

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

на правах рукопису

ЛИШЕНКО КОСТЯНТИН ПАВЛОВИЧ

АНІЗОТРОПНІ ТА НЕЛІНІЙНІ ПОВЕРХНЕВІ ПОЛЯРИТОНИ  
ПРИ НАЯВНОСТІ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ.

01.04.03 - Радіофізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття вченої ступені  
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993



Робота виконана в Київському університеті ім. Тараса Шевченка

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,  
професор Стрижівський Володимир Леонідович.

Офіційні опоненти :

- доктор фізико-математичних наук, професор Дмитрук М.Л.;
- доктор фізико-математичних наук, зав. лаб. Сєрїков А.А.

Провідна організація - Інститут фізики АН України, м. Київ.

Захист відбудеться - 19 - квітня 1993 р.  
об 16<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої ради К 068.18.01.  
при Київському університеті ім. Тараса Шевченка.  
252127, Київ-127, просп. акад. Глушкова, 6,  
радіофізичний факультет Київського університета.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці  
Київського університету.

Автореферат розіслано - 18 - березня 1993 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради

канд. фіз.-мат. наук,  
доцент Шкавро А.Г.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00803134 (J)

# ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

## Актуальність теми.

В останній час велика увага приділяється проблемі поверхневих поляритонів (ПП) - макроскопічних електромагнітних хвиль, які розповсюджуються вздовж поверхонь ( границь ) розподілу середовищ. Такий інтерес визначається цілим рядом факторів. По-перше, ПП містять надзвичайно багату інформацію про властивості поверхонь та приповерхневих областей різних середовищ. Слід особливо підкреслити, що це відноситься не тільки до одиночної границі розділу, а і до багатокомпонентних систем, що містять шари малої товщини порядку довжини хвилі оптичного випромінювання - наприклад, тонкі плівки на поверхнях діелектриків та напівпровідників, перехідні шари, шорховатості, двовимірних структур, надрешіток, слабких полярних коливань, резонуючих з ПП, та інш. В останні роки вивчаються також анізотропія та нелінійність різних середовищ за допомогою ПП. Можна стверджувати, що вивчення і використання закономірностей ПП складають вже органічну частину сучасної фізики поверхні. По-друге, ПП можуть використовуватися в різноманітних прикладних устроях твердотільної оптоелектроніки, інтегральної оптики, мікроелектроніки. Такі можливості зростають при переході до анізотропних та нелінійних ПП, виникаючих поблизу границі розділу середовищ, для одного із яких ( чи обох ) діелектрична проникливість залежить від напрямку розповсюдження в ньому електромагнітної хвилі або від напруженості її електричного поля. При цьому стають

різноманітнішими в порівнянні з лінійним ізотропним наближенням варіанти поляризаційної структури ПП, їх областей існування. Виникає ряд принципово нових якостей, важливих у прикладному аспекті, зокрема, для нелінійних ПП ( НПП ) виникає залежність закону дисперсії та інших характеристик від потоку енергії, що відноситься до данного НПП. Остання обставина відкриває можливість створення інтегрально-оптичних пристроїв на основі НПП з управлінням шляхом зміни оптичної інтенсивності. Великий практичний інтерес викликає реалізація оптичної бістабільності на НПП. Виникнення нових властивостей і закономірностей у ПП може мати місце також при наявності поблизу поверхні каналу електропровідності, виникаючий, наприклад, внаслідок викривлення енергетичних зон у напівпровідниках та діелектриках у приповерхневій області. Справа в тому, що наявність поверхневої електропровідності ( ПЕ ) еквівалентна порушенню неперервності тангенціальних компонент магнітного поля на границі поділу середовищ, а зміна характеру граничних умов відображається на властивостях ПП. Ці аспекти аналізувалися в лінійному ізотропному наближенні ( зокрема в працях Дмитрука М.Л., Литовченко В.Г. і співр. ). В той же час дослідження закономірностей та характеристик ПП при одночасному впливі ПЕ, а також оптичної нелінійності чи ( або ) анізотропії контактуючих середовищ раніше не проводилися, хоча і викликають значний інтерес.

В цьому зв'язку в дисертації поставлена мета :

Вивчити дисперсійні енергетичні поляризаційні властивості анізотропних та нелінійних ПП у присутності ПЕ; визначити можливість спектроскопії ПП для аналізу поверхневих каналів

електропровідності; вказати напрямки використання ПЕ у прикладних пристроях, заснованих на застосуванні поверхневих хвиль. Дослідження проводилися по двом основним напрямкам : по-перше, розглядалися моди ПП, що існують поблизу одинокієї границі розділу двох середовищ, одне із яких анізотропне або ( та ) нелінійне та володіє лінійною ( нелінійною ) ПЕ; по-друге, розв'язувалися задачі про збудження ПП у присутності лінійної та нелінійної ПЕ методами ослабленого повного внутрішнього відбивання ( ОПВВ ) та змуженого комбінаційного розсіювання ( ВКР ) світла.

### Наукова новизна.

Вперше досліджені характеристики анізотропних та нелінійних ПП у присутності ПЕ. Знайдені аналітичні розв'язки та проаналізовані вплив ПЕ на дисперсію і енергетичні поляризаційні закономірності ПП. Вперше розв'язана задача про збудження ПП методами ОПВВ у присутності нелінійної ПЕ; передбачено виникнення оптичної мультистабільності при відбиванні світла в системі призма-азор-кристал, який володіє нелінійною ПЕ. Вперше розглянуте стаціонарне параметричне підсилення стоксової хвилі та ПП, зв'язаних квадратичною нелінійністю середовища, у полі заданної хвилі накачки при наявності як лінійної, так і нелінійної ПЕ. Запропонований новий механізм виникнення нелінійних ПП - за рахунок нелінійності ПЕ.

### Практична цінність.

Практичне значення дисертації визначається тим, що розв'язані в ній задачі відкривають нові перспективи у створенні приладів та пристроїв інтегральної оптики, оптоелектроніки, що використовують ПП, у присутності лінійної чи нелінійної ПЕ. Управління

параметрами таких приладів можна здійснювати зовнішніми електричними (магнітними) полями або шляхом зміни інтенсивності оптичного випромінювання (у нелінійних випадках). У роботі такому теоретично обґрунтовано ефективність методів спектроскопії ПІ при вивченні поверхневих каналів електропровідності.

#### Апробація роботи.

Основні результати роботи доповідалися на :

1. XIV Міжнародній конференції по когерентній та нелінійній оптиці, Ленінград, 1991 р.
2. XX Всесоюзному з'їзді по спектроскопії, Київ, 1988 р.
3. VIII Всесоюзній конференції по взаємодії лазерного випромінювання з середовищем, Ленінград, 1990 р.
4. Всесоюзних та Республіканських школах-семінарах: Сімферополь, 1990 р. ; Суми 1991 р. ; Кам'янець-Подільський 1992 р.

#### Публікації.

Основний зміст дисертації відображено у 7 публікаціях (з них 4 статті), список яких приводиться у кінці автореферату.

#### Структура і об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступу, трьох глав, заключення та списку цитованої літератури з 102 назв; у кінці кожної глави сформульовані основні висновки по отриманим в ній результатам. Загальна кількість сторінок 112, у тому числі 25 малюнків на 16 сторінках.

### З М І С Т   Р О Б О Т И

У вступі обґрунтовується актуальність досліджень властивостей

III у присутності ПЕ; проводиться огляд літератури з аналізом сучасного стану проблеми; дається коротка анотація усіх глав дисертації.

Перша глава дисертації присвячена вивченню III, виникаючих поблизу плоскої границі розділу двох середовищ, одне із яких лінійне та ізотропне, а друге - анізотропне і володіє ПЕ (їх діелектричні проникливості означимо відповідно  $\epsilon_2$  та  $\epsilon$ ). Наявність ПЕ враховуємо, використовуючи модель Стерна, - замінюємо квазідвовимірний приповерхневий канал електропровідності ідеальною з дуже-провідністю площиною (модель типу двовимірного металу):  $\sigma(\omega) = \sigma_0 (1 - i\omega\tau_2)^{-1}$ , здесь  $\sigma_0 = e^2 N_s \tau_2 m^*$  - провідність на постійному струмі,  $\tau_2^*$  - час релаксації імпульсів електронів у приповерхневій області,  $m^*$  та  $N_s$  відповідно їх ефективна маса і концентрація. Вибір такої моделі виправданий, зокрема, тим, що ширина каналу провідності набагато (в десятки, сотні разів) менша за глибину просторової локалізації полів III; а довжини хвиль III, що нас цікавлять, - відповідної міжелектронної відстані. При низьких частотах величина ПЕ дійсна і відповідає за металічне гасіння III, а при високих частотах основну роль грає уявна частина  $\sigma$ . Зпочатку глави розглянуто ізотропне наближення (розділ I.I). У цьому випадку можна окремо вивчати III s- та p-типів. Виявляється, що лінійні III s-типу як без, так і в присутності ПЕ не існують. Знайдені та проаналізовані дисперсійні та енергетичні характеристики III p-типу при наявності ПЕ. Виявляється, що ПЕ значно розширює область існування III, котрі тепер можуть збуджуватись і в тих спектральних діапазонах, для яких значення діелектричних проникливостей обох контактуючих

середовищ додатні. З ростом величини ПЕ значення хвильового числа  $\Pi$  для фіксованої частоти монотонно зменшується, глибина проникнення полів  $\Pi$  у контактуючі середовища, а разом з нею і відповідаючий  $\Pi$  потік енергії, збільшується. В закінчення розділу I.1. розглянуто вплив нелінійності ПЕ на властивості і характеристики  $\Pi$ . Як можливі механізми виникнення нелінійності ПЕ обговорюються ефекти квантових переходів під впливом полів  $\Pi$  між різними підрівнями приповерхневої потенціальної ями, магнітодипольної взаємодії, лоренцівської нелінійності. Показано, що з ростом амплітуди напруженості приповерхневих полів значення хвильових векторів  $\Pi$  монотонно зменшуються, а величини потоків енергії, навпаки, зростають (для чисельних розрахунків використовувалася модель керовської нелінійності ПЕ:  $\sigma_{NL} = \sigma + \sigma_1 |\hat{E}|^2$ , де  $\hat{E}$  - напруженість електричного поля  $\Pi$  на границі поділу). Одним із головних параметрів розвинутої теорії є відношення характеристичної частоти поверхневих носіїв струму ( $\Omega$ ) до бігучої частоти  $\Pi$  ( $\omega$ ) -  $\Delta = \Omega / \omega$ , де  $\Omega = 4\pi N_s e^2 (m^* c)^{-1}$ . У розділі I.2 знайдено загальне дисперсійне рівняння для  $\Pi$  у випадку, коли діелектрична проникливість одного із контактуючих середовищ та його ПЕ - анізотропні величини. Аналітичний розв'язок цього рівняння у загальному випадку знайти не вдається, тому аналіз характерних властивостей  $\Pi$ , які зумовлені впливом анізотропії, був зв'язаний з розглядом найбільш поширених на практиці геометрій кристалічного зрізу по відношенню до орієнтації головних осей тензора діелектричної проникливості ( $\hat{\epsilon}$ ). При цьому передбачено існування  $\Pi$  третього типу - коли обидві величини тензора  $\hat{\epsilon}$  мають додатні значення. В розділі I.3. розглянуто

випадок, коли обидва контактуючих середовища ізотропні, а ПЕ, існуюча на границі їх поділу - анізотропна. Така ситуація не заборонена із загальних міркувань симетрії. Більше того, у присутності зовнішніх електричного або магнітного полів може виникнути крім природньої також і штучно створена анізотропія ПЕ. Показано, що анізотропія ПЕ приводить до змішування  $\Pi$   $\epsilon$ - і  $\rho$ -типів ( виникають гібридні  $\epsilon, \rho$ - моди ); та до неколінеарності фазових та групових швидкостей  $\Pi$  ( вказані вирази для відповідних кутів „знос“ енергії ).

У другій главі досліджені НПП, які розповсюджуються вздовж плоскої границі поділу двох середовищ, одне із яких володіє керівською нелінійністю ( $\epsilon = \epsilon_0 + a |\epsilon|^2$ ) та ПЕ. Виявляється, що вплив ПЕ проявляється по різному для самофокусуєчих та самодефокусуєчих нелінійних середовищ. У розділі 2.1. розглянуті області існування, дисперсійні, енергетичні характеристики нелінійних  $\Pi$   $\epsilon$ -поляризації. Показано, зокрема, що, якщо у відсутності ПЕ величина поля  $\Pi$  на границі поділу фіксована, то при наявності ПЕ вона залежить від значення хвильового вектора  $\Pi$ . В присутності ПЕ ( лінійної по полю ) область існування  $\Pi$   $\epsilon$ -типу у самофокусуєчих середовищах звужується, а у самодефокусуєчих - навпаки, розширюється у порівнянні з випадком, коли ПЕ нема. Вказані інтервали дозволених значень хвильових векторів НПП ( $k$ ), при чому у випадку самофокусуєчого ( самодефокусуєчого ) нелінійного середовища при  $\epsilon_0 < \epsilon_2$  з ростом величини ПЕ (  $\alpha$  ) максимальне ( мінімальне ) значення  $k$ , що реалізується, зменшується ( збільшується ), зменшується при цьому також і потік енергії  $\Pi$ . Нелінійна ПЕ дозволяє збуджувати НПП  $\epsilon$ -типу з

монотонним затуханням полів по обидві сторони від кордону розділу контактуючих середовищ. Визначені області існування та діапазони значень хвильових векторів, для яких у присутності нелінійної ПЕ можуть реалізуватися одночасно дві структури полів ( дві моди з різними параметрами локалізації, потоками енергії, значеннями пограничних полів і т.д., але з однаковими  $\kappa$  ). В розділі 2.2. аналізується вплив ПЕ на НПП р-типу. Показано, зокрема, що ПЕ знімає порог збудження НПП у випадку, коли  $\epsilon_0, \epsilon_2 > 0$ , для самофокусуємого нелінійного середовища; при цьому вказані інтервали: а) величин напруженності полів на границі поділу, яким відповідає два можливих значення хвильових векторів НПП; б) заборонених значень  $\kappa$ . ПЕ ініціює у цьому випадку НПП у самодефокусуємому середовищі, для якого діапазон значень хвильових векторів НПП обмежений і знизу, і зверху. Наголошено, що, коли значення діелектричних проникливостей обох контактуючих середовищ від'ємні ( $\epsilon_0, \epsilon_2 < 0$ ), НПП не існують, незважаючи на існування задовільняючих ( додатніх ) коренів дисперсійного рівняння. Остання обставина закликає проявляти обережність при аналізі робіт, де знайдені тільки дисперсійні характеристики ПП, але не отримані одночасно просторові структури їх полів. На закінчення глави ( розділ 2.3 ) вивчаються ПП р-типу при одночасній взаємодії трьох факторів: оптичної нелінійності діелектричної проникливості одного із контактуючих середовищ, його анізотропії та ПЕ. Вказаний діапазон дозволених значень хвильових векторів НПП, який у випадку самофокусуємого ( самодефокусуємого ) нелінійного середовища звужується ( розширюється ). Показано, що потік енергії НПП із збільшенням його хвильового вектора у самофокусуємому середовищі

веде себе немонотонно, а у самодефокусуєчому - монотонно росте. Нелінійність ПЕ розширює область існування анізотропних нелінійних III  $\rho$ -типу, які тепер можуть реалізовуватися з такими значеннями хвильових векторів, які були заборонені в лінійному для ПЕ наблизенні, більше того, цим величинам  $k$  відповідають відразу дві можливі структури полів.

Відомо, що III не можуть збуджуватись об'ємним хвилями, падаючими на самотню границю поділу середовищ, при лінійних процесах взаємодії цих хвиль з границею поділу, що призводить до виникнення відбитих та заломлених хвиль, оскільки це протирічило б закону збереження імпульса. Тому для збудження III, дослідження їх характеристик та використання при вивченні властивостей речовин і поверхонь середовищ використовують спеціальні оптичні та неоптичні методи. У главі 3 розглянута проблема збудження III у присутності як лінійної, так і нелінійної ПЕ на прикладі методу ослабленого повного внутрішнього відбивання (ОПВВ) та вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) світла. У розділі 3.1. знайдено вирази для коефіцієнту відбивання та зсуву фаз при ОПВВ в системі призма-зазор-кристал, що володіє ПЕ (геометрія Отто). Показано, що мінімуми коефіцієнта відбивання (осциляції зсуву фаз) з ростом величини ПЕ ( $\omega$ ) зсуваються у сторону менших кутів падіння світла (при скануванні по куту) та більших частот (при скануванні по частоті); при цьому вони відповідають дисперсійним кривим III у присутності ПЕ. Підкреслимо, що ПЕ розширює спектральний діапазон, у якому існує можливість збуджувати III. Виявляється, що використовуючи експериментальні спектри ОПВВ, можна успішно визначити параметри каналів

електропровідності. Вперше розв'язана задача про ОПВВ при врахуванні нелінійності ПЕ. Для цього випадку теоретично передбачено явище оптичної мультистабільності при ОПВВ, яке може знайти застосування у практичних приладах інтегральної оптики. В розділі 3.2. розглянуто параметричне підсилення стоксової та ПП хвиль, зв'язаних квадратичною нелінійністю середовища, у полі заданої хвилі накачки в присутності як лінійної, так і нелінійної ПЕ. Це нелінійно-оптичний процес дещо іншого характеру, чим ті, які розглядалися у попередніх главах. А саме, якщо у взаємодіях, розглянутих вище, джерелом нелінійності є достатньо сильне поле самого ПП, і в таких умовах змінюються основні характеристики ПП: закон дисперсії, характер просторової еволюції, потік енергії і т.д., то при розгляді процесу ВКР сильні об'ємні хвилі зовнішнього походження збуджують ПП. Показано, що присутність ПЕ суттєво відображається на основних характеристиках ВКР: розширюється актуальний спектральний діапазон; максимуми коефіцієнта підсилення зсуваються у короткохвильову область та збільшуються; з'являються можливості перебудови частоти стоксового випромінювання шляхом зміни величини ПЕ (наприклад, використовуючи зовнішні електричні чи магнітні поля). Нелінійність ПЕ призводить до немонотонної залежності коефіцієнта підсилення ВКР від потужності хвилі накачки.

#### Положення, що виносяться на захист.

Існує новий тип оптичної нелінійності - нелінійність поверхневих токів поблизу границі розділу середовищ. Ця нелінійність приводить до виникнення принципово нових властивостей у поверхневих поляритонів. Зокрема, вона здійснює суттєвий вплив

на їх дисперсійні і енергетичні характеристики, просторову і поляризаційну структуру.

2. Нелінійність поверхневої електропровідності приводить до виникнення нестійких станів та оптичної бістабільності поверхневих поляритонів.

3. Наявність поверхневих токів суттєво впливає на характеристики вимушеного комбінаційного розсіювання на поверхневих поляритонах: розширюється активна спектральна область, значно змінює частотну залежність коефіцієнт підсилення ВКР, призводячи, зокрема при врахування нелінійності поверхневих токів, до немонотонної його залежності від інтенсивності накачки.

4. Анізотропія поверхневих токів приводить до виникнення гібридної (sp-типу) поляризаційної структури поверхневих поляритонів та до відмінностей у напрямках їх фазових та групових швидкостей.

5. Дисперсійними та іншими характеристиками поверхневих поляритонів можна ефективно керувати шляхом зміни величини поверхневої електропровідності за допомогою як зовнішніх полів, так і перебудови енергії самого поверхневого поляритона. Ця обставина відкриває можливості створення керованих інтенсивністю інтегрально-оптичних елементів.

Основні результати дисертації опубліковані у роботах:

I. Гроза А.Д., Довгий Б.П., Лысенюк К.П., Стрижевский В.Л.  
"Нелинейные поверхностные поляритоны и их спектроскопические применения" // Тезисы докладов XX Всесоюзного съезда по спектроскопии. т.2. - Киев. - 1988. - с. 144-145.

2. Лышенко К.П., Марчевский Ф.Н., Понат Г.-Е., Стрижевский В.Л.  
"Нелинейные поверхностные поляритоны в средах, обладающих  
поверхностной проводимостью" // Тезисы VIII Всесоюзной конференции  
по взаимодействию оптического излучения с веществом. т. I. -  
Ленинград. - 1990. - с. 33-34.

3. Лышенко К.П., Марчевский Ф.Н., Понат Г.-Е., Стрижевский В.Л.  
"Нелинейные поверхностные поляритоны  $s^-$  и  $p^-$  типов, инициируемые  
поверхностным током: пространственные эволюции полей, области  
существования, дисперсия" // Тезисы XIV Международной конференции  
по когерентной и нелинейной оптике. т. I. - Ленинград. - 1991. -  
с. 156-157.

4. Лышенко К.П., Марчевский Ф.Н., Понат Г.-Е., Стрижевский В.Л.  
"Нелинейные поверхностные поляритоны  $s^-$  типа при наличии  
поверхностной электропроводности" // Журнал прикладной  
спектроскопии. - 1991. - т. 54, № 5. - с. 809-814.

5. Лышенко К.П., Марчевский Ф.Н., Понат Г.-Е., Стрижевский В.Л.  
"Нелинейные поверхностные поляритоны  $p^-$  типа в присутствии  
поверхностной электропроводности" // Изв. РАН. - 1992. - т. 56,  
№ 9. - с. 96-102.

6. Lyshenjuk K.P., Martchevsky F.N., Ponat G.-E., Strizhevsky W.L.  
Surface polaritons under conditions of surface electroconductivity  
// in Transverse Phenomena and Instabilition in nonlinear optics.  
SPIE. USA. - v. 1840. - 1992. - p. 78-99.

7. Лышенко К.П., Марчевский Ф.Н., Понат Г.-Е., Стрижевский В.Л.  
"Вынужденное комбинационное рассеяние света на поверхностных  
поляритонах в присутствии поверхностной электропроводности" //  
ФТТ. - 1993. - т. 54, № 2. - с. 436-441.

Підп. до друку. 22.2.93. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Папір офс  
Друк. офс. Умовн. друк. арк. 952 Обл.-вид. арк. 950 тир. 100  
Зам. 3-3240.

---

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Рєніна, 4.

AB 27.001

AB 27.001