

ВІДГУК

офіційного опонента **Фітьо Володимира Михайловича** на дисертаційну роботу
“Оптичні резонансні властивості метал-діелектричних багат шарових наноструктур” Ільченко Світлани Григорівни, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Актуальність теми дисертаційної роботи. Резонансні явища проявляються в системах, які відносяться до різних напрямків науки і техніки, що підтверджується такими термінами: оптичний резонатор лазерів, кварцовий резонатор, механічний резонатор, LC-резонатор і т.д. Резонансні явища є досить чутливими до зміни параметрів системи, особливо при резонансі з високою добротністю. Останнім часом досліджуються наносистеми, в яких можливий резонанс в оптичному діапазоні довжин хвиль. Прикладам таких систем можуть бути діелектрична ґратка на діелектричній підкладці (при резонансі коефіцієнт відбивання від такої структури рівний одиниці), металева або діелектрична ґратка на металевій підкладці (при резонансі коефіцієнт відбивання при ретельно підібраних параметрах системи рівний нулю), тонка металева плівка із золота або срібла на основі призми (при резонансі коефіцієнт відбивання також може бути рівним нулю). При зміні якогось параметра системи резонанс порушується і він може бути відновлений на іншій довжині хвилі або при іншому куті падіння пучка світла на систему. Тому такі структури, в яких можливий резонанс з суттєвим підвищенням електромагнітного поля, використовуються як сенсори зміни показника заломлення зовнішнього середовища, що прилягає до структури. Результати досліджень резонансних явищ в оптичному діапазоні, з точки зору застосування таких структур в якості сенсорів, викладені в численних публікаціях та обширних оглядах, де аналізується більше тисячі посилань. Особливо багато досліджень проведено багат шарових структур, які мають практичне застосування

в якості сенсорів. Адже такі структури є одновимірні, тому вони прості у виготовленні та в проведенні чисельного моделювання їх характеристик. Але навіть широко досліджувані багат шарові структури можна вдосконалювати як з точки зору їх практичного застосування так і виявлення, що важливо, у таких структурах нових фізичних ефектів.

Тому наукові результати теоретичних і експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання по даній проблематиці, що відображені в дисертації Ільченко С.Г., є актуальними та своєчасними, і мають як фундаментальне так і прикладне значення.

Необхідно відзначити, що великою мірою наукові результати дисертаційної роботи отримані в результаті проведення досліджень у Міжнародному центрі «Інститут прикладної оптики» НАН України. Дослідження, що становлять зміст дисертації, виконувались у рамках наступних держбюджетних тем: 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; НДР «Розвиток лазерних методів напилення, прецизійних вимірювань та створення плазмонних голографічних структур» № держреєстрації 0116U004563, 2016- 2018 р.; НДР «Дифракційні та дисперсійні наноструктури: фундаментальні властивості та методи створення», № держреєстрації 0112U007774, 2012-2017 р; 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.

Наукова новизна. В дисертацій роботі переконливо показана наукова новизна отриманих результатів. До найбільш значущих та цікавих можна віднести наступне:

1. Запропонована нова багат шарова метал-діелектрична структура (МДС), яка характеризується вузьким кутовим відгуком коефіцієнта відбивання (з

шириною резонансу ≤ 1 град) та високим коефіцієнтом підсилення поля в останньому шарі при резонансному куті падіння.

2. Знайдено умови існування вузьких спектрально-кутових резонансів, оптичні поля яких найбільші в останньому діелектричному шарі, та широких резонансів Тамма, поля яких локалізовані на межі метал-діелектрик.
3. Теоретично та експериментально показана можливість отримання вузького піку коефіцієнта відбивання (< 1 град) у запропонованій МДС, в якій наночастиці металу замінені на шар діелектрика із затуханням.
4. Показано існування низькопорогової бістабільності коефіцієнта відбивання для багаточислової МДС з керрівською нелінійністю останнього шару при кутах падіння, близьких до резонансного.
5. Вперше виявлено нелінійно-оптичний відгук полімерів PVDF і кополімеру вініліденфториду з трифторетиленом P(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/см². Встановлено ефективність генерації оптичних гармонік полімерів, поверхня яких була функціоналізована наночастинами ZnO.

Обґрунтованість та достовірність наукових висновків. Наукові дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, проводились по крайній мірі з 2013 р. до 2021 р. Цей висновок можна зробити на основі виходу з друку перших публікацій у 2013 році. Був достатній час отримання необхідного досвіду для наукових досліджень, детального ознайомлення з науковими досягненнями в даній проблематиці та їх аналізу, планування та проведення наукових досліджень. Аналізуючи дисертаційну роботу на рахунок достовірності можна зробити ще такий висновок: застосовано надійні методи теоретичного та числового аналізу в процесі отримання основних результатів дисертаційного дослідження. Отримані результати не суперечать науковим положенням, що висвітлені у наукових виданнях високого рівня. Результати багатьох досліджень опубліковані в наукових періодичних виданнях з високим імпакт-фактором. Слід

також зазначити відповідність на кількісному рівні результатів теоретичних досліджень, числового моделювання та експериментальних даних, що підтверджують ряд рисунків, зокрема рис. 2.3 та рис.2.12.

Основні результати дисертації доповідались на семінарах Міжнародного центру «Інститут прикладної оптики» НАН України, в Інституті фізики 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).

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в наступному: отримані результати, що наведені в дисертаційній роботі, можна використати для проектування та розроблення різноманітних пристроїв нового типу. Окремо потрібно відзначити:

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.
2. Результати досліджень МДС можна використати для створення сенсорів зміни показника заломлення з вищою чутливістю в порівнянні з чутливістю існуючих на основі ефекту поверхневого плазмон-поляритонного резонансу.
3. Завдяки ефективному нелінійно-оптичному відгуку структури P(VDF- TrFE) є перспективним для багатьох оптичних застосувань, таких як сенсори та надшвидкі перемикачі.

Повнота викладення здобувачем основних результатів. Матеріали представлено в семи наукових публікаціях у наукових виданнях, що індексуються

наукометричними базами Scopus та Web of Science, зокрема 3 публікації у закордонних періодичних виданнях, розділ у монографії на англійській мові, у двох матеріалах міжнародної конференції та в українському фаховому виданні, а також у 16-ти тезах вітчизняних та міжнародних наукових конференцій. Дисертаційна робота повністю викладена в наукових публікаціях дисертантки, які відповідають встановленим вимогам.

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації й автореферату. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел (135 найменувань). Обсяг дисертації складає 120 сторінок. Вона містить 55 рисунків та 5 таблиць. В цілому дисертаційна робота написана нормативною українською мовою і на задовільному стилістичному рівні. Застосована наукова термінологія є загальноживаною, стиль викладу результатів наукових досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечує адекватне сприйняття прочитаного. Результати об'ємних досліджень викладені стисло та конкретно.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації, написаний нормативною українською мовою та з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти та науки України, зокрема вимогам, що наведені в документі з назвою “Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”

В цілому дисертаційна робота справляє на читача гарне враження своєю актуальністю, новизною, практичним значенням, і показує, що автор освоїв широкий спектр теоретичних і прикладних знань та добре освоїв методи експериментальних досліджень. При виконанні дисертаційної роботи використані сучасні методи досліджень, а сам текст дисертації супроводжується високоінформаційним графічним матеріалом (рисунки 2.7, 2.8, 2.9, 3.1, 3.2, 3.5 та інші).

Зауваження до дисертаційної роботи. Попри високу якість дисертаційної роботи можна знайти дрібні огріхи різноманітного характеру.

1. Для уникнення нестійкості чисельного розв'язку в діелектричну і магнітну відносні проникності діелектричних шарів додаються уявні частини порядку величини 10^{-5} (див. формулу 2.20). Величина такого порядку ніяким чином не обґрунтована. Може так статися, що при вузьких резонансах ця добавка може в більшій чи меншій мірі вплинути на результат розрахунку і бути причиною не співпадіння з експериментальними результатами.
2. В дисертаційній роботі описана та досліджена багатошарова структура, яка характеризується вузькими резонансними піками і великою напруженістю поля в останньому діелектричному шарі, рис. 2.13. Чим вужчі резонансні піки (висока добротність), тим більше прояв резонансу буде чутливим до випадкових змін товщин шарів та показників заломлення. В дисертації наведено мало матеріалу, що стосується впливу неточності виготовлення на характеристики багатошарових структур.
3. На рис. 3.6а показано, що максимальний коефіцієнт відбивання від багатошарової структури рівний одиниці. Насправді коефіцієнт відбивання від структури, в якій є поглинаючий шар, менший одиниці. Тому потрібно було в тексті написати, який насправді максимальний коефіцієнт відбивання при резонансі і наскільки він близький до одиниці.
4. На стор. 61 наведена фраза: «Типова ширина кутового піку при відбиванні становить 0.1 - 1 градус, що співпадає з **низьким показником розбіжності** лазерних мод.» Це речення не є зрозумілим.
5. На стор. 45 присутня незрозуміла фраза: «Розрахована межа коефіцієнту підсилення для такої структури становить більше десяти тисяч за **рахунок надзвичайно вузького кута падіння**.» На тій же сторінці «...що відповідає **розходимості** лазерного променю.». Мабуть «...**розбіжності**...»

6. В таблиці 2.1 (стор. 43) для Nb_2O_5 $2.3216^2 \neq 5.3901$ ($n^2 \neq \epsilon$). В тій же таблиці наведена товщина скла **$1.2122 \cdot 10^{-8}$** нм, що не відповідає дійсності. Аналогічні помилки наявні в таблиці 3.1 на стор. 63 ($n^2 \neq \epsilon$ для SiO_2).
7. На мій погляд, терміни «затухаючі хвилі», «притиснуті хвилі» не точно передають фізику процесу.
8. Вісь на рис. 2.6б підписана «...кутові **мінути**», повинно бути «... кутові хвилини».
9. В описі до більшості рисунків підрозділу 2.3 не наведено кількості шарів в багат шаровій структурі з високим та низьким показниками заломлення.
10. На стор. 78 дисертації присутні посилання [5,6], які нібито стосуються лазерних резонаторів. Насправді ці посилання згідно списку літератури стосуються сенсорів.
11. В тексті дисертації наявні стилістичні та граматичні помилки, наприклад: на стор. 26 «...ефективність генерації оптичних гармонік **полімерів...**», на стор. 12 «Постійний **інтерес** до створення та дослідження...». Мабуть краще писати «Постійна **зацікавленість** до створення та дослідження», на стор. 18 «...поверхневими плазмонами **навиваються** хвилі...», на стор. 19 «...менш **оптично густе** середовище...», на стор. 22-23 «...**поперечним магнітним (ТМ) світловим променем...**», на стор. 24 «...товщини пари шарів **призаодить** до зміщення спектру.», стор. 30 «...має імітувати **справжню** людський дотик [60].», стор. 33 «...забезпечує **ефективну** оновлення колоїдної суспензії...», стор. 34 «...здатність до самоочищення **індуковану** ультрафіолетом [82].», стор. 61 «...входить **популярна** довжина хвилі твердотільного лазера на $\text{Nd:YAG} - 1064$ нм.», стор. 67 «На Рис. 3.14 а наведено **розрахунки форми залежності коефіцієнту відбивання**», На стор. 70 «Діод накачування (6) на довжині хвилі 808 нм регульованої потужності до **800** Вт фокусується лінзою (5) на лазерному кристалі Nd:YAG ...», мабуть не 800 Вт, а 8 Вт., можливо я помиляюсь.

Проте, наведені недоліки не приводять навіть до невеликого помилкового сприйняття змісту дисертації, не зменшують наукову новизну та практичну цінність, тому не мають жодного впливу на остаточний висновок про дисертаційну роботу. Більшість з недоліків появились через неуважність автора дисертації.

Загальні висновки. Викладені думки дають можливість стверджувати, що дисертаційна робота Ільченко Світлани Григорівни є завершеним науковим дослідженням, в якій описані науково обґрунтовані результати: 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; розроблено лазер з внутрішньорезонаторним кутовим селектором з фільтрацією поперечних мод та продемонстровано підвищення яскравості та якості пучка широкоапертурного лазера; побудовано аналітичну модель змін коефіцієнта відбивання при наявності в багатошаровій структурі останнього шару з нелінійним відгуком та знайдено умови реалізації низькопорогової оптичної бістабільності в інтенсивності відбитого пучка; досліджена кубічна нелінійність полімерів на основі полівініліденфториду при опроміненні одиночними пікосекундними лазерними імпульсами, показано, що з ростом пікової інтенсивності випромінювання до 1 ГВт/см^2 плівки кополімеру вініліденфториду з трифторетиленом демонструють ефект самофокусування лазерного пучка.

В роботі переконливо показана наукова новизна і достовірність отриманих результатів та їх практична цінність.

За актуальністю розглянутих задач, обсягом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає вимогам які пред'являється до кандидатських дисертацій, а її тема та зміст відповідають паспорту спеціальності 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Також враховуючи те, що наукові дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі, проводились практично на протязі восьми років, можна

стверджувати, що Ільченко С.Г. є кваліфікованим спеціалістом по спеціальності 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Дисертація відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт поданих на здобуття наукового ступеня кандидата наук, зокрема вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти та науки України, що наведені у документі з назвою “Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор **Ільченко Світлана Григорівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.**

Офіційний опонент Лауреат премії ім. І.П. Пулюя
Президії НАН України, доктор фіз.-мат. наук,
професор, професор кафедри фотоніки
Національного університету “Львівська політехніка”

В.М. Фітьо

Підпис Фітьо В.М. засвідчую,

Вчений секретар

Національного університету “Львівська політехніка”

Р.Б. Брилинський