

РЕФЕРАТ

циклу наукових праць «**Високоінформативна поляриметрия та продукти на її основі**», висунутого Інститутом фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки у 2016 році.

Мета роботи. Просторова характеристика електромагнітної хвилі у вигляді стану поляризації набуває вичерпних відомостей про об'єкт під час її взаємодії з ним пропусканням, відбиванням чи розсіюванням. Встановлення зв'язку параметрів стану поляризації з електрофізичними властивостями об'єктів дослідження є оберненою задачею **поляриметрії**. Глибина пізнання цього зв'язку визначається інформаційною ефективністю поляриметричних систем. Модуляційна поляриметрия є саме тим засобом, що надає методиці **високоінформативної** здатності завдяки:

- **множині** комбінацій величин 4-х параметрів Стокса $S = [I \ Q \ U \ V]$, що характеризують у загальному вигляді стан поляризації випромінювання;
- **множині** величин 4×4 компонентів матриці Мюллера M ($S_{вих} = M \times S_{вх}$), що містять при відомих векторах Стокса $S_{вх}$ та $S_{вих}$ вичерпні дані про властивості речовини;
- **у множині** конструктивних рішень оптико-поляризаційних пристроїв, призначених для визначення параметрів наземних об'єктів та речовин у всіх агрегатних станах з точки зору реєстрації фізичних, хімічних та біологічних властивостей.

Тому циклом робіт ставиться **мета створення на практиці поляриметрії високої інформативної здатності**, для досягнення якої передбачається вирішення низки пов'язаних між собою наукових та науково-технічних завдань:

- розвиток теоретичних методів аналізу матриць Джонса та Мюллера, а також резонансних та поляризаційних властивостей перфорованих екранів;
- розроблення теорії та практики **модуляційної поляриметрії (МП)**;
- визначення функціональних зв'язків параметрів поляризації випромінювання з властивостями речовин, або з різноманітними чинниками (температура, тиск, магнітне та електричне поле тощо), що призводять до їх зміни;
- розроблення, виготовлення та широкомасштабне випробування оптико-поляризаційних пристроїв, призначених для вимірювання та діагностики практично важливих параметрів фізичних, хімічних та біологічних середовищ.

Наукова новизна. Модуляція поляризації електромагнітного випромінювання є одним із новітніх засобів експериментальної фізики. У роботах циклу за її допомогою відокремлюється відгук речовини у вигляді сигналу фотодетектора на дію поляризованої компоненти світла із складу в загальному випадку частково поляризованого випромінювання. Подальше використання тільки поляризованої компоненти надає методу МП неперевершеної досконалості в отриманні вичерпної інформації про природу об'єктів дослідження або про причину їх зміни. Інформаційна ефективність методу підвищується за рахунок збільшення на декілька порядків динамічного діапазону вимірюваних величин. Ця обставина виявляється вирішальною у забезпеченні високої чутливості методики МП до ступеню анізотропії та рекордної виявної амплітудної і координатної здатності відносно оптичних констант матеріалу.

Розвитком матричного методу поляризаційної оптики на прикладі матриць Мюллера досягнуто прориву в дослідженнях складних з точки зору анізотропії об'єктів, що є загальним випадком реальних кристалів, біологічних сполук тощо, завдяки чому були обійдені труднощі класичного електродинамічного підходу. Для цього розроблено систематизацію відомих у природі поляризаційно залежних ефектів, на основі якої було сформульовано «узагальнену теорему еквівалентності». Згідно з

теоремию кожне середовище, якому притаманна анізотропія довільної складності, може бути еквівалентно представлене скінченною послідовністю шарів з простими типами анізотропії. Беручи до уваги той факт, що в природі відомі лише чотири елементарних типи анізотропії: двопронезаломлення, оптична активність, лінійний та циркулярний дихроїзм, згадана еквівалентна послідовність має всього чотири компоненти з відповідними типами анізотропії.

Продуктивність даної теореми полягає у тому, що вона відкрила широкі можливості для формулювання та розв'язку цілого ряду актуальних фундаментальних та прикладних задач сучасної поляриметрії, зокрема:

- вивчення симетрії матриці Мюллера та зв'язків між елементами;
- синтез середовищ із заданими анізотропними характеристиками;
- оптимізація поляриметричних досліджень анізотропних середовищ.

Основні результати.

Модуляційна поляриметрія та її використання.

І. Лінійне двопронезаломлення (фазова анізотропія) в напівпровідникових кристалах, композитах та наноб'єктах.

Поляриметрія в широкому розумінні ґрунтується на двох тісно взаємозв'язаних складових: - засоби процесу вимірювання та об'єкти як джерела інформації. Тому ці особливості поляриметрії відображаються у двох її складових, а саме Стокс- та Мюллер-поляриметрії. **Перша складова** оперує чотирма параметрами Стокса, що описують у нормованому вигляді компоненти величин лінійної та циркулярної поляризації в еліптично поляризованому випромінюванні. У даній частині роботи на прикладах взаємодії випромінювання з численними середовищами практично у всіх агрегатних станах продемонстровано надзвичайну інформативну здатність стану поляризації електромагнітної хвилі відносно чотирьох типів анізотропних властивостей речовин: лінійної та циркулярної, а також фазової та амплітудної анізотропії.

Перш за все розроблено аналітичне з використанням функцій Бесселя 1-го роду відображення процесу функціонування модуляторів поляризації електромагнітних хвиль. На цій підставі розроблено та створено різноманітні варіанти оптичних схем, параметри яких визначаються відповідними експериментальними задачами.

На цій підставі технікою модуляційної поляриметрії виявлено та детально вивчено низку фундаментальних електричних, оптичних та фотоелектричних ефектів в твердих тілах та кристалах:

- явище інтерференції циркулярно поляризованого випромінювання - фотопружний ефект. Його потужний інформаційний потенціал забезпечив розширення до $5\div 6$ порядків діапазон вимірюваної фази електромагнітної хвилі на величину $2\pi \cdot 10^{-6}$ радіан, що відповідає деформаційній анізотропії від власної ваги зразка;

- передбачено та виявлено фототермопружний ефект, індукований градієнтом температури чи складу речовини, що вирішує проблему їх вимірювання за допомогою рентгенівського чи синхротронного випромінювання;

- виявлено, що зв'язок величин та знаку напружень з тепловим потоком характеризується в координатному просторі другою похідною температурної функції (закон Пуассона);

- прогнозовано та виявлено поляризаційний ефект «замороженої» термопружності в кристалах з неоднорідним легуванням (рис. 1), в композитних матеріалах та у місцях з'єднання різнорідних матеріалів (рис. 2);

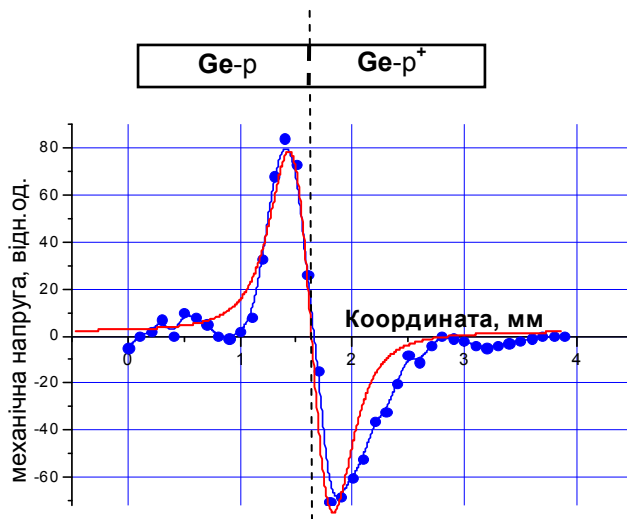


Рис.1 Приклад збігання координатної функції напружень σ (синя) в кристалі германію та другої похідної потенціалу ϕ (складу речовини), як ілюстрація закону Пуассона $\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{1}{\tau}\sigma$

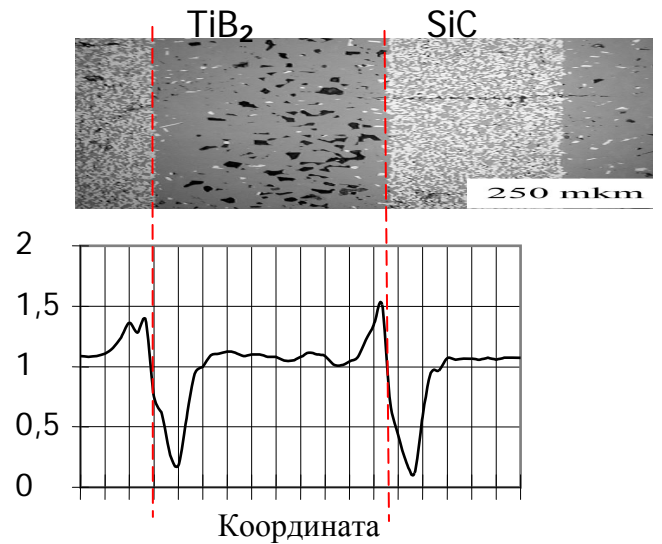


Рис.2. Просторовий розподіл внутрішнього механічного напруження у шарах композитних матеріалів, отриманий методом МП на протязі 1хв. Для рентгенівського методу ця процедура займає добу.

- встановлено, що закономірності координатного розподілу механічних напружень у композитних матеріалах типу двошарової кераміки та карбиду бору якісно узгоджуються з рівнянням, що є другою похідною функції потенціалу (енергії).

Вперше методом МП досліджено динаміку і кінетику термопружності, що індукована тепловим випромінюванням у модельному зразку зі скла, та виявлено явище оптичної анізотропії, зумовленої виникненням напружень при незначних температурних перепадах. Виявлено, що у виникненні напруження та його кінетиці приймають участь всі три компоненти теплообміну з різними часовими та амплітудними параметрами. Подвійним графічним інтегруванням експериментальної функції механічних напружень отримано координатні залежності температури в різні моменти часу як рішення оберненої задачі термопружності. Зміщенням у просторі координат екстремуму функції механічної напруги здійснено «фотографію» теплового фронту. Із аналізу кінетики напружень встановлено ієрархію характеристичних часів релаксації процесів кожного із механізмів теплопередачі та визначено їх кількісний внесок.

Виявлені ефекти фазової анізотропії винятково важливі у розвитку матеріалознавства, де вирішення проблеми термопружності (контактної, радіаційної та «замороженої») супроводжується множиною задач, пов'язаних необхідністю вимірювання механічних напружень неруйнівними та безконтактними методами.

II. Лінійний дихроїзм (амплітудна анізотропія) в напівпровідникових кристалах та металах.

В анізотропних матеріалах, якими є практично всі речовини в реальних умовах, коефіцієнти пропускання, поглинання, відбиття світла, коефіцієнти генерації носіїв заряду, плазмонів, поляритонів тощо залежать від орієнтації вектора поля лінійно поляризованої хвилі відносно напрямку оптичної вісі (осей) оптичної індикатриси речовини. Абсолютна або відносна різниця відзначених коефіцієнтів є мірою величини відповідного ефекту дихроїзму (фотоплеохроїзму). У роботі виключно із застосуванням методики МП виявлено низку нових ефектів, властивих напівпровідниковим кристалам. Отримані із них відомості у вигляді відповідних

функціональних залежностей поглибили знання щодо фізики твердого тіла та сприяли встановленню деяких властивостей речовин. До них відносяться:

- поляризаційно залежна фотомагнітна ЕРС в напівпровідниковому кристалі Ge свідчить про величину міждолинного часу релаксації електронів;
- із спектральних характеристик міждолинної компоненти фотомагнітної ЕРС встановлено енергетичне положення екстремумів зонного спектру кристалу;
- спектральні характеристик фотоплекроїзму у фотопровідності, вентиляній та об'ємноградієнтній фотоерс вказують на величини таких важливих параметрів матеріалів та приладів із них як дифузійна довжина електронів, товщини емітера та шару просторового заряду в р-n-переходах (рис. 3).

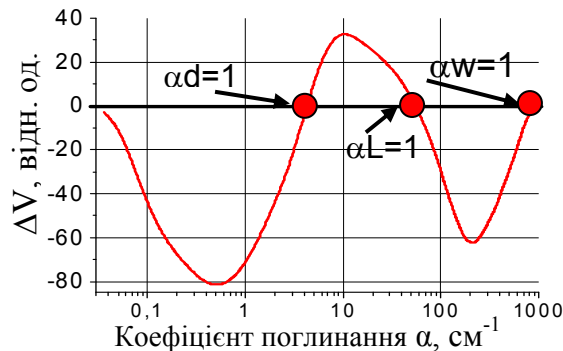


Рис. 3. Приклад високої інформаційної здатності - із однієї характеристики фотоплекроїзму $\Delta V(\alpha)$ кремнійового р-n-переходу можна отримати відомості про три параметри: товщину бази, довжину дифузії, товщину шару просторового заряду.

Отримані результати є підґрунтям для розробки методики діагностики напівпровідникових приладів та структур на предмет встановлення їх кінетичних параметрів – дифузійної та дрейфової довжин носіїв заряду. Передбачено та виявлено фонову компоненту ефекту лінійного дихроїзму, що зумовлена анізотропією коефіцієнтів поглинання за участю фононів та екситонів. Виявлено ефект лінійного фотоплекроїзму в явищах фотопровідності та вентиляній фото-ЕРС в однорідних кристалах Ge та Si в умовах одновісної деформації. Вперше здійснено фізичне диференціювання спектральних характеристик відзначених ефектів (величини дихроїзму, фотоплекроїзму) за коефіцієнтом поглинання випромінювання..

Запропоновано та вперше виконано Стокс-аналіз стану поляризації випромінювання з використанням її модуляції у дослідженні явища повного внутрішнього відбиття. Встановлено, що висока крутизна кутової функції циркулярної V-компоненти забезпечує реєстрацію показників заломлення зовнішнього середовища з чутливістю на рівні $\Delta n/n=10^{-8}$, що є досягненням світового рівня. Вперше запропоновано та проведено дослідження явища поверхневого плазмонного резонансу ППР методом реєстрації поляризаційної різниці (Q-компоненти вектора Стокса) коефіцієнтів внутрішнього відбиття в нанорозмірних плівках золота. Отримані результати дають підстави для спостереження, детального вивчення та використання явища ППР не тільки у типових матеріалах (срібло, золото, мідь та алюміній), а й практично у необмеженій кількості об'єктів сучасної нанофізики твердого тіла.

Виявлено оптичний розмірний ефект (рис. 4), що полягає у пороговій взаємодії світла з нанорозмірним шаром металу (золота) та встановлено граничну межу його прояву. Виявлено топологічний просторовий розмірний ефект в композитних та металодіелектричних плівках, зумовлений кластерною природою та їх несферичністю, а також нову властивість явища ППР, що полягає у незалежності його прояву від стану поляризації випромінювання.

Встановлено високоінформативну здатність кутових та спектральних характеристик параметра поляризаційної різниці, що ґрунтується на багатоваріантній їх формі, знакозмінній амплітуді, розширеному її динамічному діапазоні та в

накопиченій базі даних, отриманих з результатів дослідження різноманітних нанорозмірних матеріалів. На численних прикладах показано, що розроблена методика має перспективи широкого використання у діагностиці нанорозмірних об'єктів з визначенням їх оптичних параметрів, особливостей морфології структур та товщини. Її переваги перед сучасною атомно-силовою мікроскопією полягають у здатності характеристики речовин з точки зору структури їх внутрішньої поверхні.

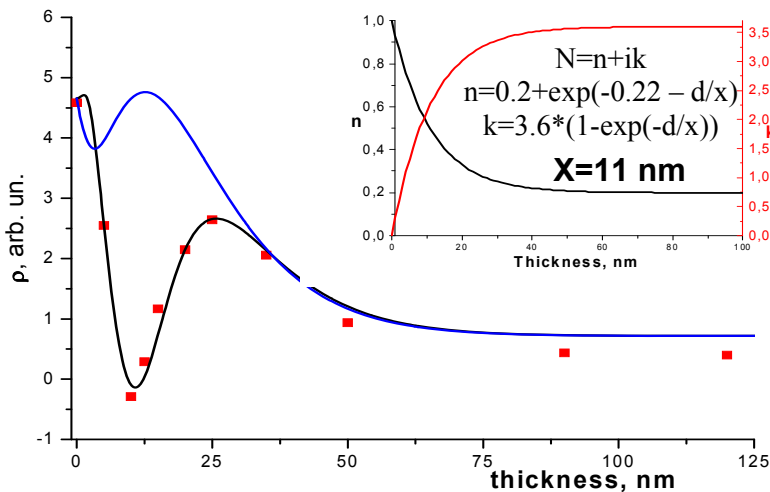


Рис. 4. Q-компонента випромінювання, відбитого від наноплівки Au в залежності від її товщини Au плівки. Точки – експеримент, суцільна – розрахунок з врахуванням експонентної залежності оптичних констант від товщини (на вставці), штрихова – без врахування.

III. Теорія резонансних та поляризаційних властивостей перфорованих екранів.

У поляризаційній оптиці радіодіапазону виявлено явище підвищеної прозорості випромінювання крізь металеві екрани з позамежними отворами та встановлено в них резонансні властивості. Уперше із загальних позицій спектральної теорії відкритих резонаторів встановлено зв'язок явища підвищеного проходження випромінювання крізь перфоровані екрани з позамежними отворами із його власними коливаннями структури. Розглянуто закономірності, що проявляються при розсіюванні електромагнітного поля на багатоелементних екранах з позамежними отворами. Показано, що багатоелементні екрани з позамежними отворами мають двоїсті властивості – вони можуть забезпечити як режими повного проходження, так і режими повного відбиття.

Один з напрямків їх дослідження - це створення на їхній основі штучних матеріалів, що дозволяють обертати площину поляризації падаючого на них випромінювання (явище оптичної активності). Уперше показано можливість керування поляризаційними характеристиками падаючого випромінювання “фішнет” структурою, на основі багатоелементних металевих екранів із круглими отворами. Для пояснення резонансної поведінки розглянуто просторову структуру власних коливань і показано зв'язок симетрії структури з формованим нею поляризаційним відгуком.

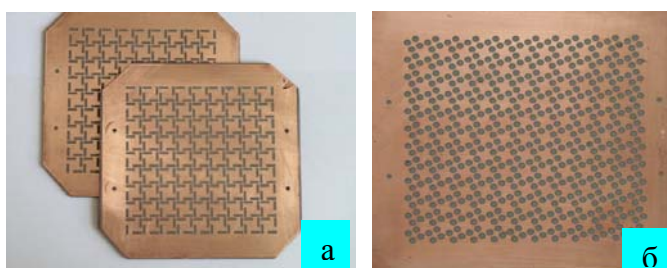


Рис. 5. Приклади обертачів площини поляризації на основі явища оптичної активності в екранах з позамежними отворами у вільному просторі а) та на діелектричному шарі б).

Практичне значення має малогабаритний обертач площини поляризації, що базується на електромагнітній взаємодії двох плоско-кіральних перфорованих екранів

по ближнім полям. Відкрите явище може бути реалізовано як спряжені металеві екрани, розташовані як у вільному просторі рис.5а, так і на діелектричному шарі рис.5б. Екрани являють собою тонкі перфоровані пластини з прямокутними або круглими отворами в періодичній комірці, що не мають дзеркальної симетрії, але мають обертальну симетрію порядку $n > 2$ (так звані плоско-кіральні об'єкти). Вибираючи пару спряжених екранів (різними напрямками обертання періодичної комірки), можна забезпечити поворот площини поляризації на довільний кут з тієї чи іншої смугою узгодження.

Розвиток методів адаптивної поляриметрії.

1. Розроблення матричних моделей анізотропних середовищ.

Мюллер-поляриметрія є другою складовою високоінформативної поляриметрії, що ґрунтується на вимірюваннях матриць Мюллера досліджуваних об'єктів. Як коефіцієнт пропорційності між чотирьох-компонентними векторами Стокса $S_{вих} = M \times S_{вх}$ для початкового та кінцевого станів поляризації хвилі матриця має розмір 4×4 елементів і тому є портретом досліджуваного об'єкта. Інформативна ефективність цього методу досягається, по-перше, обґрунтуванням мінімальної (3÷4) кількості вимірювань для встановлення значень 16 компонентів матриці.

А по-друге, визначенням відповідних співвідношень між компонентами, з використанням яких розшифровується зміст матриці Мюллера як «чорного ящика» щодо виявлення сукупних властивостей зразка. Практична значимість розв'язку цієї задачі полягає у характеризації досліджуваного середовища без залучення систем з диференціальних рівнянь (рис. 6). Крім того, формалізм Мюллера оперує з величинами у вигляді інтенсивності світла, що реєструються безпосередньо фотодетекторами.

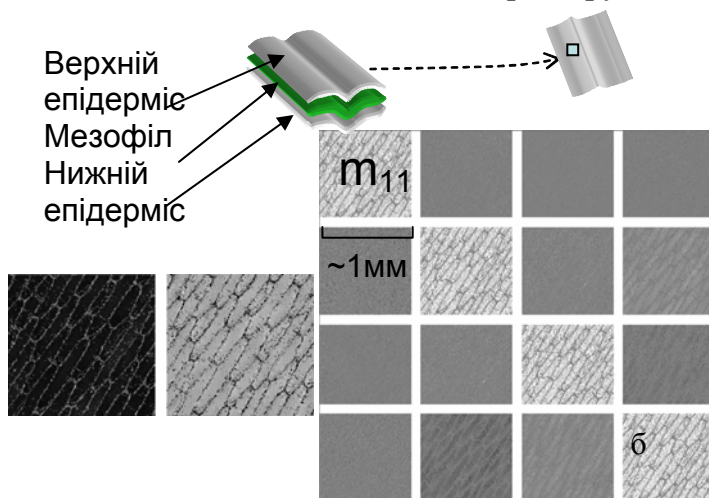


Рис.6. Приклад мікроскопічного розподілу анізотропії у верхньому епідермісі листка *Chlorophytum*. Переважає тип анізотропії - лінійне подвійне променезаломлення. Максимальна анізотропія ($\delta \sim 30^\circ$) в оболонках клітин, швидка вісь (α) лежить в площині оболонок. Центр клітин має незначну анізотропію ($\delta \sim 2^\circ$)

На основі розв'язку спектральної задачі для матричної моделі однорідного анізотропного середовища вперше отримано матричні моделі класів середовищ, власні числа яких є фазовими, амплітудними і виродженими. Показано, що кожна з цих моделей в загальному випадку містить всі чотири елементарні види анізотропії. Варіюючи значення лише будь-якого одного і залишаючи незмінними значення решти параметрів анізотропії, виявляється можливим перейти від класу середовищ, що характеризуються фазовими власними числами, до класів, що характеризуються амплітудними або виродженими власними числами.

Запропоновано метод, що дозволяє отримувати найкращі оцінки для повних і неповних матриць Мюллера в класі матриць, який відповідає класу конкретної оберненої задачі. Продемонстровано, що даний метод дозволяє вирішити проблему нестійкості розв'язків на основі неповних матриць Мюллера. Тим самим вперше

доведено перспективність використання методу неповних матриць Мюллера і його інформативність при дослідженні анізотропних характеристик об'єктів.

II. Визначення характеристик середовищ з використанням матриць Мюллера

Отримані в даній частині роботи результати утворюють основу нової концепції вимірювальної поляриметрії - адаптивної Мюллер-поляриметрії. Її зміст полягає в тому, що вибір методу вимірювання та конкретного варіанта його реалізації має обумовлюватися поляризаційними властивостями досліджуваного об'єкта. При цьому вибір здійснюється автоматизовано на основі поповнюваної системи критеріїв. Побудовано Мюллер-поляриметр, який реалізує дану концепцію (рис.7).

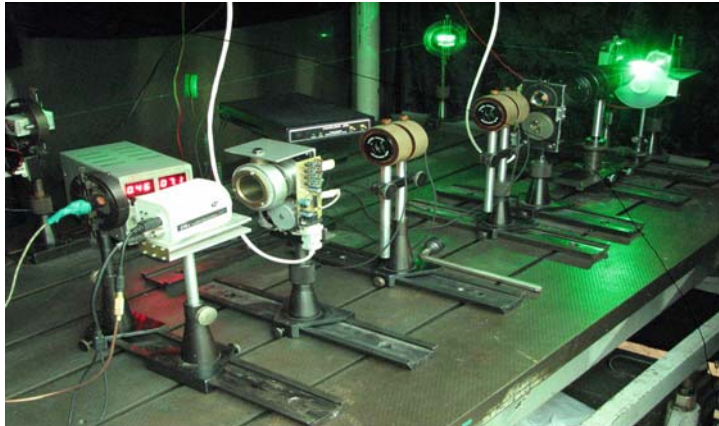


Рис.7. Приклад мікроскопічного розподілу анізотропії у верхньому епідермісі листка *Chlorophitum*. Переважає тип анізотропії - лінійне подвійне променезаломлення. Максимальна анізотропія ($\delta \sim 30^\circ$) в оболонках клітин, швидка вісь (α) лежить в площині оболонок. Центр клітин має незначну анізотропію ($\delta \sim 2^\circ$)

Дослідження вимірювальних схем поляриметрів з послідовним зондуванням та схем з динамічним перетворенням поляризації випромінювання дозволило розробити аналітичну базу для визначення та врахування індивідуального характеру залежностей похибок визначення параметрів Стокса та елементів матриць Мюллера середовищ в кожній конкретній схемі. Її аналіз виявив, що не можна *a priori* віддати перевагу одному або іншому методу поляриметричних вимірювань.

Таким чином вперше в поляриметрії розроблено підстави для створення поляриметрів та методології поляриметричних досліджень, взагалі, які реалізують вищезазначену концепцію адаптивної Мюллер-поляриметрії. Тобто, вибір відповідного методу вимірювання і конкретного варіанту його реалізації (структури вимірюваної неповної матриці Мюллера) має обумовлюватися поляризаційними властивостями досліджуваного об'єкта. При цьому вибір має здійснюватись автоматизовано на основі поповнюваної системи критеріїв.

Поєднання фундаментального та прикладного доробку і експериментального досвіду дозволило розробити комплексний підхід щодо постановки та оптимізації поляриметричних досліджень – метод адаптивної Мюллер-поляриметрії. Практична значимість цього методу полягає у тому, що він дозволяє отримати максимальний об'єм інформації про досліджуваний об'єкт з максимально досяжною точністю і швидкістю. До того ж відбуватиметься це при тій же заданій конфігурації та метрологічних характеристиках вузлів дослідної установки, тобто без додаткових матеріальних витрат.

Розроблення, створення та випробування фізичних та біологічних сенсорних систем на основі поверхневого плазмонного резонансу.

Третя складова високоінформативної поляриметрії міститься у розробленні та створенні ряду фізичних та біологічних сенсорних систем на основі явища ППР. У цьому ряду приладів біологічні та хімічні сенсори являють собою новітній практичний

результат поєднання науки та технології, особливо ефективний у галузі медико-біологічних досліджень. Принцип функціонування таких сенсорних систем використовує високу чутливість явища резонансу, параметри якого у вигляді інтенсивності та фази відбитого р-поляризованого випромінювання залежать від фізичних властивостей досліджуваного середовища, що контактує з плівкою металу на поверхні чутливого елемента сенсора. Найважливішою перевагою сенсорів на основі ППР є їх здатність на безпосередню реєстрацію у реальному масштабі часу кінетики специфічних біомолекулярних взаємодій чи взагалі зміни діелектричних властивостей зовнішнього відносно металевій плівці середовища. Цим самим відкриваються принципово нові можливості для вивчення механізмів молекулярного розпізнавання, реєстрації особливостей ДНК в невідомих зразках, створення сучасних методів аналізу в медичній та ветеринарній медицині.

Для практичного використання сенсорної системи проведено моделювання явища ППР у рамках математичного формалізму з точки зору оптимізації її чутливості в залежності від товщини плівки металу, довжини хвилі використаного випромінювання та значень оптичних параметрів матеріалів сенсора. Розглянуто варіанти збільшення чутливості сенсорів, побудованих за схемою шаруватої структури діелектрик-метал-діелектрик. З метою порівняння методик чутливості розглянуто дві схеми комп'ютерної обробки кривої резонансу: оригінальна – де інформативним є значення похідної в позиції, близької до позиції, що відповідає напівширині кривої резонансу, та більш традиційна – де інформативним є зміщення кутової позиції мінімуму ППР-кривої. Для прикладу, зафіксовано різницю показника заломлення чистого повітря та повітря з 10% домішкою водню, або збільшення атмосферного тиску на 10 Па.

Запропоновано оригінальний підхід для реєстрації мутних середовищ за допомогою ППР. Оскільки явище ППР має місце в умовах ПВО і радіаційна мода відсутня, то з'являється можливість зареєструвати комплексний показник заломлення таких непрозорих речовин як кров та молоко. Запропоновано фізичну інтерпретацію явища ППР в мутних середовищах, де діелектрична проникність стає неоднорідною і може бути відображена методами теорії ефективного середовища.

З метою підвищення чутливості реєстрації адсорбції молекул на поверхні металу реалізовано спробу збільшення загальної поверхні шляхом спеціального середовища – тонкої плівки нанопоруватого оксиду алюмінію. В результаті доведено придатність та перспективність відзначених сенсорних наноструктур для детектування вологого повітря, ацетону, етанолу та гексану.

Практична значимість циклу робіт. Розроблено технологію виготовлення модуляційних пристроїв, функціонування яких ґрунтується на фізичних ефектах і полягає у періодичній зміні фаз ортогональних компонент лінійно та циркулярно поляризованого випромінювання. Про досконалість модуляційних пристроїв свідчить незмінність амплітуди модульованої хвилі, що відповідає визначенню терміна поляризаційної модуляції. Розроблено базову технологію модуляційної поляриметрії, як одного із сучасних ефективних засобів наукового експерименту, основною функцією якої є фізичне виділення поляризованої компоненти світла.

З використанням фотопружного ефекту у якості фізичного принципу модуляції та розробленої низки модуляторів побудовано ряд експериментальних установок для вимірювання ефектів амплітудної та фазової анізотропії. Розроблено та виготовлено **модуляційний кутовий поляриметр** для вимірювання параметрів ППР та практично всіх об'єктів сучасної нанофізики твердого тіла.

Розроблено та виготовлено модуляційно-поляризаційний **лазерний тензомер** для визначення просторового розподілу величини термонапружень у твердих тілах, реєстраційна швидкодія перевершує наявні рентгенівські установки. Виявна здатність до подвійного променезаломлення характеризується можливістю реєструвати напруження від власної ваги зразка у гравітаційному полі Землі.

Вагомим результатом прикладного характеру стало створення першого в Україні **автоматизованого Мюллер-поляриметра** з джерелом випромінювання 10.6 мкм, яка узгоджується з «вікном» прозорості земної атмосфери і активно використовується військовими, астрономами та екологами для дистанційного моніторингу відповідних об'єктів. Поєднання фундаментального та прикладного доробку і експериментального досвіду дозволило розробити комплексний підхід щодо постановки та оптимізації поляриметричних досліджень – метод адаптивної Мюллер-поляриметрії. Практична значимість цього методу у тому, що він дозволяє забезпечити отримання максимального об'єму інформації про досліджуваний об'єкт з максимально досяжною точністю та швидкістю при заданій конфігурації та метрологічних характеристиках вузлів дослідної установки без додаткових матеріальних витрат.

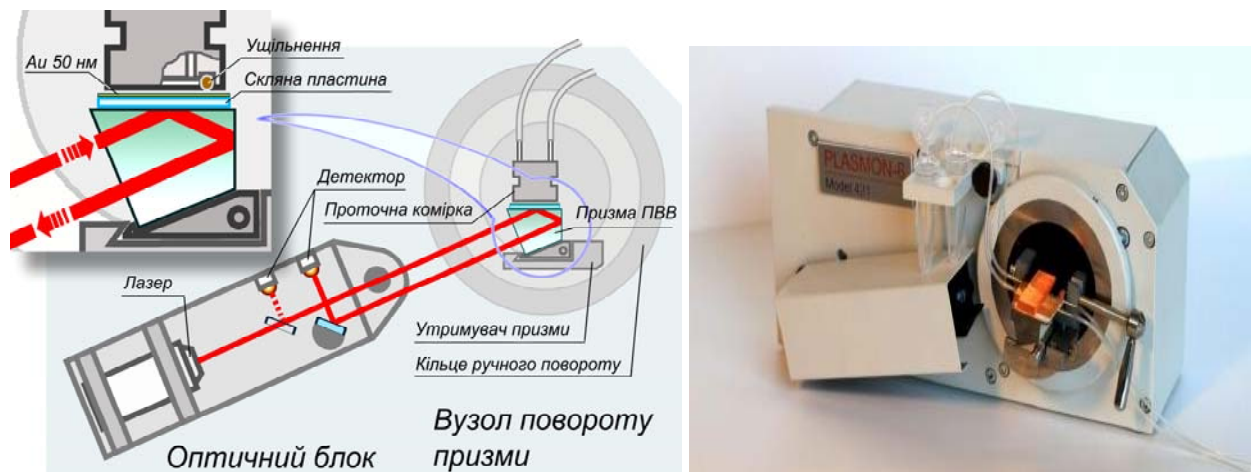


Рис.8. Оптична схема серійного приладу та одна із моделей - Плазмон-6.

Розроблення на основі явища ППР приладів для реєстрації біомолекулярних реакцій розпочалось в ІФН ім. В.Є.Лашкарьова НАН України на початку 1990-х років практично одночасно зі шведською компанією Pharmacia Biosensor AB. Результатом цих робіт є експериментальний зразок біосенсору **Плазмон-1**. Його випробування та вдосконалення призвело до створення приладів **Плазмон-4** та першого серійно спроможного біосенсору **Плазмон-5**, цілком придатних для експлуатації в умовах лабораторій біохімічного та біофізичного профілю. Подальшим вдосконаленням схеми приладу та його програмного забезпечення створено прилад **Плазмон-6** (рис. 8), яким розпочато модельний ряд ППР-спектрометрів серії "Плазмон". На даний час модельний ряд включає двоканальні прилади **Плазмон-6**, **Плазмон-7** та **Плазмон-71**. Наявність двох каналів дозволяє проводити два різних дослідження одночасно, або працювати за диференційною схемою, використовуючи один із каналів як опорний. Диференційні виміри значно підвищують реальну чутливість приладу завдяки виключення впливу багатьох зовнішніх факторів. Створено універсальний багатоканальний прилад **Плазмон-8**, який дозволяє проводити одночасно вісім незалежних досліджень, та прилад **Лейкоплазм-2**, що є спеціалізованим для діагностування лейкозу великої рогатої худоби.

Основне призначення приладів – використання їх як біосенсорів для наукових досліджень, діагностування захворювань, для лабораторних аналізів наявності деяких отруйних та інших шкідливих речовин тощо. Здатність приладів до визначення оптичних констант відкриває шлях для широкого їх використання в фізичних дослідженнях тонких плівок. Наявність системи точного калібрування кута падіння світла та створеного математичного апарату повного чисельного аналізу резонансної кривої дозволяє визначати оптичні константи досліджуваних рідких або газоподібних речовин, що знаходяться на плазмон-підтримуючій плівці.

Висновки:

- в циклі наукових праць розроблено теоретичні та фізико-технічні засади новітнього експериментального напрямку – поляриметрії високої інформативної здатності;
- досягнення в розробці модуляційної поляриметрії спричинили появу нової технології експерименту - Стокс-поляриметрію, що сприяло виявленню низки фундаментальних ефектів у фізиці твердого тіла (міждолинна фотоманітна ЕРС в Ge та Si, поляризаційно залежна вентиляна фотоерс, термофотопружний ефект, розмірні класичний та топологічний ефекти в наноматеріалах тощо);
- розроблено нову концепцію вимірювальної поляриметрії - адаптивну Мюллер-поляриметрію та створено базову установку для її реалізації;
- розроблено поляриметричні прилади різних типів, функціонування яких ґрунтується на принципі Стокс-поляриметрії;
- свідченням широкого використання приладів «Плазмон» є свідоцтво №37-477-14 про їх державну метрологічну атестацію;
- розроблено технологію серійного виготовлення ряду приладів "Плазмон" та проведено їх широкомасштабне випробування в медико-біологічних установах НАН України та МОЗ України: Інститут нейрохірургії ім. А.П.Ромоданова АМН України; Інститут біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України; Інститут мікробіології ім. Д.К.Заболотного НАН України; Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології ім. Р.Е.Кавецького; Інститут молекулярної біології і генетики НАН України.

В рамках договорів про співробітництво передано прилади серії **Плазмон** установам: Інституту нейрохірургії ім. А.П.Ромоданова АМН України; Національному технічному університету «Київський політехнічний інститут»; Інституту імунології Національного медичного університету ім.О.О.Богомольця.

В різних формах міжнародного співробітництва прилади серії **Плазмон** використовуються у **15 зарубіжних установах.**

Результати досліджень викладено у 211 публікаціях, в т.ч. у 13 монографіях, 35 патентах та 163 статтях у реферованих журналах (в т.ч. 87 статті у 34 зарубіжних журналах). Згідно баз даних Scopus публікації авторів процитовано у 429 наукових журналах, а загальний індекс цитування цих публікацій складає 1278, h-індекс = 19. За даною тематикою захищено 3 докторських та 14 кандидатських дисертацій.

Матяш І.Є.

Перов А.О.

Руденко С.П.

Самойлов А.В.

Савенков С.М.

Сердега Б.К

Ушенін Ю.В.

Ширшов Ю.М.