

Поляриметрія високої інформативної здатності та продукти на її основі

Бекетов Г.В., Климов О.С., Матяш І.Є., Оберемок Є.А., 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

*публікацій 187, монографій 12, патентів 34,
3 докторських та 12 кандидатських дисертацій*



Бекетов Г.В.,
канд.фіз.-мат.наук,
ст.наук.співр.



Клімов О.С.,
канд.фіз.-мат.наук,
наук.співр.



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



Оберемок Є.А.,
канд.фіз.-мат.наук,
асистент.



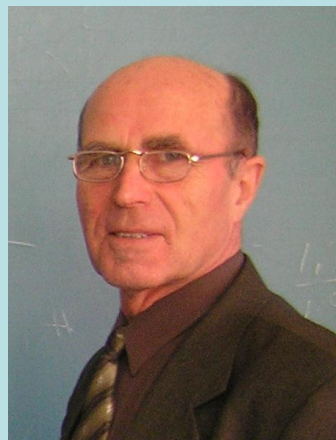
Руденко С.П.,
канд.фіз.-мат.наук,
ст.наук.співр.



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.



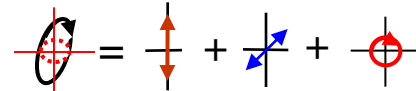
Ушенін Ю.В.,
ст.наук.співр.



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

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;



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

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

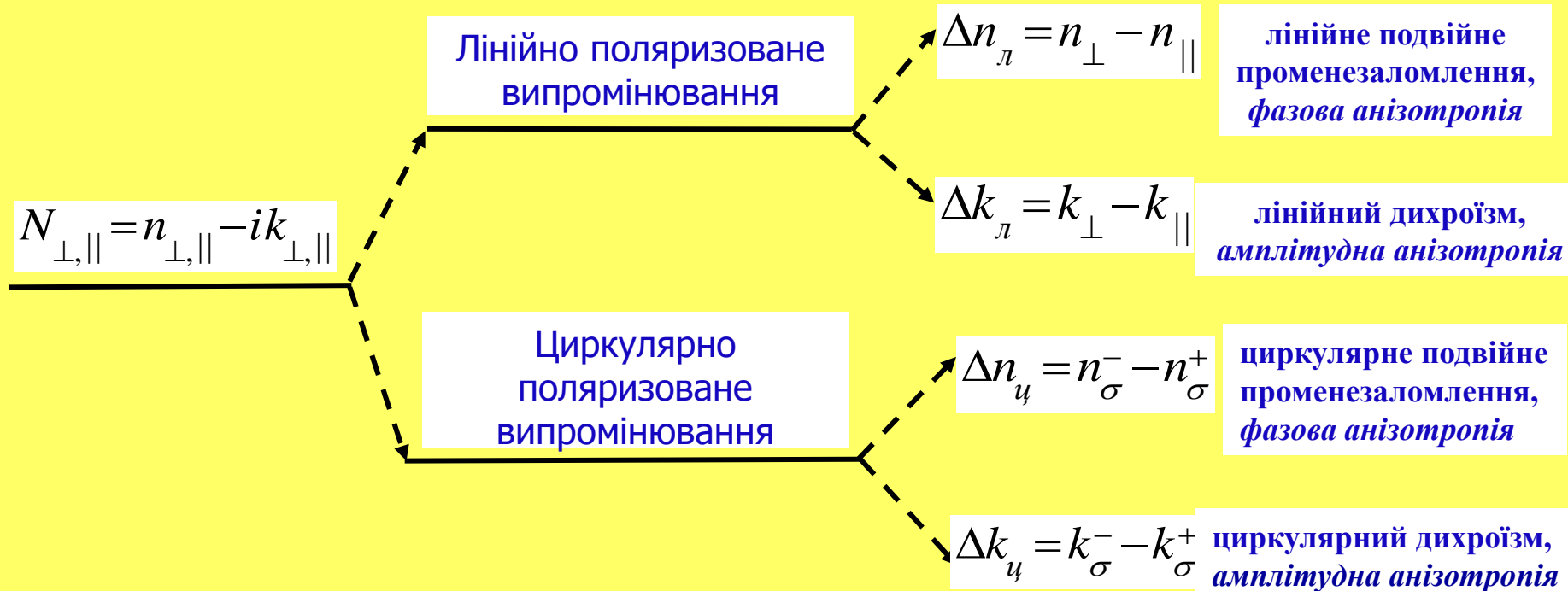
- у множині 4×4 компонентів матриці Мюллера,

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

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

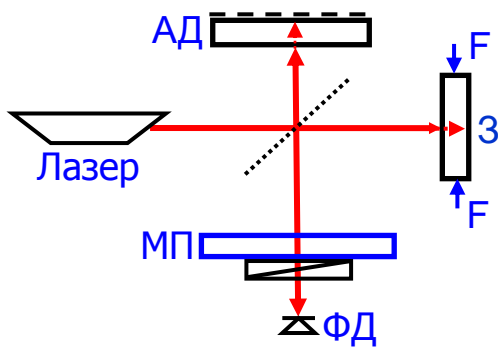
- у множині оптико-поляризаційних пристроїв, призначених для вимірювання та діагностики практично важливих параметрів фізичних, хімічних та біологічних середовищ.

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 анізотронії**, на яких ґрунтується цикл робіт.

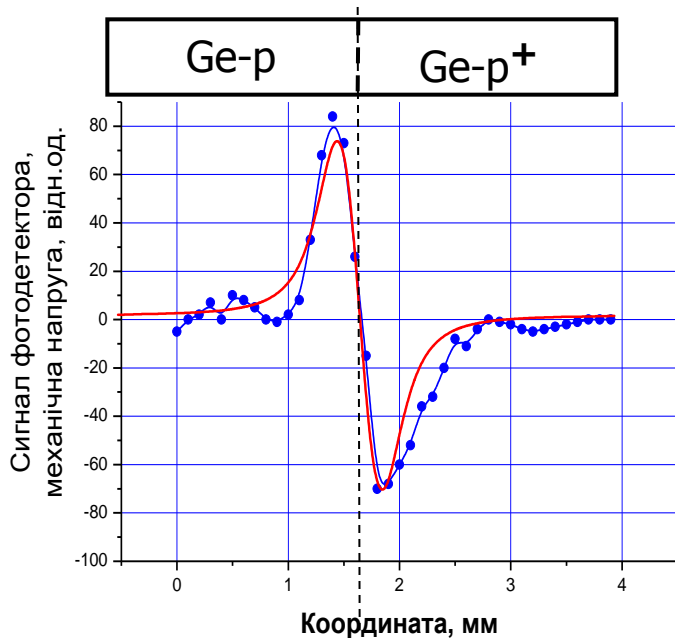


Універсальна установка для дослідження подвійного променезаломлення, зумовленого зовнішнім тиском, неоднорідними складом речовини чи тепловим потоком як у прозорості, так і в непрозорих речовинах (*фазова анізотропія*).

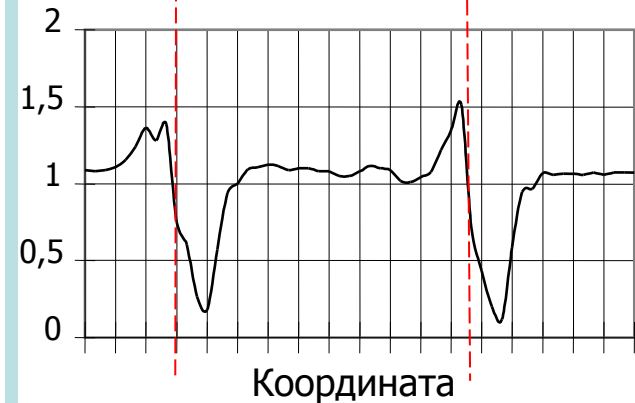
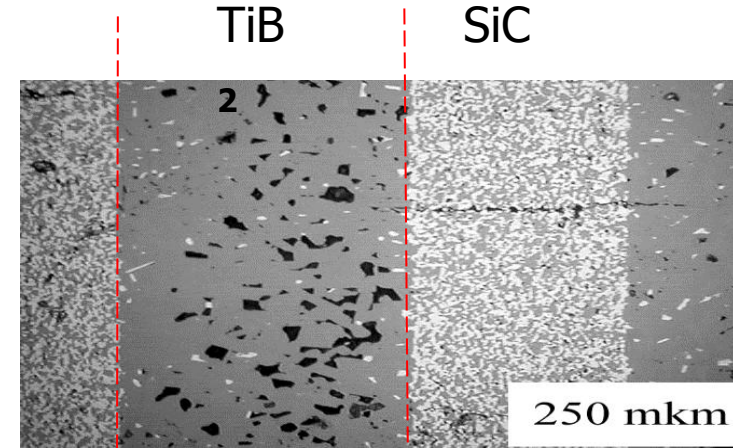
Оптична схема поляризаційного інтерферометра



- АД – анізотропне дзеркало
- МП- модулятор поляризації
- ФД - фотодетектор
- 3 – досліджуваний зразок
- F- зовнішня фізична дія



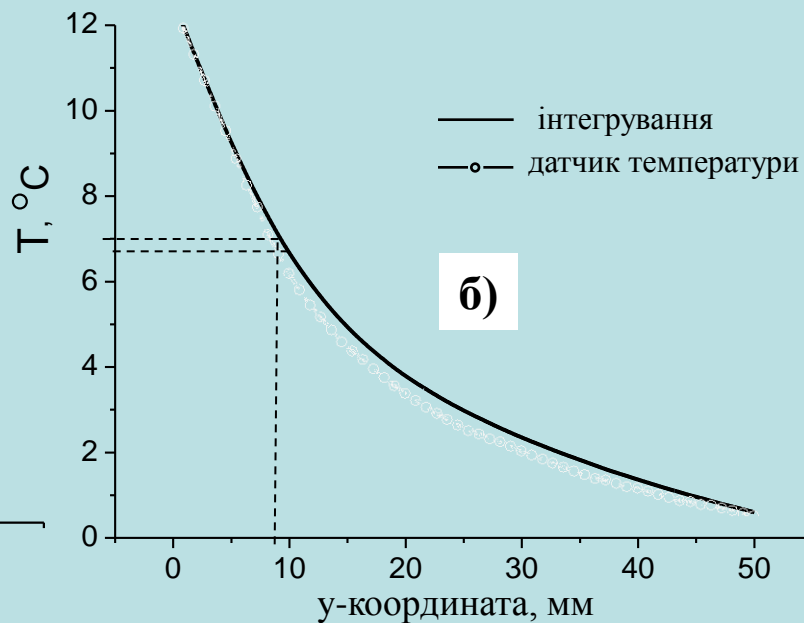
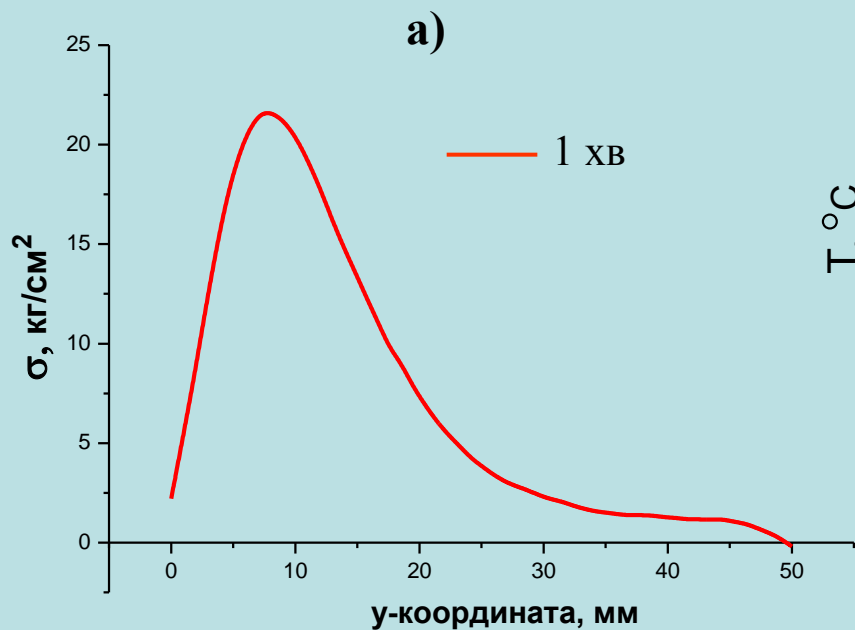
Приклад збігання просторових функцій механічного напруження (синя) та другої похідної потенціалу (складу речовини), як ілюстрація закону Пуасона $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{1}{\tau}\sigma$



Просторовий розподіл внутрішнього механічного напруження у шарах композитних матеріалів

Розв'язок оберненої задачі термопружності: а) - $\sigma(y)$ у зразку;
 б) – $T(y)$ – експеримент та результат
 подвійного інтегрування $\sigma(y)$

Зразок із кварцового скла

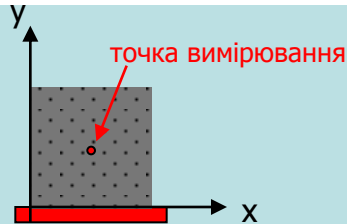


$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{\sigma}{\tau}$$

$$T = \tau' \iint \sigma \partial y \partial y$$

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

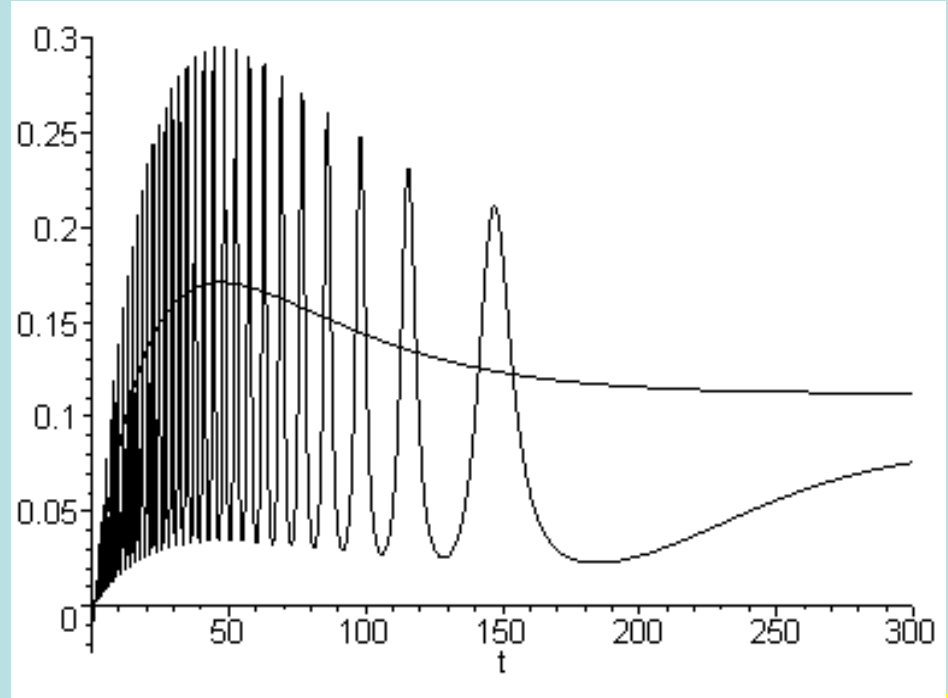
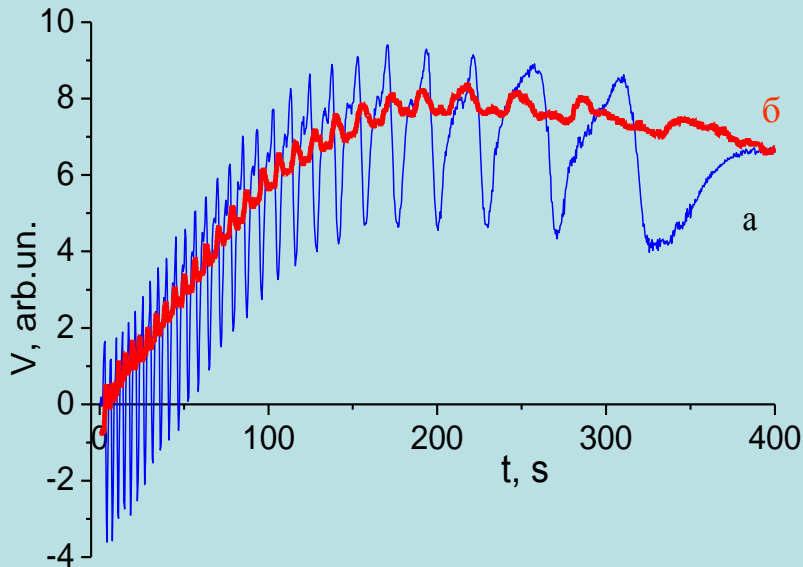


Моделювання з параметрами:

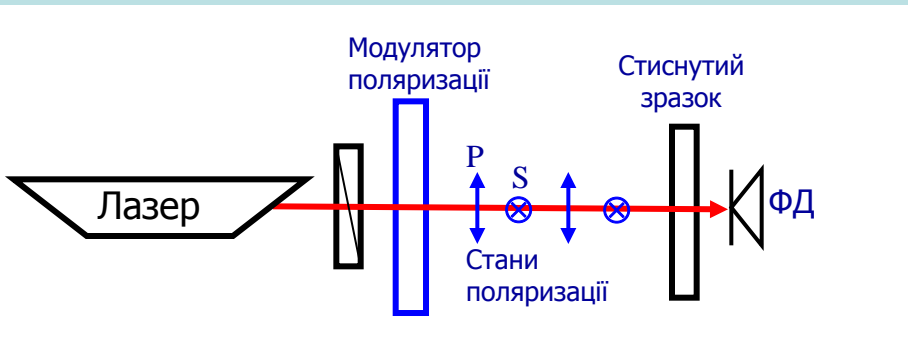
$$n = 3.6 + 0.0001 * (T - 273); T = 310 - (300 * \exp(-t/\tau));$$

$$d = 0.29915 + 1.385 * 10^{-5} * (T - 273);$$

$$\sigma(t) = 0.2 * \exp(-t/\tau_1) + (0.06 - 0.3 * \exp(-t/\tau_2)); \tau_1 = 40 \text{ с}, \tau_2 = 3 \text{ с}.$$

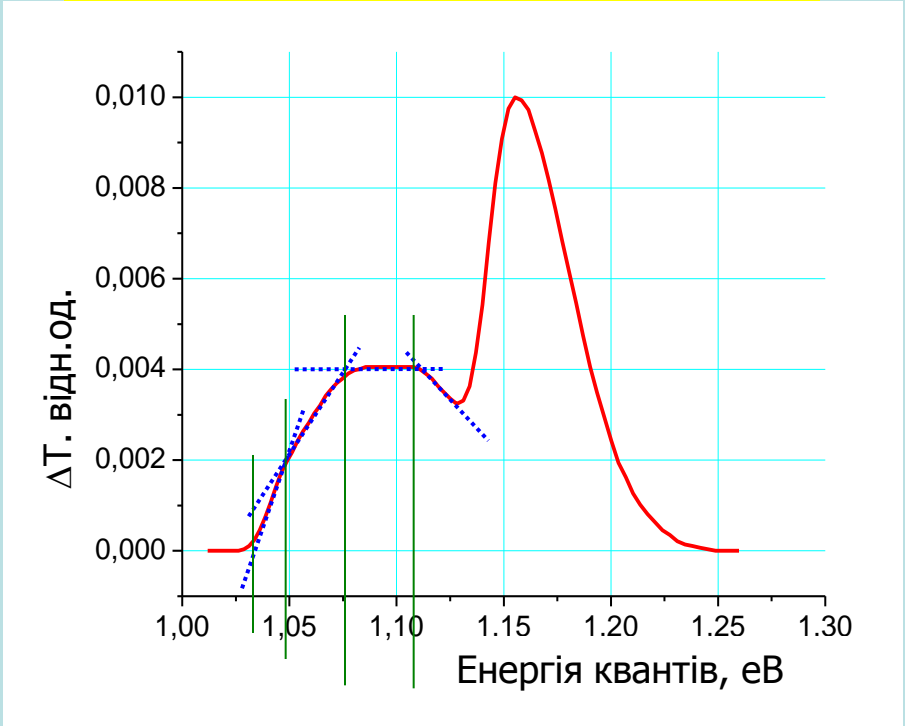
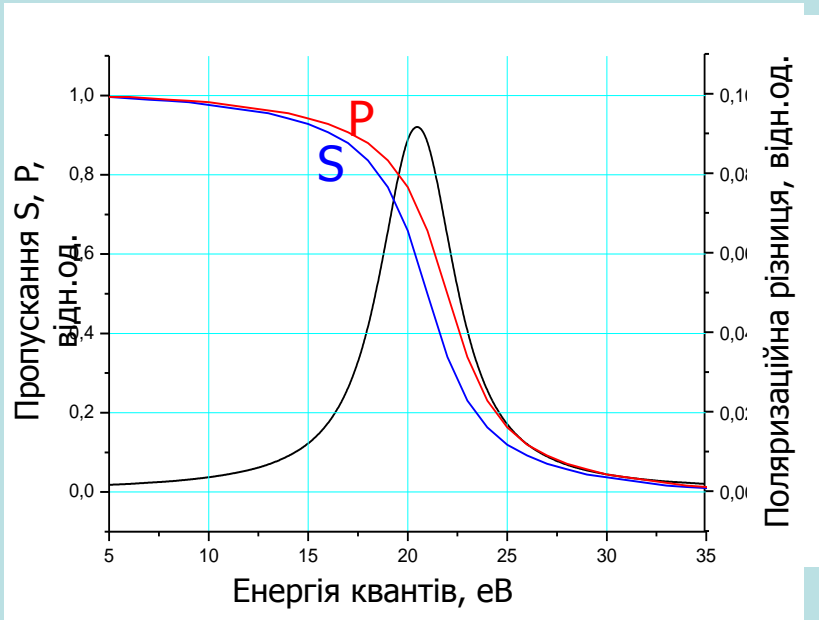


Оптична схема з модуляцією поляризації для реєстрації Q-компоненти вектора Стокса (дихроїзму) у пропусканні на прикладі одновісно стиснутого кристалу кремнію (амплітудна анізотропія)



експериментальний результат перевершує модель додатковою інформацією

модельне представлення



Розміри лінійних ділянок по осі енергій відповідають, зліва на право: енергія зв'язку екситону, подвоєна енергія зв'язку екситону, подвоєна енергія ТА фонуна.

Виявлення критичних точок зонного спектру кристалу та характеристикних фізичних і конструктивних довжин реєстрацією фотоплекроїзму поляризаційною модуляцією випромінювання

у фотопровідності Ge

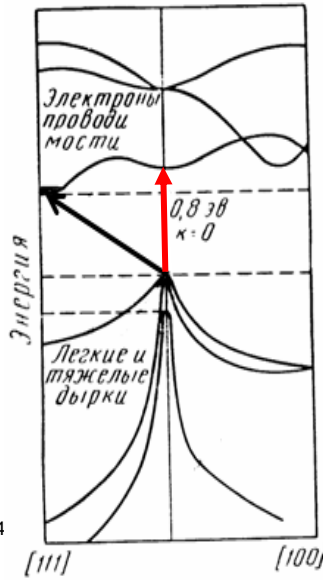
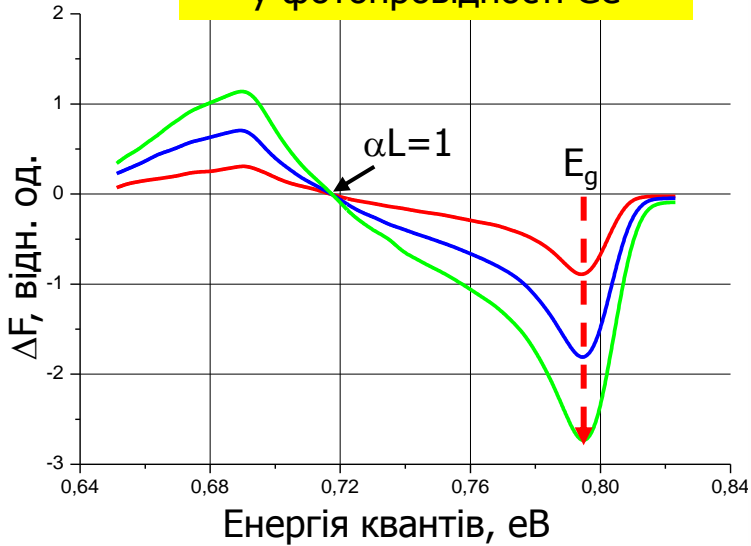
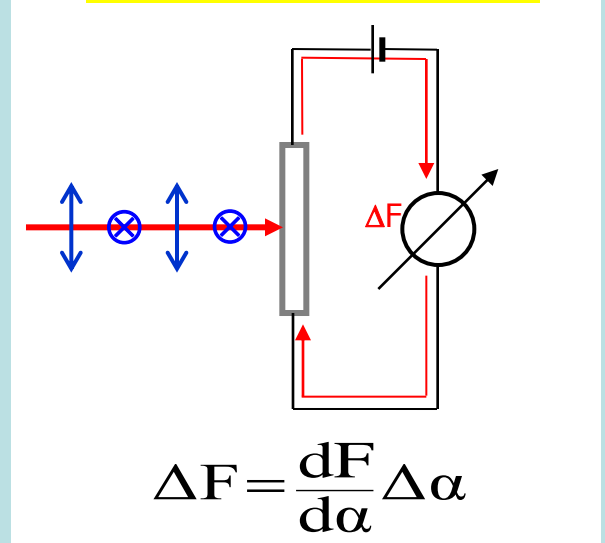
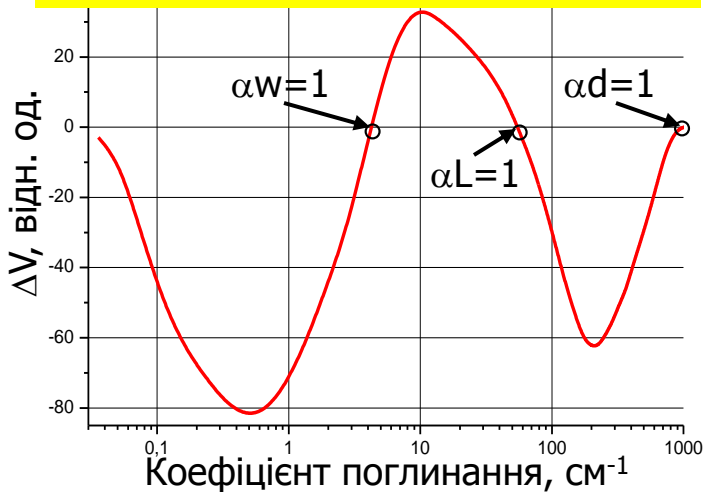


Схема дослідження фотоелектричних ефектів



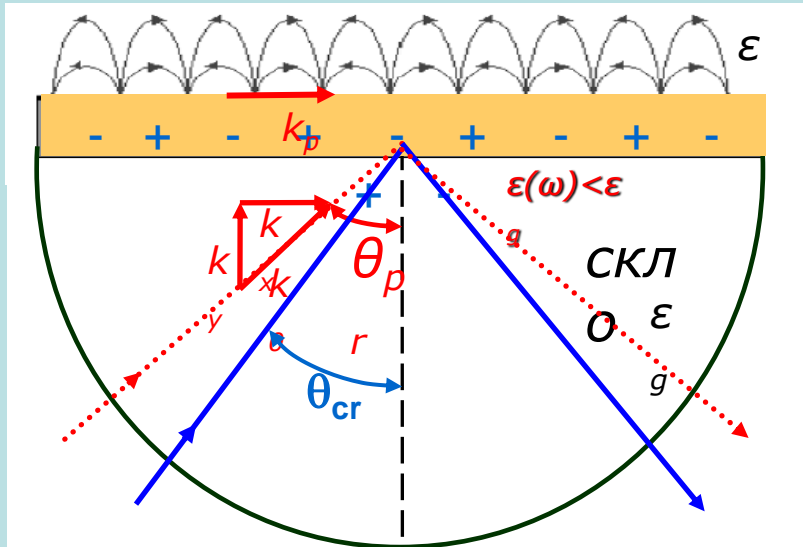
у вентильній фотоерс р-п переходу



Ілюстрація високо інформативної характеристики вентильної фотоерс у визначенні конструктивних товщин:

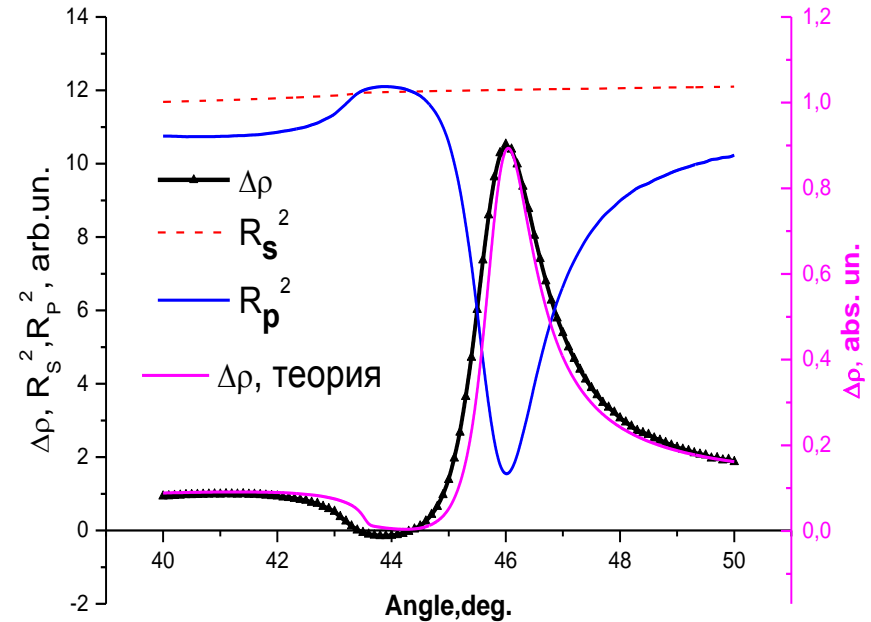
- w - товщина просторового заряду р-п переходу;
- L - дифузійна довжина носіїв заряду;
- d - товщина кристалу.

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



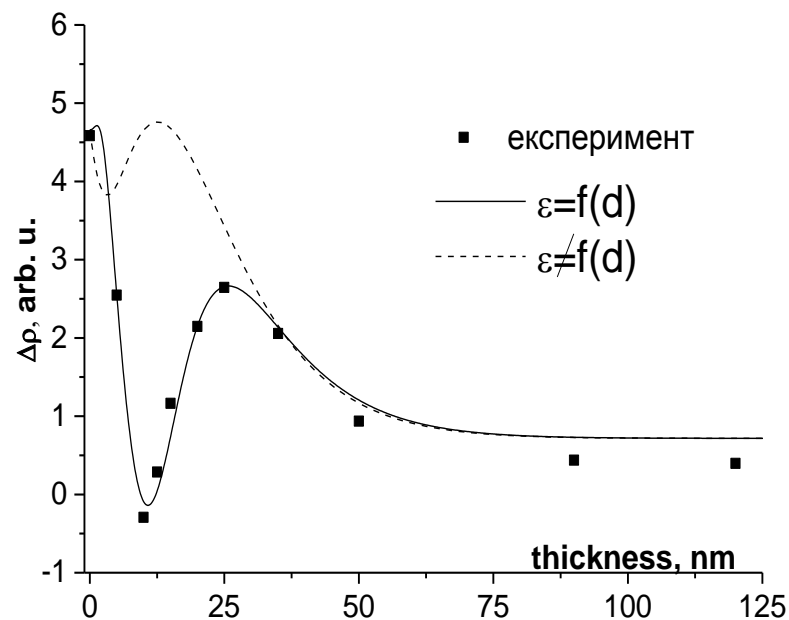
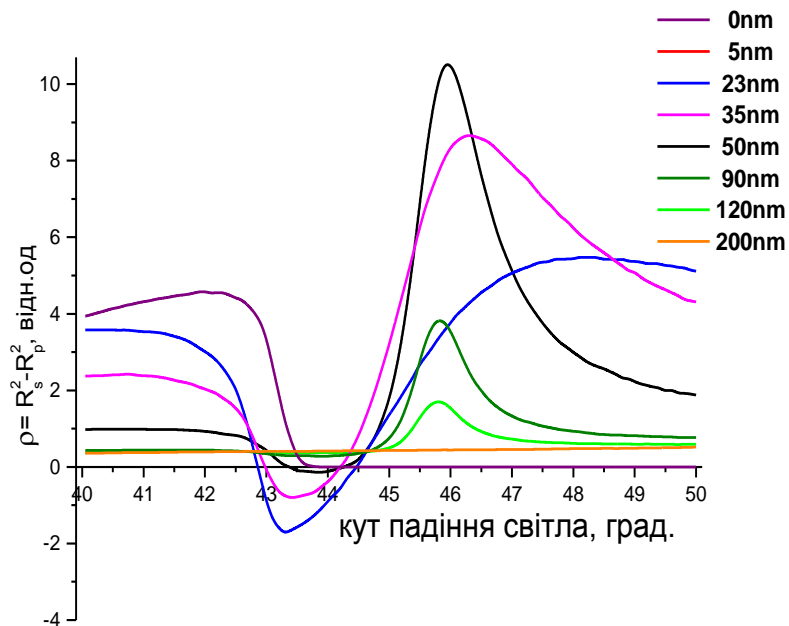
$$\sqrt{\epsilon_g} \sin \theta_{pr} = \sqrt{\frac{\epsilon'(\omega) \epsilon_a}{\epsilon_a + \epsilon'(\omega)}}$$

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

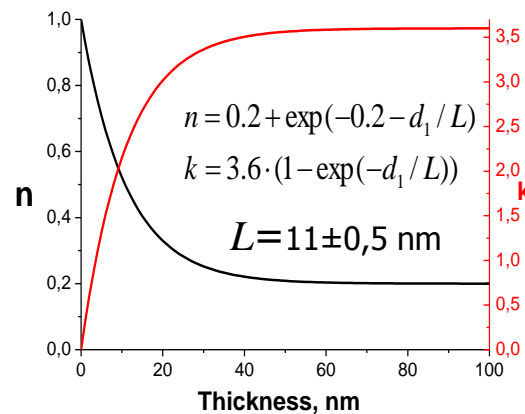


Кутові залежності коефіцієнта відбиття р-поляризованого випромінювання R_p у традиційному вигляді (синя) та параметра $\Delta\rho$ у методі модуляційної поляриметрії (чорна).

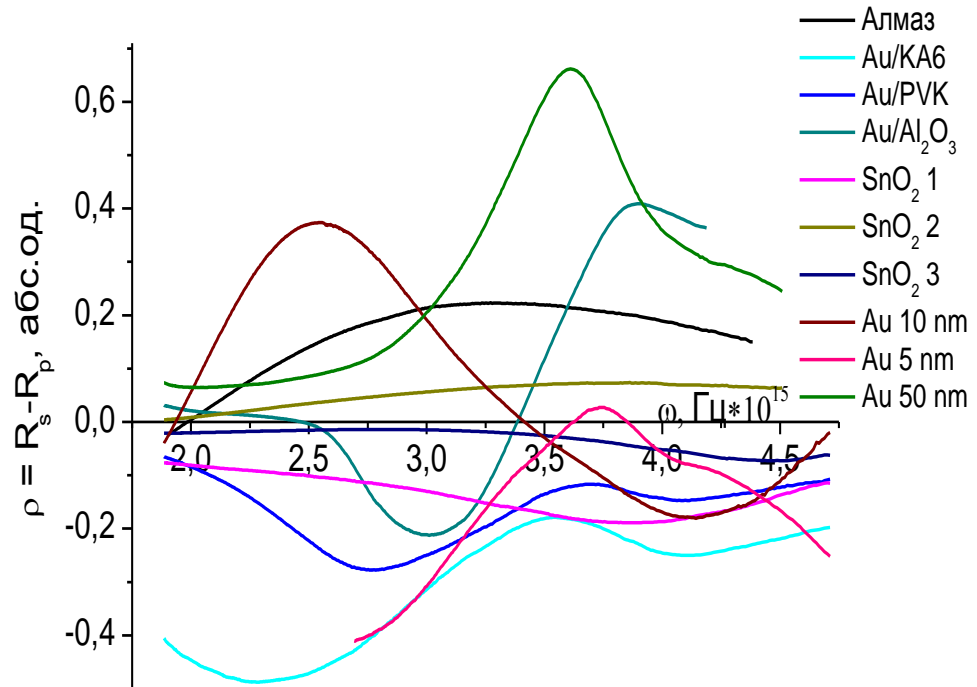
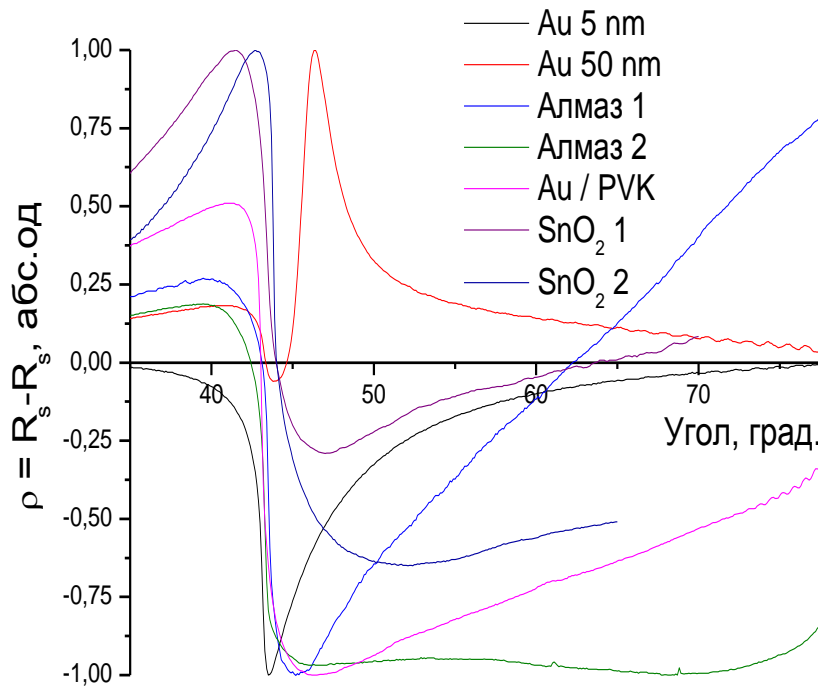
Залежність поляризаційної різниці $\rho = R_s^2 - R_p^2$ від кута падіння світла за різних товщин плівки золота – класичний розмірний ефект



L – порогова товщина плівки в тенденції набуття властивостей об'ємного матеріалу зі збільшенням її розміру.

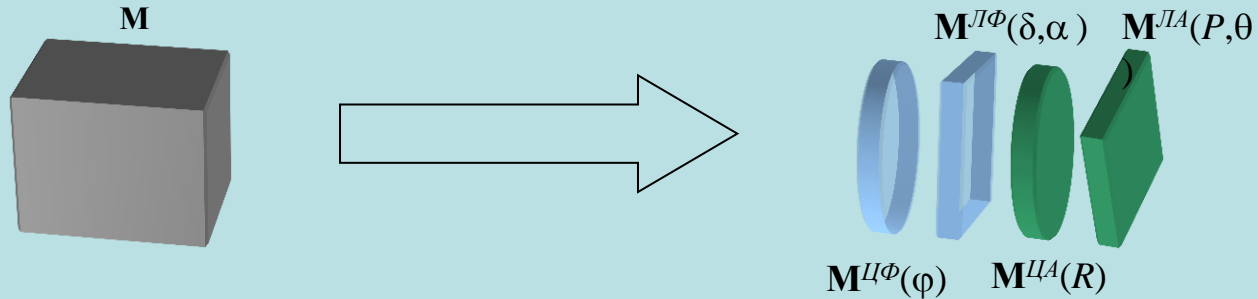


Залежності величин поляризаційної різниці ρ від кута падіння світла на напівциліндр повного внутрішнього відбиття (зліва) та від частоти (з права), на плоскій поверхні якого знадяться плівки, що відрізняються природою матеріалу, морфологією, товщиною, складом. Багатоваріантна форма кривих з додаванням 3-хвимірнього простору забезпечують методиці інформаційну здатність, що перевершує атомно-силову мікроскопію.



Узагальнена теорема еквівалентності.

Представлення комплексної анізотропії однорідного середовища еквівалентною послідовною дією шарів з простими лінійною та циркулярною анізотропією



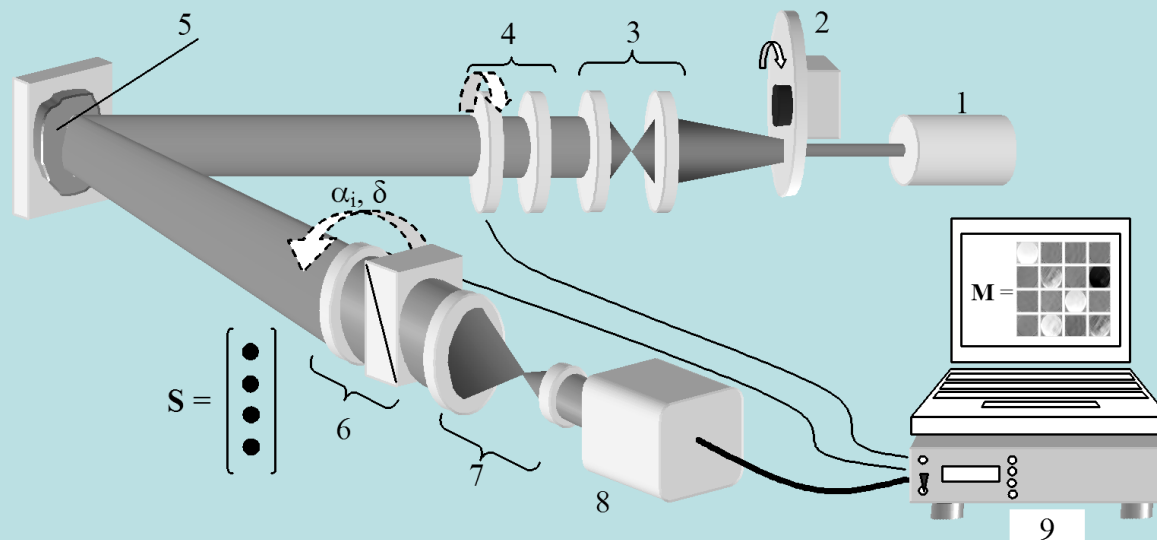
$$\mathbf{M} = \mathbf{M}^{CF}(\varphi) \mathbf{M}^{LF}(\delta, \alpha) \mathbf{M}^{CA}(R) \mathbf{M}^{LA}(P, \theta) \quad \mathbf{M} - \text{матриця Мюллера}$$

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

$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n_u$	$0 \leq \varphi \leq \pi$	- величина циркулярної фазової анізотропії;
$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d\Delta n_l$	$0 \leq \delta \leq 2\pi, \alpha$	- величина та орієнтація лінійної фазової анізотропії;
$P = k_{\perp} / k_{\parallel}$	$0 \leq P \leq 1, \theta$	- величина та орієнтація лінійної амплітудної анізотропії -;
$R = \frac{k_{\sigma}^{-} - k_{\sigma}^{+}}{k_{\sigma}^{-} + k_{\sigma}^{+}}$	$-1 \leq R \leq 1$	- величина циркулярної амплітудної анізотропії;

АДАПТИВНИЙ ЛАЗЕРНИЙ МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТР

Призначення: дослідження просторового розподілу комплексної оптичної анізотропії в середовищах шляхом вимірювання та аналізу матриць Мюллера.



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

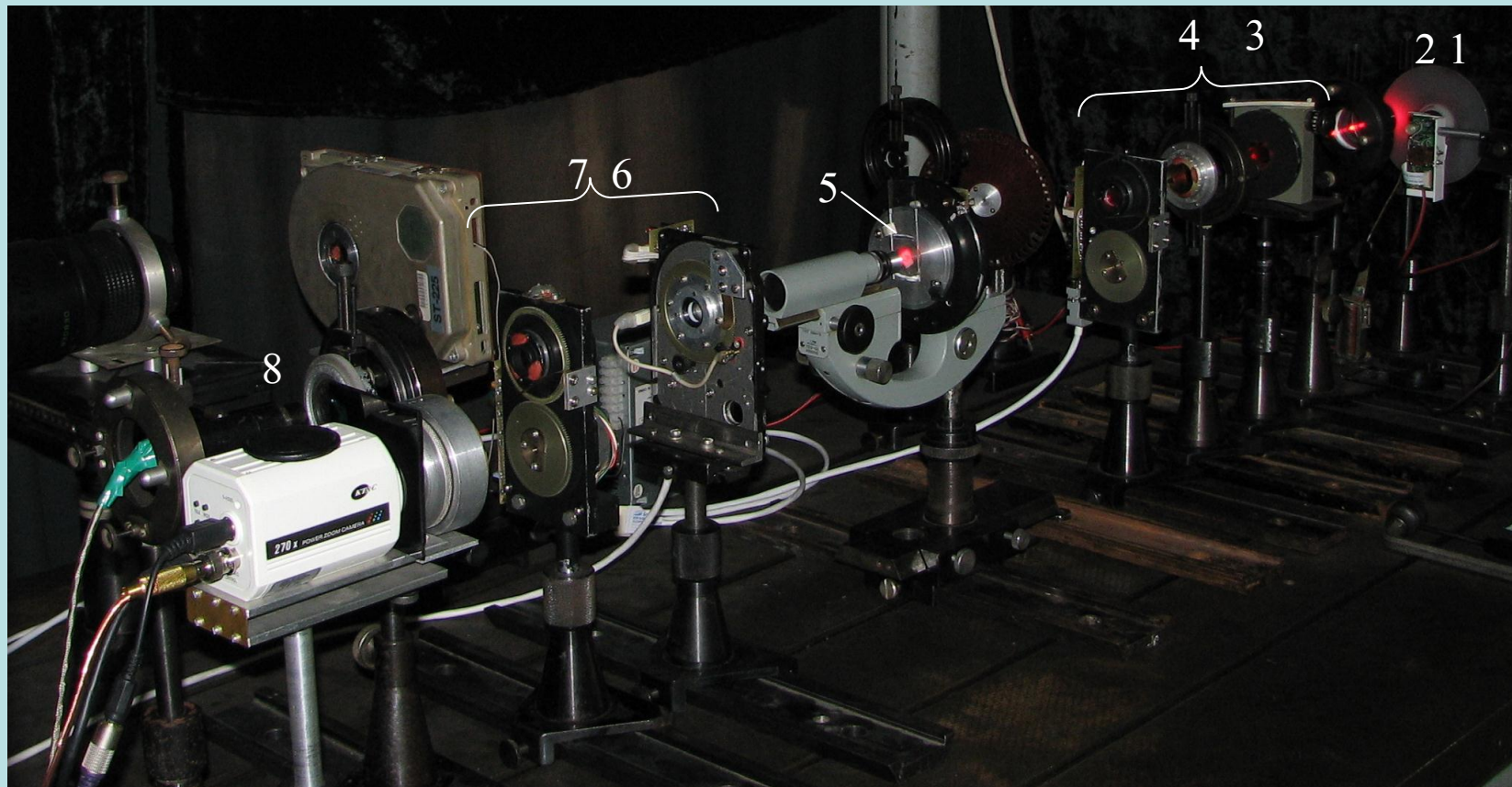
Довжина хвилі випромінювання 0,63 мкм.

Виявна здатність відносно зміни:

- лінійного та циркулярного двоприменезаломлення - $(2\pi/\lambda)d\Delta n = 0.1^\circ$,
- орієнтації швидкої осі та осі максимального пропускання - $\Delta\alpha, \Delta\theta = 0.1^\circ$
- лінійного та циркулярного дихроїзму $p_\perp/p_\parallel, (r_l-r_r)/(r_l+r_r) = 0.02$

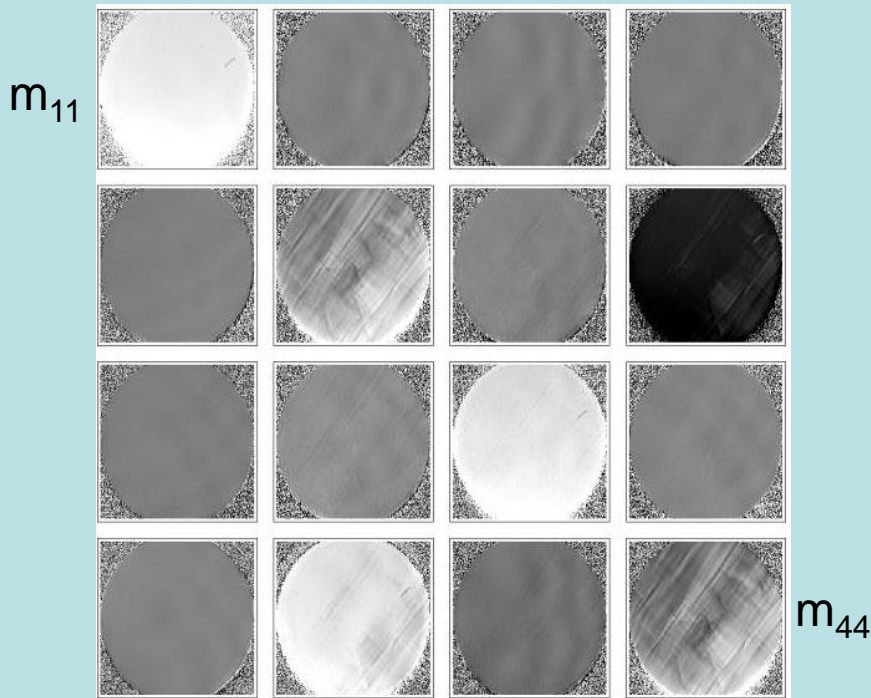
АДАПТИВНИЙ ЛАЗЕРНИЙ МЮЛЛЕР- ПОЛЯРИМЕТР

Модифікація макету для мікроскопічних досліджень

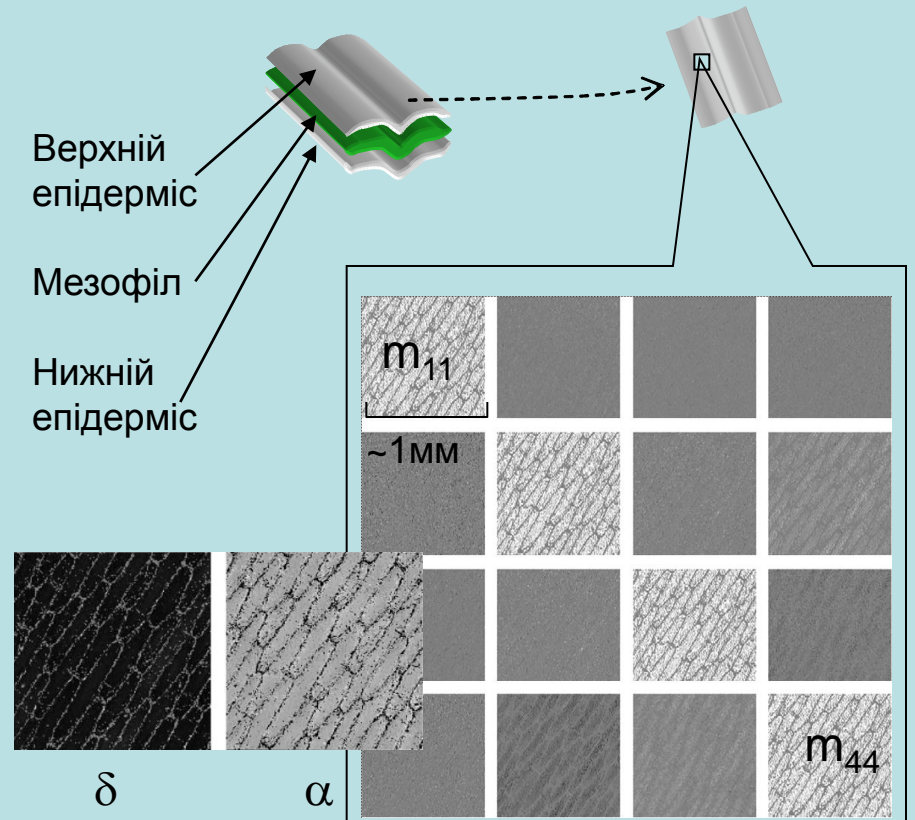


КОНТРОЛЬ ТА ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ АНІЗОТРОПІЇ МІКРО ТА МАКРОСКОПІЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ ОБ'ЄКТІВ

- Приклад контролю неоднорідності розподілу фазового зсуву ($\delta = \cos(m_{44})$) в повному перерізі для кварцової $\lambda/4$ фазової пластинки (ПФ-3-8).
- Заводський допуск неоднорідності $90^\circ \pm 4^\circ$; встановлені межі неоднорідності - $\pm 15^\circ$. (викликані неналежними умовами зберігання та експлуатації)
- Неоднорідності в орієнтації швидкої вісі не виявлені



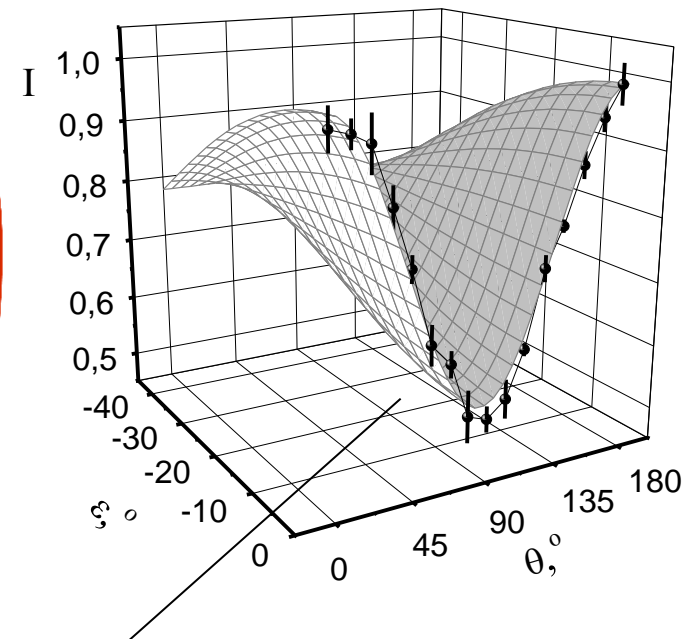
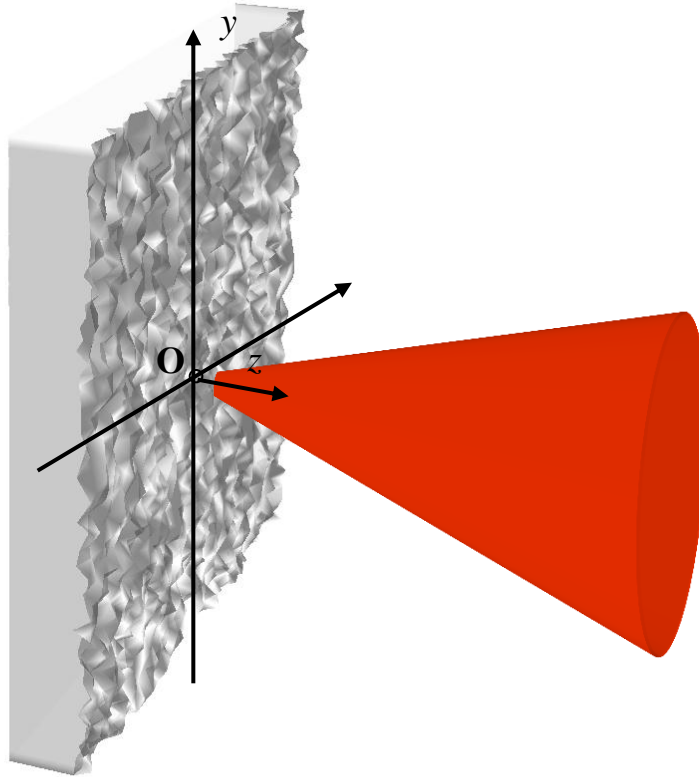
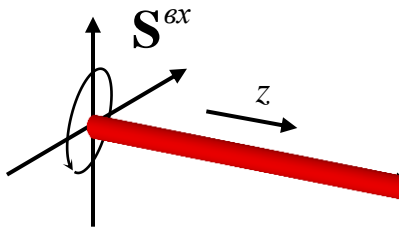
Приклад мікроскопічного дослідження розподілу анізотропних властивостей у верхньому епідермісі листка *Chlorophitum*.
 Встановлено переважний тип анізотропії - лінійне двопронезаломлення. Максимальне значення анізотропії ($\delta \sim 30^\circ$) в оболонках клітин, швидка вісь (α) лежить в площині оболонок. Центральна частина клітин має незначну анізотропію ($\delta \sim 2^\circ$)



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

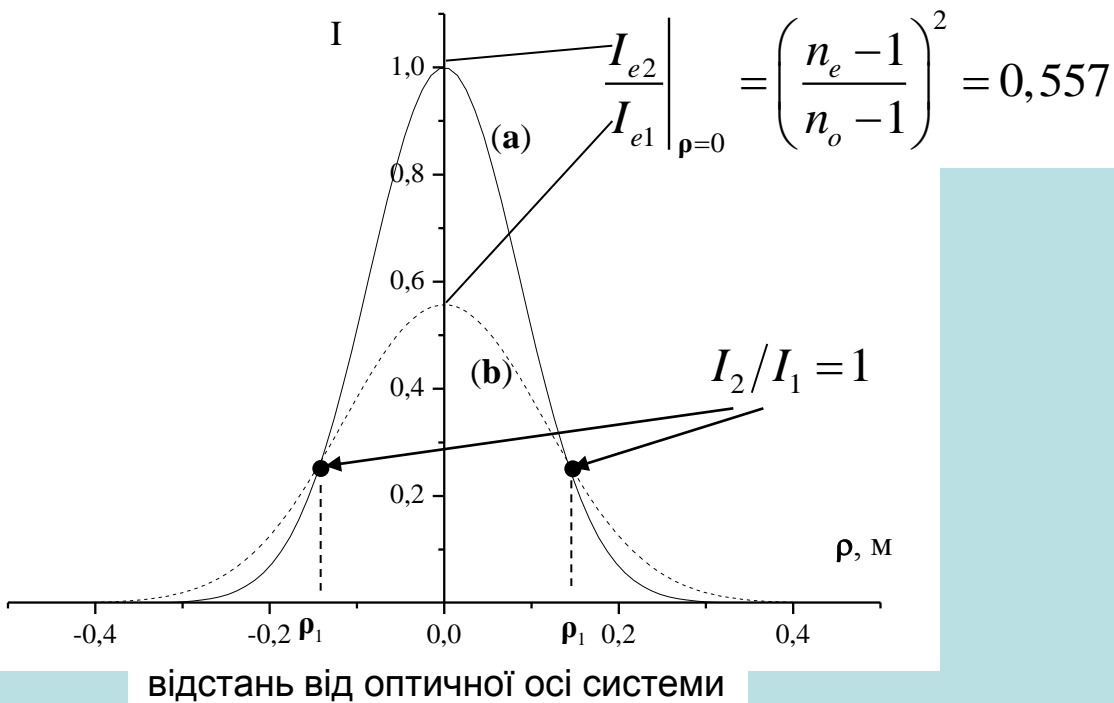
Двопророзаломлюючий кристал з неоднорідною (шорсткою поверхнею)

Вхідне випромінювання



(ефективний дихроїзм) - залежність інтенсивності I вихідного випромінювання від азимута орієнтації θ та кута еліптичності ϵ вхідного випромінювання

Причина спостереження явища ефективного дихроїзму – зміна ширини індикатрис 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 e_1 та e_2 – відповідають лінійним поляризаціям вхідного випромінювання з площинами коливання паралельній та перпендикулярній до швидкої вісі кристалу, відповідно.

$$\rho_{1,2} \approx 2 \frac{\sigma_h}{\rho_k} \sqrt{2 \frac{(n_e - 1)^2 - (n_o - 1)^2}{(n_o - 1)^2 (n_e - 1)^2} \ln \left(\frac{n_e - 1}{n_o - 1} \right)}$$

- 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.

Polkad

Вектор Стокса

Рез. усереднення

1.0000	0.0047%
0.0695	0.0029%
-0.3712	0.0025%
0.9367	0.0040%

Val. Pol = 1.0100
Azimuth = -39.7013
Ellipt = 34.0208
Int = 47457.4557

Режим измерений #
Зондирование номер5 of 5

46399.7829	47260.9815	47384.6547	47482.4842
-45673.4614	7451.2584	8238.8294	-22806.8247
-3871.4963	5895.4250	1375.4387	26121.4273
-2844.4071	-46493.3937	46766.8161	31670.6379

Delta 96
Fi0 3.8500
S Aver 10
M Aver 5
Mag Koeff 1.0048

Старт Стокс Старт юстировки Мотор

Матрица

Усредненная матрица

0.9995	0.0027	0.0011	-0.0002
-0.0003	0.9967	-0.0019	0.0013
-0.0031	-0.0016	1.0029	-0.0023
-0.0002	-0.0038	-0.0035	0.9994

Старт матрица Просмотр матриц Полн

1D Polarimetric complex

Stokes vector

$$S = \begin{bmatrix} 1.0000 \pm 0.0000 \\ -0.2268 \pm 0.0000 \\ -0.1586 \pm 0.0000 \\ 0.5765 \pm 0.0000 \end{bmatrix}$$

$\theta = 23673.9160$;
 $P = 0.6394$;
 $\phi = -72.5146$;
 $\epsilon = 32.1774$;

Calibrating/Probing/Mueller matrix info...

MyOpenGLForm

MyOpenGLForm

Results of analysis

Experimental matrix

1.00062	-0.042916	0.007547	-0.76208
0.025106	0.034674	0.658752	-0.011829
-0.064871	0.651128	-0.036837	0.056187
0.758455	0.00296	-0.00018	-1.001224

S.R. Cloude decomposition results

V1	V2	V3	V4	Entropy	Mrec-Mexp	Mdet-Mexp
1.0038	-0.0058	0.0002	0.0025	0.039366	5.529E-19	7.395E-3

1 Basis - [Cir.Ph][Lin.Ph][Lin.Am][Cir.Am] results

R	P	Teta	Delta	Alfa	Fi	dM
-0.4581	0.8771	81.1169	179.6481	29.793	16.1398	1.363E-16
-0.455	0.879	81.36	180	71.28	98.82	1.0716E-2

Test Mexp processing Depolarization Surface
 Poincare Sphar

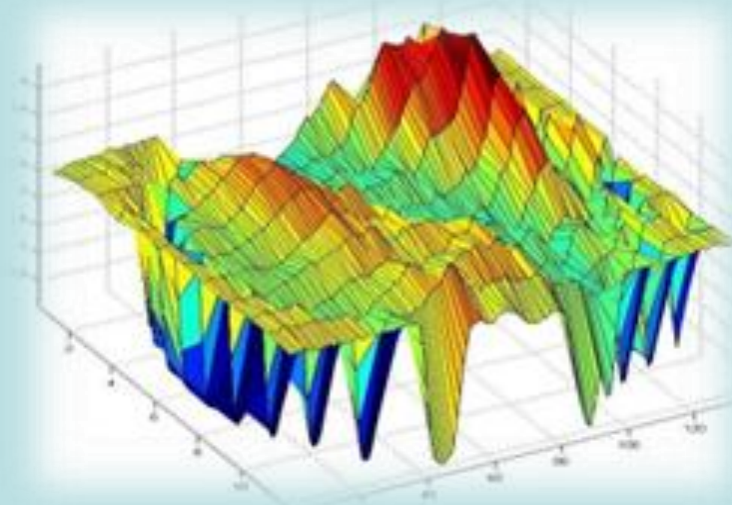
motor timeout WavInDevice Stopped

Windows taskbar: Total C..., Polarm..., InfoLas..., ABBYY..., Waver..., 1. SYG..., Уровен..., EN, 12:40

Параметри Стокса
Матрица Мюллера
Візуалізація еліпса поляризації
Визначені параметри анізотропії середовища
Сигнал з фотоприймача
Трансформація об'єктом сфери Пуанкаре
вхідних поляризацій

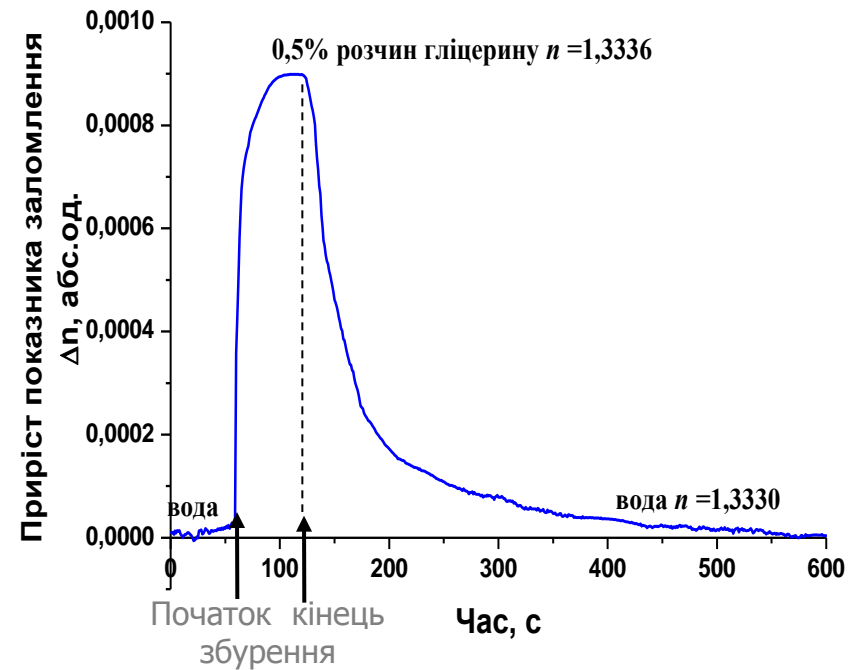
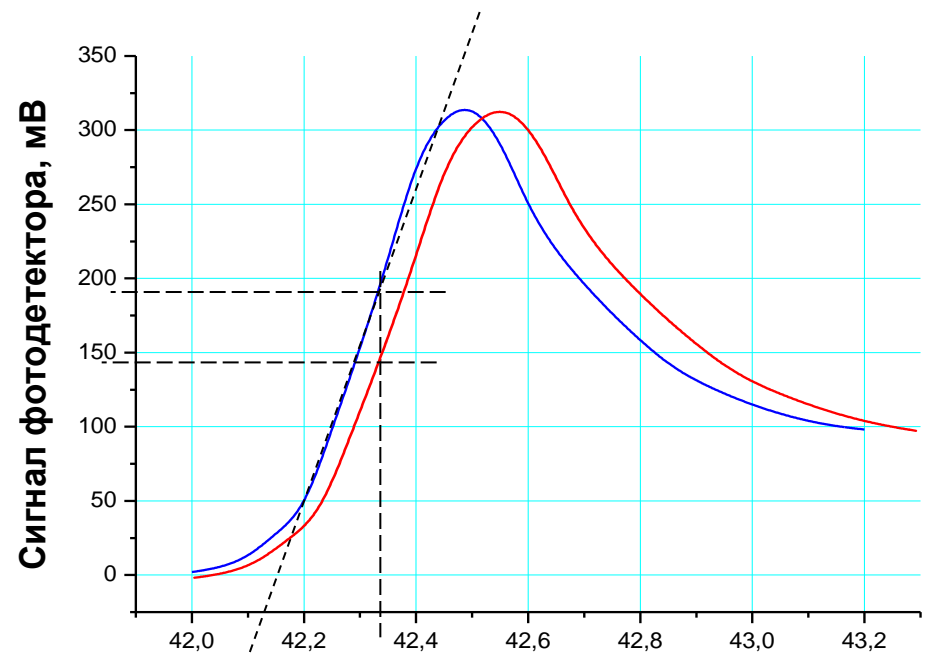
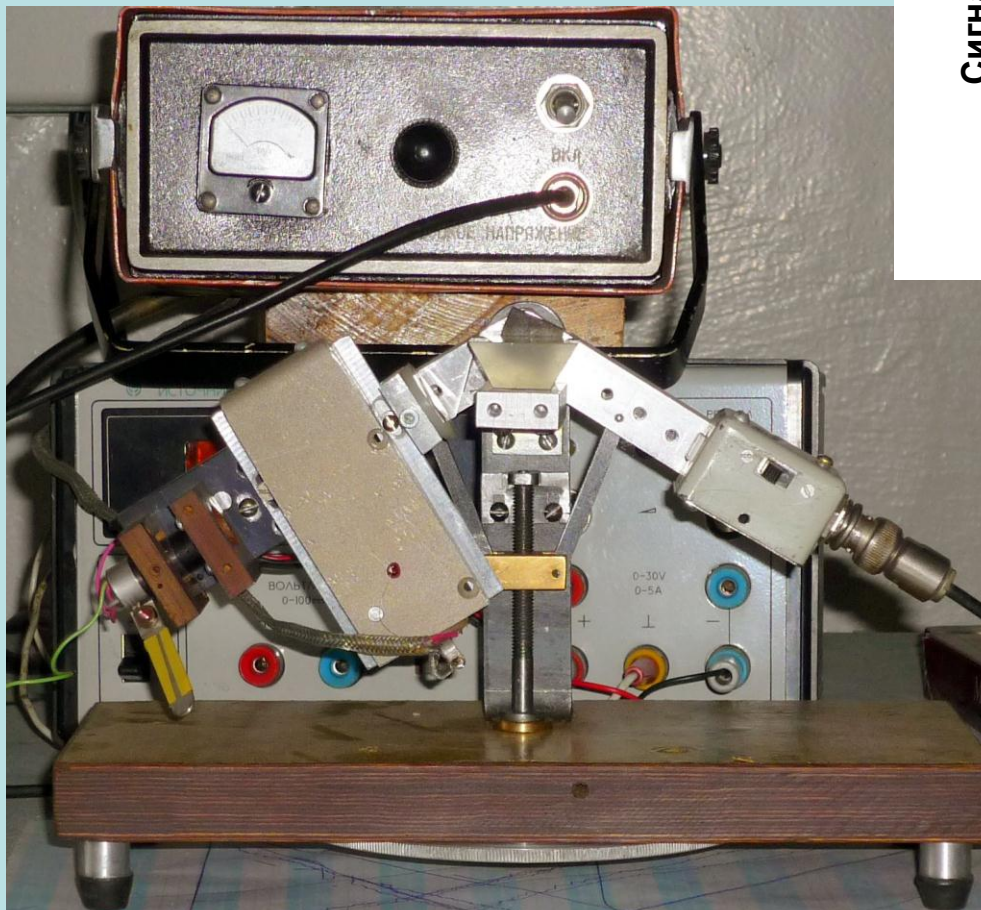
НАДЧУТЛИВИЙ ЛАЗЕРНИЙ ТЕНЗОМЕТР

Призначення: 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



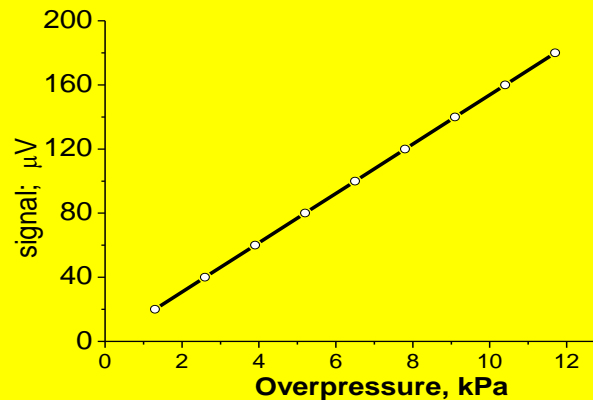
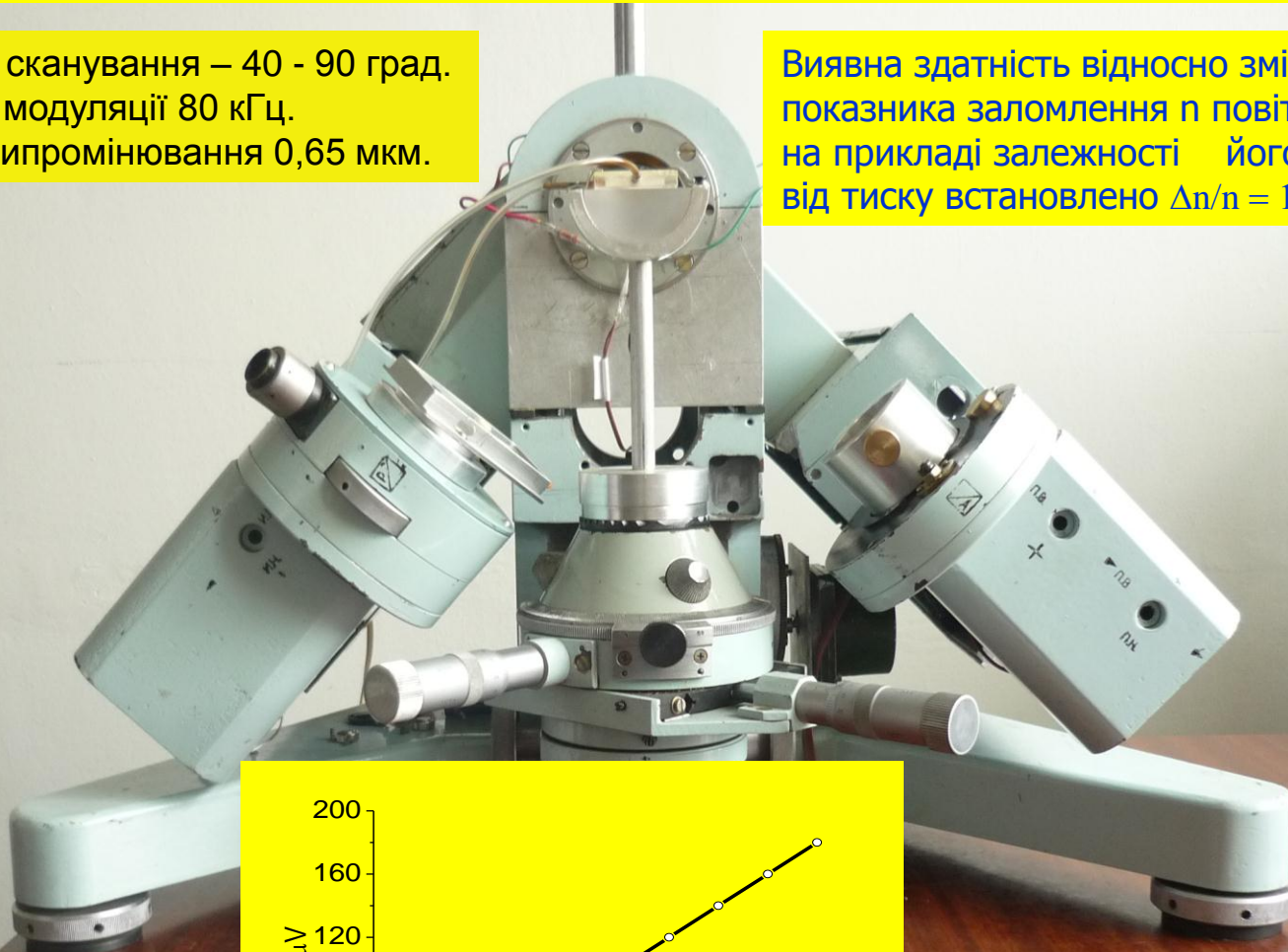
МОДУЛЯЦІЙНИЙ КУТОВИЙ ПОЛЯРИМЕТР

Кутовий діапазон сканування – 40 - 90 град.

Частота модуляції 80 кГц.

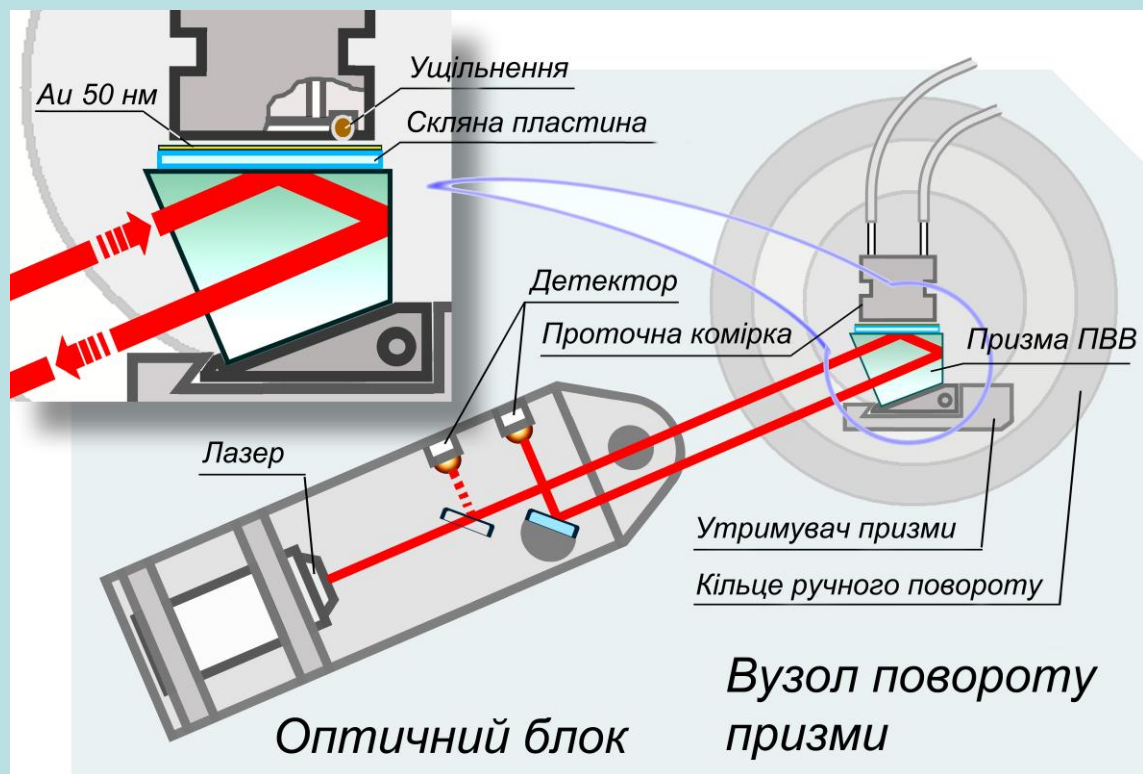
Довжина хвилі випромінювання 0,65 мкм.

Виявна здатність відносно зміни показника заломлення n повітря на прикладі залежності його від тиску встановлено $\Delta n/n = 10^{-8}$.



Прилади серії Плазмон

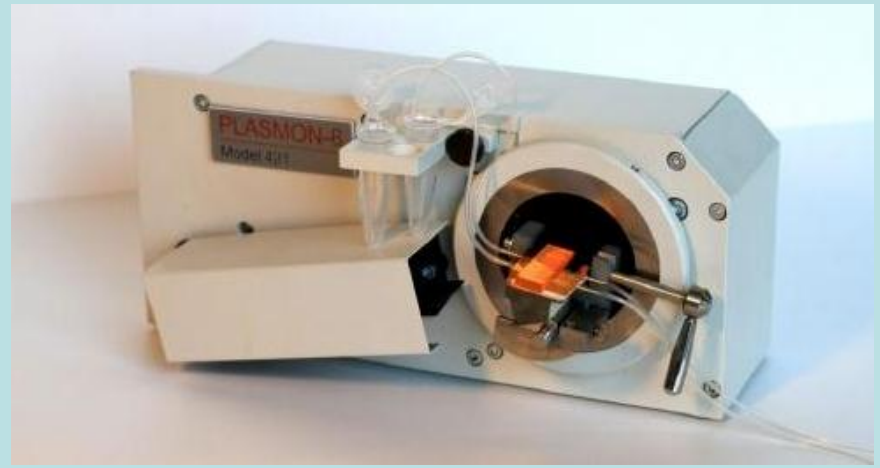
Оптична схема приладу серії Плазмон



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



Лейкоплазм



Плазмон-6

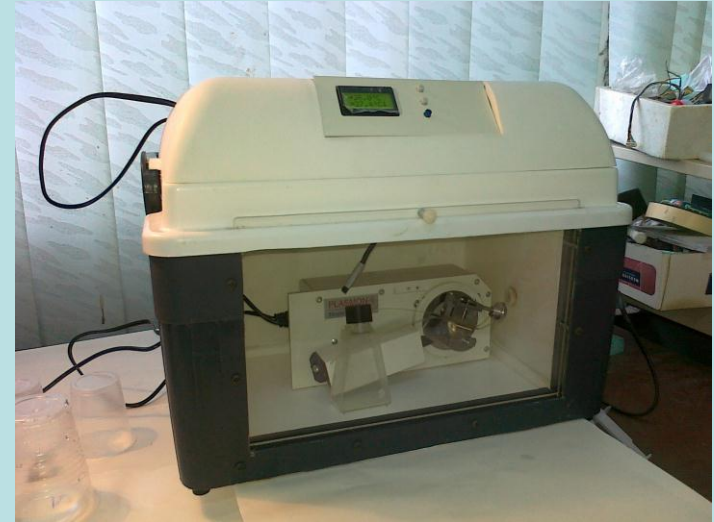


Плазмон-8

Галузі застосування:

Ветеринарія;
Медицина;
Біотехнологія;
Харчова промисловість;
Екологічний моніторинг;
Митний контроль.

Зовнішній вигляд 8-канального перистальтичного насоса та спеціального боксу для термостабілізації біосенсора



Швидкість прокачки:	1-500мкл/хв.
Кількість каналів:	8
Розташування каналів:	однорядне
Кількість роликів:	10
Діаметр трубок внутр./зовн.:	0,5/1,5 мм
Живлення:	110..230V AC
Розміри Д/Ш/В:	110x100x100 мм
Вага:	не більш за 360 г

Термобокс забезпечує:

- автоматичне регулювання і підтримка заданої температури, не залежної від температури навколишнього середовища;
- безперервне вимірювання температури в робочій камері термостата;
- цифрове завдання температури;
- цифрову індикацію поточної і заданої температур.