового провалу у відбиванні від багатошарової метал-діелектричної резонансної наноструктури, яка складається з наночару металу та діелектричної структури типу дзеркала Брега з потовщеним останнім шаром. Аналіз експериментальних даних для структури $\text{Ag}/[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2]_3$ показує, що ширина резонансу для ТЕ-поляризації становить ~ 0.01 град та для ТМ-поляризації ~ 1 град, що узгоджується з чисельними розрахунками. Проведено порівняння чутливості запропонованої структури як сенсора показника заломлення з відомим плазмонним сенсором за схемою Кречмана. Показано, що діелектрична структура з металевим шаром може збільшити чутливість сенсору майже на два порядки.

2. Досліджено спектрально-кутові характеристики відбивання за допомогою дисперсійних мап (у координатах кут падіння – довжина хвилі) в широкому діапазоні довжин хвиль (400-1600 нм) і кутів падіння оптичного випромінювання (0-90 град). Показано, що існування спектрально-кутових резонансів залежать від локалізації поля в шарах структури.

3. Методами оптичної спектрофотометрії досліджено моди Тамма в резонансних багатошарових метал-діелектричних структурах та ефект оптичної невзаємності спектрів відбивання при збудженні хвиль з протилежних сторін зразка.

4. Знайдено умови існування чотирьох типів кутових резонансів, які залежать від співвідношення між дійсною та уявною частинами діелектричної проникності першого шару структури, а саме: провал, пік, два комбінованих резонанси типу провал/пік, пік/провал. Розраховано та експериментально

реалізовано структуру $\text{Cr}/[\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2]_3$, яка характеризується вузьким піком для ТЕ-поляризації (0.01 град). Показано можливість її застосування в широкоапертурних лазерах для отримання високої якості лазерного пучка.

5. Побудовано аналітичну модель динаміки змін коефіцієнта відбивання при наявності в згаданій структурі останнього шару з нелінійним відгуком. Досліджено умови реалізації низькопорогової оптичної бістабільності в інтенсивності відбитого випромінювання для структур з нелінійно-оптичним відгуком.

6. Досліджена кубічна нелінійність полімерів на основі полівініліденфториду при опроміненні одиночними пікосекундними лазерними імпульсами на довжині хвилі 1064 нм в широкому діапазоні ($0.01 - 2000 \text{ ГВт/см}^2$) пікової інтенсивності випромінювання. Показано, що з ростом пікової інтенсивності випромінювання до 1 ГВт/см^2 плівки кополімеру вініліденфториду з трифторетиленом демонструють ефект самофокусування лазерного пучка.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. J. Li, K. Ueda, L. Zhong, M. Musha, A. Shirakawa, T. Sato, «Efficient excitations of radially and azimuthally polarized $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ceramic microchip laser by use of subwavelength multilayer concentric gratings composed of $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ », Opt. Express, 16, 14, 10841, 2008, doi: 10.1364/OE.16.010841.
2. P. V. Parimi, W. T. Lu, P. Vodo, S. Sridhar, «Imaging by flat lens using negative refraction», Nature, 426, 6965, 404, 2003, doi: 10.1038/426404a.
3. L. Maigyte, K. Staliunas, «Spatial filtering with photonic crystals», Applied Physics Reviews, 2, 1, 011102, 2015, doi: 10.1063/1.4907345.
4. Liu, Wei-Nan, Chen, Rui, Shi, Wei-Yi, Zeng, Ke-Bo, Zhao, Fu-Li and Dong, Jian-Wen. "Narrow-frequency sharp-angular filters using all-dielectric cascaded meta-gratings" Nanophotonics, 9, 10, 3443, 2020. doi: 10.1515/nanoph-2020-0141
5. D. F. Santos, A. Guerreiro, J. M. Baptista, «SPR-based PCF D-type sensor based on a metamaterial composed of planar metals for refractive index sensing», Limerick, Ireland, , 991619, 2016, doi: 10.1117/12.2236522.
6. J. Homola, «Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species», Chem. Rev., 108, 2, 462–493, 2008, doi: 10.1021/cr068107d.
7. S. Wuestner, A. Pusch, K. L. Tsakmakidis, J. M. Hamm, O. Hess, «Overcoming Losses with Gain in a Negative Refractive Index Metamaterial», Phys. Rev. Lett., 105, 12, 127401, 2010, doi: 10.1103/PhysRevLett.105.127401.
8. M. Ozaki, J. -i. Kato, S. Kawata, «Surface-Plasmon Holography with White-Light Illumination», Science, 332, 6026, 218, 2011, doi: 10.1126/science.1201045.

9. R. C. Nesnidal, T. G. Walker, «Multilayer dielectric structure for enhancement of evanescent waves», *Appl. Opt.*, 35, 13, 2226, 1996, doi: 10.1364/AO.35.002226.
10. Patskovsky, S., Kabashin, A. V., Meunier, M., Luong, J. H. T. «Properties and sensing characteristics of surface-plasmon resonance in infrared light», *Journal of the Optical Society of America A*, 20(8), 1644, 2003, doi:10.1364/josaa.20.001644
11. Pervak, V. «Optical coatings for high-intensity lasers», *Optical Thin Films and Coatings*, 667, 2018. doi:10.1016/b978-0-08-102073-9.00018-7
12. Gubaydullin, A.R., Symonds, C., Bellessa, J. et al. «Enhancement of spontaneous emission in Tamm plasmon structures», *Sci Rep* 7, 9014, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-09245-7
13. M. ElKabbash et al., «Fano-resonant ultrathin film optical coatings», *Nat. Nanotechnol.*, 2021, doi: 10.1038/s41565-020-00841-9.
14. A. J. Yuffa, J. A. Scales, «Object-oriented electrodynamic S-matrix code with modern applications», *Journal of Computational Physics*, 231, 14, 4823–4835, 2012, doi: 10.1016/j.jcp.2012.03.018.
15. B. Auguie, A. Bruchhausen, A. Fainstein, «Critical coupling to Tamm plasmons», *Journal of Optics*, 17(3), 035003, 2015. doi:10.1088/2040-8978/17/3/035003
16. V. Yu. Bazhenov, M.S. Soskin, V.B. Taranenko «Spatial hysteresis and switching waves in a nonlinear planar waveguide», *Quantum Electronics*. 16 (11), 1534-6, 1986, doi:10.1070/qe1986v016n11abeh008352

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукові праці, які індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та/або Web of Science Core Collection:

- 1*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, V.V. Multian, V.Ya. Gayvoronsky, S.A. Pullano, D.C. Critello, A.S. Fiorillo «Detection of CBRN agents at the interface with P(VDF-TrFe) film by scanning third harmonic generation» *NATO Science for Peace and Security, Chapter title: Advanced Nanomaterials for Detection of CBRN. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. 2020, ch.12, pp.185-197. doi: 10.1007/978-94-024-2030-2
- 2*. **S.G. Ilchenko**, V.V. Multian, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, S.A. Pullano, A.S. Fiorillo, V.Ya. Gayvoronsky, «Application of P(VDF-TrFE) Glass Coating for Robust Harmonic Nanoparticles Characterization» *Micromachines*, 2021, 12, 41, Impact factor (IF) 2.523. doi: 10.3390/mi12010041
- 3*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Metal-multilayer-dielectric structure for enhancement of s- and p-polarized evanescent waves», *Nanoscale Res Lett.* – 2016, 11, 42, IF 2.812. [doi: 10.1186/s11671-016-1274-3](https://doi.org/10.1186/s11671-016-1274-3)
- 4*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Using metal-multilayer-dielectric structure to increase sensitivity of surface plasmon resonance sensor», *Nanoscale Res Lett.*, 2017, 12, 295, IF 3.064. [doi: 10.1186/s11671-017-2073-1](https://doi.org/10.1186/s11671-017-2073-1)

- 5*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Optical bistability in reflection from metal-multilayer-dielectric structure with Kerr nonlinearity», *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2021, 24 (1), pp. 71-75. doi:10.15407/spqeo24.01.71
- 6*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, N. Kyžas, A. Belosludtsev, «Types of angular resonances for multilayer structures under illumination in total internal reflection», *Conference: 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2019)*, September 6-8. – Sozopol (Bulgaria), 2019, p. 157-160. doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019534
- 7*. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, N. Kyžas, A. Belosludtsev, «Multilayer dielectric structure for mode selection of wide-aperture laser», *Conference: 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2019)*, September 6-8, 2019. – Sozopol (Bulgaria), 2019, p. 184-187. doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019492

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації на вітчизняних та міжнародних конференціях:

1. E.O. Berezhniy, M.M. Burykin, **S.G. Ilchenko**, A.P. Ostroukh, R.A. Lymarenko, «Dynamic holographic grating in liquid crystalline polymer», *International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013)*, 9-13 Sept. 2013: abstract. - Sudak (Ukraine), 2013, p. 363
2. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Color selectivity of surface plasmon holograms in Otto configuration», *Material of IV International Conference for Young Scientists "Low Temperature Physics" (ICYS-LTP)*, June 2-5, 2015: abstract. – Kharkiv (Ukraine), 2015, p. 64.
3. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, E. I. Zabello, V.B. Taranenko, «Surface plasmon resonance for studying dynamic of laser ablation process», *Scientific and Technical Conference «Laser Technologies. Lasers and Their Application» (LTLA-2015)*, June 9, 2017: abstract. – Truskavets (Ukraine), 2017, pp. 62-64
4. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Metal-multilayer-dielectric structure for enhancement of evanescent waves», *International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2015)*, August 26-29, 2015: abstract. – Lviv (Ukraine), 2015, p. 363
5. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Evanescent-wave dynamic gratings in liquid crystalline polymers at surface plasmon resonance», *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2015)*, August 26-29, 2015: abstract. – Lviv (Ukraine), 2015, p.366
6. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Selective metal-dielectric multilayer structure for laser modulation», *7-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL-2016)*, September 12-15, 2016: abstract.- Odessa (Ukraine), 2016, p. 173.

7. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Optimization of metal multilayer-dielectric structure for plasmonic holography», *International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2016)*, August 24-27, 2016: abstract. – Lviv (Ukraine), 2016, p.419
8. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Metal-multilayer-dielectric plasmonic structure as introcavity laser modulator», *Scientific and technical conference «Laser technologies. Lasers and their application» (LTLA-2017)*, June 7-9, 2017: abstract. - Truskavets (Ukraine), 2017, p. 35
9. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Nonlinear effects in resonant multilayer structure», *Scientific and technical conference «Laser technologies. Lasers and their application» (LTLA-2017)*, June 7-9, 2017: abstract. - Truskavets (Ukraine), 2017, p. 26
10. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Nonlinear properties of plasmon-waveguide modes in resonant multilayer structure», *International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2017)*, August 23-26, 2017: abstract. – Lviv (Ukraine), 2017, p.681
11. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Angular selective multilayer dielectric structure», *Scientific and technical conference «Laser Technologies. Lasers and their application» (LTLA-2019)*, June 11-13, 2019: abstract. - Truskavets (Ukraine) 2019, p. 54-56
12. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, N. Kyžas, A. Belosludtsev. «Theoretical and experimental total internal reflection investigation of multilayered metal-dielectric structure», *7th International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2019)*, August 27 – 30, 2019: abstract. – Lviv (Ukraine), 2019, p. 506
13. **S.G. Ilchenko**, V.V. Multian, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, S.A. Pullano, A.S. Fiorillo, V. Ya. Gayvoronsky, «Optical properties of polyvinylidene fluoride nanolayers», *7th International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2019)*, August 27 – 30, 2019: abstract. – Lviv (Ukraine), 2019, p. 505
14. **S.G. Ilchenko**, V. V. Multian, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, S.A. Pullano, A.S. Fiorillo, V. Ya. Gayvoronsky, «P(VDF-TrFe) films for harmonic nanoparticles characterization», *8th International Conference «Nanotechnologies and Nanomaterials» (NANO-2020)*, August 26 – 29, 2020: abstract. – Lviv (Ukraine), 2020, p.426
15. R.A. Lymarenko, **S.G. Ilchenko**, V.B. Taranenko, «Topological vortices on dispersion maps of resonant metal-dielectric coatings», *8th International Conference «Nanotechnologies and Nanomaterials» (NANO-2020)*, August 26 – 29, 2020: abstract. – Lviv (Ukraine), 2020, p 424
16. **S.G. Ilchenko**, R.A. Lymarenko, V.B. Taranenko, «Reflection from nonlinear resonant multilayer structure», *8th International Conference «Nanotechnologies and Nanomaterials» (NANO-2020)*, August 26 – 29, 2020: abstract. – Lviv (Ukraine), 2020, p. 425

АНОТАЦІЯ

Ільченко С.Г. Оптичні резонансні властивості метал-діелектричних багаточарових наноструктур. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 «оптика, лазерна фізика». Міжнародний центр «Інститут прикладної оптики» НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена експериментальному дослідженню нової метал-діелектричної багаточарової наноструктури, в якій спостерігається вузький спектрально-кутовий резонанс (<1 град) при кутах падіння випромінювання більших за критичний кут повного внутрішнього відбивання.

Проаналізовано дисперсійні криві для коефіцієнта відбивання та підсилення поля в широкому діапазоні довжин хвиль (400-1600 нм) і кутів падіння оптичного випромінювання (0-90 град). Експериментально досліджено моди Тамма в структурі та показано їх взаємодію з хвилеводними модами.

Знайдено умови існування чотирьох типів кутових резонансів, які залежать від співвідношення між дійсною та уявною частинами діелектричної проникності першого шару структури. Показано можливість її застосування в широкоапертурних лазерах для отримання високої якості лазерного пучка або високочутливих сенсорів.

Отримано систему диференціальних рівнянь, що описує динаміку зміни коефіцієнта відбивання при кутах падіння близьких до резонансного для структури, в якій матеріал останнього шару характеризується керрівською нелінійністю типу а. Показано існування бістабільності коефіцієнта відбивання.

Досліджена кубічна нелінійність полімерів на основі полівініліденфториду при опроміненні одиночними пікосекундними лазерними імпульсами на довжині хвилі 1064 нм в широкому діапазоні ($0.01 - 2000$ ГВт/см²) пікової інтенсивності випромінювання. Завдяки ефективному нелінійно-оптичному відгуку, кополімер вініліденфториду з трифторетиленом є перспективним для багатьох оптичних застосувань, зокрема в сенсорних пристроях, в надшвидких перемикачах, в лазерах, що генерують ультракороткі імпульси, тощо.

Ключові слова: метал-діелектричні багаточарові наноструктури; сенсор зміни показника заломлення; лазерний модулятор; лазерний кутовий селектор; нелінійно-оптичні властивості полімерів на основі полівініліденфториду.

АННОТАЦИЯ

Ильченко С.Г. Оптические резонансные свойства металл-диэлектрических многослойных наноструктур. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «оптика, лазерная физика». Международный центр «Институт прикладной оптики» НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию новой металл-диэлектрической многослойной наноструктуры, которая обладает узким спектрально-угловым резонансом (<1 град) при углах падения излучения, превышающих критический угол полного внутреннего отражения.

Проанализированы дисперсионные кривые для коэффициента отражения и усиления поля в широком диапазоне длин волн (400-1600 нм) и углов падения оптического излучения (0-90 град). Экспериментально исследованы моды Тамма в структуре и показано их взаимодействие с волноводными модами.

Найдены условия существования четырех типов угловых резонансов, которые зависят от соотношения между действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости первого слоя структуры. Показана возможность ее применения в широкоапертурных лазерах для получения высокого качества лазерного пучка или высокочувствительных сенсорах.

Получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику изменения коэффициента отражения при углах падения близких к резонансному для структуры с последним слоем керровской нелинейностью типа а. Показано существование бистабильности коэффициента отражения.

Исследована кубическая нелинейность полимеров на основе поливинилиденфторида при облучении одиночными пикосекундными лазерными импульсами на длине волны 1064 нм в широком диапазоне (0.01 – 2000 ГВт/см²) пиковой интенсивности излучения. Благодаря эффективному нелинейно-оптическому отклику, сополимер винилиденфторида с трифторхлорэтиленом является перспективным для многих оптических применений, в частности в сенсорных устройствах, в сверхбыстрых переключателях, в лазерах, генерирующих ультракороткие импульсы, и т.д.

Ключевые слова: металл-диэлектрические многослойные наноструктуры; сенсор изменения показателя преломления; лазерный модулятор; лазерный угловой селектор; нелинейно-оптические свойства полимеров на основе поливинилиденфторида.

ABSTRACT

Ilchenko, S.G. Optical resonance properties of metal-dielectric multilayer nanostructures. – The manuscript.

Thesis for Candidate of Sciences degree (equivalent to Ph.D.) in Physics and Mathematics, specialty 01.04.05 Optics and Laser Physics, International center “Institute of Applied optics”, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the experimental research of a new metal - dielectric multilayer nanostructure. It combines the properties of multilayer dielectric structures, such as Bragg mirrors, and metal nanolayers. Its main feature is the narrow spectral-angular resonance (<1 deg) at incident angles greater than the critical angle of total internal reflection. The sensitivity of the proposed structure as a refractive index sensor is compared with a known plasmon sensor according to the Kretschman scheme. It is shown that a dielectric structure with a metal layer can increase the sensitivity of the sensor by almost two orders of magnitude.

The characteristics of the optimized structure, obtained in calculations, have been confirmed experimentally. Analysis of the dispersion curves reveals the region of narrow resonance for the reflection and field gain in a wide range of wavelengths (400-1600 nm) and incident angle (0-90 deg). Tamm modes in the resonant structure have been experimentally investigated and their interaction with waveguide modes has been discussed.

The dependence of the shape of reflection coefficient at the resonant angle on the ratio between the real and imaginary parts of the dielectric constant of the first layer of the structure is analyzed. It is demonstrated that depending on the material, the shape of the curve can have a peak or deep minimum at resonant conditions. These effects can be used in intracavity laser selectors or highly sensitive sensors.

Due to the significant field amplification in the last layer of the structure, it has been proposed to use in it a material with a nonlinear Kerr type response. A system of differential equations is derived to describe the dynamics of the dependence of the reflection coefficient on the intensity of the incident radiation at angles of incidence close to the resonance. The existence of bistability of the reflection coefficient is denoted.

Polyvinylidene fluoride-based polymer was chosen as materials with cubic nonlinearity. The nonlinear optical properties of copolymer polyvinylidene fluoride with trifluoroethylene (P(VDF-TrFE)) and its interaction with ZnO nanoparticles when excited by single picosecond laser pulses at a wavelength of 1064 nm in a wide range of peak radiation intensities from 0.01 to 2000 GW/cm² are investigated experimentally. Outlook for the use of copolymer P(VDF-TrFE) as a chemically stable and sensitive material is given. Due to its efficient nonlinear optical response, P(VDF-TrFE) is promising for use in optics, for example, as a sensor or ultra-fast light switch.

Keywords: metal-dielectric multilayer nanostructures; refractive index change sensor; laser modulator; laser angle selector; nonlinear optical properties of polymers based on PVDF.