Високоінформативна поляриметрія та продукти на її основі

Матяш І.Є., Перов А.О., Руденко С.П., Савенков С.М., Самойлов А.В., Сердега Б.К., Ушенін Ю.В., Ширшов Ю.М.

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України Київський національний університет ім. Т.Шевченка Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України

публікацій **211**, монографій **13**, патентів **35, 3** докторських та **14** кандидатських дисертацій

Високо інформативна поляриметрія полягає в отриманні відомостей про властивості речовин, що містяться :

- у множині комбінацій величин 4-х параметрів Стокса S, що описують у загальному вигляді еліптично поляризоване випромінювання;

$$I^{2} = Q^{2} + U^{2} + V^{2}$$

- у множині 4×4 компонентів матриці Мюллера,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$

що є коефіцієнтом пропорційності між векторами Стокса до та після взаємодії світла з речовиною S_{вих} =M×S_{вх};

 $\mathbf{S} = \begin{vmatrix} Q \\ U \end{vmatrix}$

- у множині оптико-поляризаційних пристроїв, призначених для вимірювання та діагностики практично важливих параметрів фізичних, хімічних та біологічних середовищ.



Матяш І.Є., канд.фіз.-мат.наук, ст.наук.співр.



Перов А.О, канд.фіз.-мат.наук, ст.наук.співр.



Руденко С.П., канд.фіз.-мат.наук, ст.наук.співр.



Савенков С.М., докт.фіз.-мат.наук, зав.кафедри.



Самойлов А.В, канд.фіз.мат.наук, ст.наук.співр.



Сердега Б.К., докт.фіз.-мат.наук, зав.лаб., професор.



Ушенін Ю.В., ст.наук.співр.



Ширшов Ю.М., докт.фіз.-мат.наук, професор.

Дві компоненти комплексного показника заломлення *N* = *n* – *ik* та два окремі стани поляризації (лінійна та циркулярна) випромінювання складають систему всіх оптичних поляризаційних ефектів - *лінійна та циркулярна фазові та амплітудні анізотропії*, на яких ґрунтується цикл робіт.



"Аномально" високе пропускання екрану зі штучного метаматеріалу та його спектральна інтерпретація.



Виявлено:

- ефект резонансного відбиття (стрибок фази) хвилі від перфорованого металевого півпростору;

«апертурні» власні коливання границі розподілу
«перфорований ідеальний метал — відкритий простір» як
першопричина повного пропускання металевого екрану з
позамежними отворами;

- ефект резонансного пропускання екрану з дефектами.



Резонансне пропускання та оптична активність в структурах з позамежними отворами.



Виявлено ефект оптичної активності в структурах з резонансними чи позамежними отворами, що обумовлена новим типом дихедральних власних коливань.

Розроблено фізичні підстави для створення штучних середовищ – метаматеріалів з властивістю негативної рефракції.

Обертачі поляризації на основі перфорованих позамежними отворами екранів.





Розроблено

- Компактні обертачі поляризації на основі структур з дихедральною симетрією з послідовних металевіх екранів та екранів на діелектричному шарі.



Універсальна установка для дослідження подвійного променезаломлення, зумовленого зовнішнім тиском, неоднорідними складом речовини чи тепловим потоком як у прозорості, так і в непрозорих речовинах (фазова анізотропія).

АД – анізотропне

Оптична схема поляризаційного інтерферометра



дзеркало МП- модулятор поляризації ФД - фотодетектор 3 – досліджуваний зразок F- зовнішня фізична дія Приклад збігання просторових функцій механічного напруження (синя) та другої похідної потенціалу (складу речовини), як ілюстрація закону Пуасона $d^2 \varphi_{-}$



Просторовий розподіл внутрішнього механічного напруження у шарах композитних матеріалів



Розв'язок оберненої задачі термопружності: a) - σ(y) у зразку; б) – T(y) – експеримент та результат подвійного інтегрування σ(y)





Кінетика σ(t), що реєструється зондуючим променем в положенні y = 0, 3 см при дії чорного тіла упродовж t = 0÷280 с і при його відсутності t > 280 с - (a); частина кривої σ(t) при t > 280 с в напівлогарифмічних координатах - (b).



Дво- та багатопроменева інтерференція циркулярно поляризованого випромінювання V, що пройшло крізь зразок у процесі його нагрівання у варіантах (б) та (а).

Зразок – пластинка монокристала кремнію, діаметр зфокусованого пучка лазера = 0,1 мм, розфокусованого = 2 мм





Оптична схема з модуляцією поляризації для реєстрації Q-компоненти вектора Стокса (дихроїзму) у пропусканні на прикладі одновісно стиснутого кристалу кремнію (амплітудна анізотропія)



модельне представлення



експериментальний результат перевершує модель додатковою інформацією



Розміри лінійних ділянок по осі енергій відповідають, зліва на право: енергія зв'язку екситону, подвоєна енергія зв'язку екситону, подвоєна енергія ТА фонона. Виявлення критичних точок зонного спектру кристалу та характеристичних фізичних і конструктивних довжин реєстрацією фотоплеохроїзму поляризаційною модуляцією випромінювання







 $\Delta F = \frac{dF}{d\alpha} \Delta \alpha$

٨ł



- w товщина просторового заряду p-n переходу;
- L дифузійна довжина носіїв заряду;
- d товщина кристалу.



Модель взаємодії електромагнітного випромінювання з металевими наноплівками та умови утворення поверхневої поляритонної хвилі – поверхневий плазмонний резонанс.



$$\beta = \frac{2\pi d\sqrt{N_1^2 - N_0^2 \sin^2\theta}}{\lambda}$$



Кутові залежності коефіцієнта відбиття р-поляризованого випромінювання R_p у традиційному вигляді (синя) та параметра Δρ у методі модуляційної поляриметрії (чорна).

Залежність поляризаційної різниці $\rho = R_s^2 - R_p^2$ від кута падінняя світла за різних товщин плівки золота – класичний розмірний ефект



Узагальнена теорема еквівалентності. Представлення комплексної анізотропії однорідного середовища еквівалентною послідовною дією шарів з простими лінійною та циркулярною анізотропією



 $\mathbf{M} = \mathbf{M}^{\mathcal{U}\phi}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{M}^{\mathcal{I}\phi}(\boldsymbol{\delta},\boldsymbol{\alpha})\mathbf{M}^{\mathcal{U}A}(R)\mathbf{M}^{\mathcal{I}A}(P,\boldsymbol{\theta})$

М – матриця Мюллера

Параметри анізотропії $R, P, \theta, \delta, \alpha, \phi$

$$\begin{split} \varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n_{\mu} & 0 \le \varphi \le \pi & -\mathbf{B} \\ \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n_{\pi} & 0 \le \delta \le 2\pi, \ \alpha & -\mathbf{B} \\ P &= k_{\perp} / k_{\parallel} & 0 \le P \le 1, \ \theta & -\mathbf{B} \\ R &= \frac{k_{\sigma}^{-} - k_{\sigma}^{+}}{k^{-} + k^{+}} & -1 \le R \le 1 & -\mathbf{B} \\ \end{split}$$

еличина циркулярної фазової анізотропії: еличина та орієнтація лінійної фазової анізотропії; еличина та орієнтація лінійної амплітудної анізотропії еличина циркулярної амплітудної анізотропії; $\kappa_{\sigma} \pm \kappa_{\sigma}$

АДАПТИВНИЙ ЛАЗЕРНИЙ МЮЛЛЕР- ПОЛЯРИМЕТР

Модифікація макету для мікроскопічних досліджень



1. Лазер; 2,3. Зменшувач когерентності(scrambler) випромінювання та просторовий фільтр; 4. Формувач поляризації; 5. Досліджуваний об'єкт; 6. Аналізатор поляризації; 7.Обєктив; 8. ПЗЗ матриця.

Виявна здатність відносно зміни: •лінійного та циркулярного двопроменезаломлення - $(2\pi/\lambda)d\Delta n = 0.1^{\circ}$, •орієнтації швидкої осі та осі максимального пропускання - $\Delta\alpha, \Delta\theta = 0.1^{\circ}$ •лінійного та циркулярного дихроїзму p_⊥/p_{||}, (r_l-r_r)/(r_l+r_r) = 0.02



КОНТРОЛЬ ТА ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ АНІЗОТРОПІЇ МІКРО ТА МАКРОСКОПІЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ ОБ'ЄКТІВ

- Приклад контролю неоднорідності розподілу фазового зсуву (δ=cos(m₄₄)) в повному перерізі для кварцової λ/4 фазової пластинки (ПФ-3-8).
- Заводський допуск неоднорідності 90°±4°; встановлені межі неоднорідності - ±15°. (викликані неналежними умовами зберігання та експлуатації)
- Неоднорідності в орієнтації швидкої вісі не виявлені

Приклад мікроскопічного дослідження розподілу анізотропних властивостей у верхньому епідермісі листка *Chlorophitum.* Встановлено переважний тип анізотропії - лінійне

двопроменезаломлення. Максимальне значення анізотропії (δ ~ 30°) в оболонках клітин, швидка вісь (α) лежить в площині оболонок. Центральна частина клітин має незначну анізотропію (δ ~ 2°)



Експериментальне спостереження та моделювання (пояснення виникнення) явища "ефективного дихроїзму" при розсіюванні світла непоглинаючими двопроменезаломлюючими середовищами з поверхневою неоднорідністю.



Причина спостереження явища ефективного дихроїзму – зміна ширини індикатриси розсіювання залежно від стану поляризації падаючого та скінченна апертура фотодетектора



 модельно встановлена максимальна різниця між амплітудами індикатрис розсіювання для кальциту при спостереженні розсіювання у напрямку прямого проходу. Індекси е₁ та е₂ – відповідають лінійним поляризаціям вхідного випромінювання з площинами коливання паралельній та перпендикулярній до швидкої вісі кристалу, відповідно.

$$\mathbf{\rho}_{1,2} \Box 2 \frac{\sigma_h}{\rho_k} \sqrt{2 \frac{(n_e - 1)^2 - (n_o - 1)^2}{(n_o - 1)^2 (n_e - 1)^2} \ln\left(\frac{n_e - 1}{n_o - 1}\right)}$$

- точки перетину індикатрис розсіювання ($I_2/I_1=1$ — відсутність дихроїзму) визначаються характерними розмірами неоднорідностей кристалу (σ_h , ρ_k) і при відомих показниках заломлення ($n_o n_e$), теоретично, можуть бути використані для ідентифікації цих розмірів Інтерфейс розроблених програмних комплексів для автоматизації вимірювання, обробки та аналізу матриць Мюллера в точковому режимі.



НАДЧУТЛИВИЙ ЛАЗЕРНИЙ ТЕНЗОМЕТР

<u>Призначення</u>: вимірювання просторового розподілу та величини внутрішніх механічних напружень в прозорих і непрозорих матеріалах та конструкціях.





Приклад нерівномірного розподілу внутрішніх напружень у зразку Si (моделювання у програмному пакеті MatLab) МАКЕТ МОДУЛЯЦІЙНО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО БІОСЕНСОРУ





МОДУЛЯЦІЙНИЙ КУТОВИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Кутовий діапазон сканування – 40 - 90 град. Частота модуляції 80 кГц. Довжина хвилі випромінювання 0,65 мкм. Виявна здатність відносно зміни показника заломлення n повітря на прикладі залежності його від тиску встановлено $\Delta n/n = 10^{-8}$.





Спектрометр поверхневого плазмонного резонансу Лейкоплазм, Плазмон-6, Плазмон-8.





Плазмон-8



Плазмон-6



Лейкоплазм