

Лабораторна робота №3 ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Мета роботи: дослідити поляризацію світла гелій-неонового лазера та перевірити виконання закону Малюса для інтенсивності поляризованого світла.

Обладнання: гелій-неоновий лазер із блоком живлення, поляризатор, фотодіод, прилад реєстрації.

1. Поняття поляризації світла

Світло – це *електромагнітна хвиля*, тобто хвиля, в якій електричне (\vec{E}) і магнітне (\vec{H}) поля коливаються та поширюються в просторі й часі. Світлова хвиля *поперечна*, тобто напрямки коливань векторів електричного і магнітного полів перпендикулярні одне до одного і до напрямку поширення хвилі, який визначається вектором швидкості \vec{v} (рис. 1). Відомо, що на відміну від повздовжніх хвиль, поперечні хвилі володіють *поляризацією*. *Поляризація електромагнітної хвилі або поляризація світла* – це просторова орієнтація одного з його польових векторів, а саме вектора напруженості електричного поля \vec{E} . Розглянемо найпростіший тип поляризації світла, проілюстрований на рис. 1. Площину, в якій відбуваються коливання вектора \vec{E} і яка перпендикулярна до напрямку поширення електромагнітної хвилі, називають *площиною поляризації*. Це «вертикальна» площина на рис. 1.

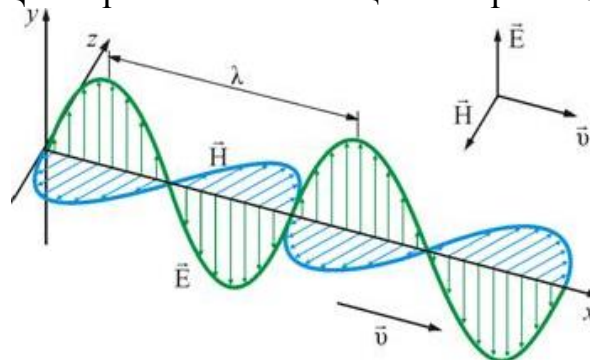


Рис. 1. Ілюстрація взаємної орієнтації векторів \vec{E} , \vec{H} і \vec{v} на прикладі лінійно поляризованої електромагнітної хвилі. Хвиля поширюється вздовж осі x , електричний вектор коливається вздовж y , а площина yz є *площиною поляризації* цієї хвилі.

2. Види поляризації

Залежно від поляризації світло поділяють на *поляризоване*, *неполяризоване* (або *природне*) і *частково поляризоване*. У свою чергу, для поляризованого світла розрізняють *лінійну* (або *плоску*), *еліптичну* та *колову* (або *циркулярну*) *поляризації*.

Пояснимо спочатку поняття *неполяризованого* світла – світла із «замаскованою» поляризацією, яке ми сприймаємо наче як відсутність поляризації. Звичайні джерела світла є сукупністю дуже великої кількості елементарних джерел (атомів або молекул), які незалежно одне від одного випромінюють світлові хвилі з різними фазами та орієнтаціями векторів \vec{E} і \vec{H} . Як наслідок, орієнтація цих векторів в сумарному світловому промені хаотична в просторі та часі. В площині, перпендикулярній до напрямку поширення світла, всі напрямки \vec{E} однаково ймовірні (рис. 2). Та-

ке світло, в якому присутні найрізноманітніші однаково ймовірні орієнтації вектора \vec{E} , називають *природним* або *неполяризованим*.

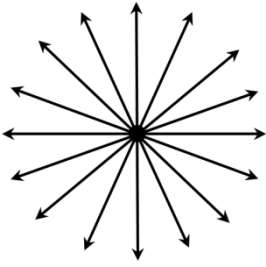


Рис. 2. Схематична ілюстрація природного (неполяризованого) світла, у якому водночас присутні різноманітні напрямки коливань вектора \vec{E} з однаковими ймовірностями.

На противагу до неполяризованого світла, *поляризованим* називають світло, в якому напрямки коливань вектора \vec{E} упорядковані. Зокрема, якщо кінець електричного вектора \vec{E} рухається вздовж напрямку поширення світла по прямій лінії, то світло є *лінійно поляризованим* (рис. 3). При коливаннях вектора \vec{E} світлової хвилі він займає площину, а тому таке світло ще називають *плоско поляризованим*.



Рис. 3. Схематична ілюстрація лінійно поляризованого світла: коливання вектора \vec{E} відбуваються в єдиному (тут – вертикальному) напрямку. Світлова хвиля поширюється в напрямку на спостерігача.

Вектор \vec{E} світлової хвилі може також обертатися навколо напрямку поширення хвилі. Тоді його кінець описує коловий або еліптичний циліндр. Перетини цих циліндрів перпендикулярною площиною є відповідно колом або еліпсом. Кажуть, що таке світло має відповідно *колову* (також *циркулярну*) або *еліптичну* поляризацію (рис. 4). Зрозуміло, що циркулярна поляризація є частковим випадком загальнішої еліптичної поляризації.

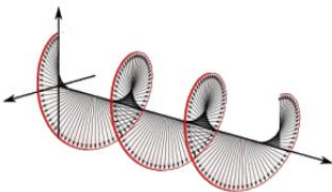


Рис. 4. Схематична ілюстрація циркулярно і еліптично поляризованого світла з обертально-поступальним рухом вектора \vec{E} .

Нарешті, якщо світловий пучок містить і поляризовану, і неполяризовану складові, то його називають *частково поляризованим* (рис. 5). Іноді говорять про *ступінь поляризації* – фактично частку поляризованої складової в світловому пучку.



Рис. 5. Схематична ілюстрація частково поляризованого світла з переважаним, але не єдиним напрямком коливань вектора \vec{E} .

3. Поляризатори

Поляризоване світло одержують за допомогою *поляризаторів*. *Поляризатор* (або *поляризаційний фільтр*) – це пристрій, що пропускає електромагнітні хвилі з

певною площиною коливань вектора \vec{E} . Поляризатори перетворюють природне світло на повністю або частково поляризоване світло. Робота поляризаторів базується на використанні одного із трьох оптичних явищ:

- подвійного променезаломлення;
- дихроїзму;
- зміни поляризації світла під час відбивання від межі розділу речовин.

Подвійне променезаломлення полягає в тому, що промінь світла, потрапляючи в анізотропний кристал, поділяється на два промені, які поширюються з різними швидкостями і мають взаємно перпендикулярні напрямки поляризації. Нагадуємо, що анізотропними називають речовини, властивості яких (зокрема, показники заломлення та коефіцієнти поглинання) є різними для різних напрямків.

На явищі подвійного променезаломлення працюють поляризатори, які називають *поляризаційними призмами*. Їх виготовляють з ісландського шпату (карбонату кальцію CaCO_3), кварцу (диоксиду кремнію SiO_2) або деяких інших кристалів. Поляризаційні призми працюють так, що один із повністю поляризованих променів проходить склеєну з двох частин призму, а другий промінь із ортогональною поляризацією покидає призму крізь бокову грань і надалі не використовується.

Дихроїзм – це залежність поглинання світла в анізотропних речовинах від напрямку. Наприклад, кристал турмаліну завтовшки в 1 мм практично повністю поглинає промінь з однією із двох взаємно ортогональних поляризацій (наприклад, із умовно вертикальною поляризацією). Тому світло, яке пройде крізь такий кристал, буде лінійно поляризованим (із умовно горизонтальною поляризацією). Поляризатори, що працюють на основі дихроїзму, називають *поляроїдами*. Поляроїди використовують, зокрема, для усунення явища засліплення водіїв від світла фар зустрічних автомобілів, для усунення відблисків та засвітки неба при фотографуванні тощо.

Нарешті, при *падінні природного світла на межу поділу* двох речовин відбитий і заломлений промені стають частково поляризованими. А саме, у відбитому промені переважатимуть коливання вектора \vec{E} , перпендикулярні до площини падіння (позначені точками на рис. 6), а в заломленому промені переважатимуть коливання вектора \vec{E} , паралельні до площини падіння (позначені стрілками на рис. 6). Тут площина падіння – це площина, що проходить крізь падаючий промінь і нормаль до поверхні падіння.

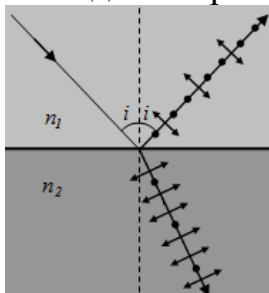


Рис. 6. Часткова поляризація відбитого і заломленого променів при падінні світла на межу поділу двох речовин. Показники заломлення речовин n_1 і n_2 , а кут падання дорівнює i .

Ступінь поляризації відбитого і заломленого світла залежить від кута падіння природного світла. Так, якщо світло падає на межу розділу під *кутом Брюстера* ($i = i_B$), то відбите світло повністю поляризоване (рис. 7). Кут Брюстера, який ще називають *кутом повної поляризації*, визначається формулою

$$\operatorname{tg} i_B = n_2/n_1. \quad (1)$$

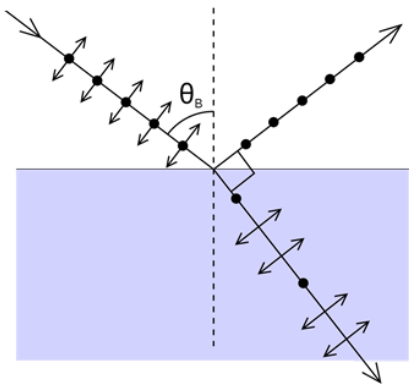


Рис. 7. Повна поляризація відбитого і заломленого променів при падінні світла на межу поділу двох речовин під кутом Брюстера i_B .

4. Закон Малюса для інтенсивності поляризованого світла

Нехай на шляху природного світла поставлено поляризатор. Фактично він є пристроєм, який пропускає світлові хвилі лише з деякою площиною коливань електричного вектора, який ми позначимо як \vec{E}_0 . Отже, на виході поляризатора одержимо лінійно поляризоване світло. Нехай тепер на шляху світла поставили ще один поляризатор. Такий другий поляризатор, призначений для аналізу стану поляризації світла, іноді називають *аналізатором*.

Очевидно, що довжина електричного вектора \vec{E} світлової хвилі на виході другого поляризатора визначається проекцією вектора \vec{E}_0 на напрямок пропускання цього поляризатора:

$$E = E_0 \cos \alpha,$$

де α – кут між напрямками пропускання першого та другого поляризаторів (не сплутати з коефіцієнтом поглинання речовини, який часто також позначають літерою α !). Оскільки інтенсивність світла пропорційна до квадрата електричного вектора ($I \propto E^2$), для інтенсивності I світла на виході системи двох поляризаторів одержимо

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

де I_0 – інтенсивність світла, яке виходить з першого поляризатора та падає на другий поляризатор, I – інтенсивність світла, яке пройшло другий поляризатор. Формула (2) для інтенсивності поляризованого світла, яке пройшло систему двох поляризаторів, описує *закон Малюса*. Він був встановлений в 1810 р. французьким фізиком Етьєном Луї Малюсом.

Якщо осі пропускання двох поляризаторів орієнтовані під кутом $\alpha = 0$, то кажуть, що такі поляризатори *паралельні*. Тоді вони пропускають усе світло: $I = I_0$. Якщо ж $\alpha = 90^\circ$, то поляризатори називають *схрещеними*. Тоді одержуємо $I = 0$.

Метою цієї лабораторної роботи є вивчення поляризації світла гелій-неонового лазера. Зазначимо, що лазерне світло може бути і поляризованим, і неполяризованим. Це залежить від конструкції лазера та будови його активної речовини. Іншими словами, поляризація лазерного світла не є його обов'язковим атрибутом, таким як монохроматичність або висока скерованість світла лазерів. Наприклад, випромінювання твердотільних лазерів переважно неполяризоване. Проте світло гелій-неонового лазера таки поляризоване. Це досягають завдяки тому, що в резонаторі лазера поміщено пластини P_1 і P_2 , орієнтовані під кутом Брюстера i_B до напрямку поширення променя (див. іншу лабораторну роботу №2, присвячену лазерам). Якщо

кут падіння променя дорівнює i_B , то від пластин P_1 і P_2 відбивається лише те світло, яке поляризоване перпендикулярно до площини падіння. Водночас, світло, яке поляризоване в площині падіння, покидає резонатор лазера і не підсилюється.

Основним практичним завданням лабораторної роботи є перевірка закону Малюса. Для поляризованого світла лазера цей закон можна вивчати експериментально за допомогою установки, схему якої наведено на рис. 8. Зазначимо, що тут лазер 1 дає поляризоване світло, а тому його можна вважати своєрідним «першим» поляризатором. Тоді поляризатор 3 буде вже «другим». Відповідно, ми маємо справу із системою двох поляризаторів.

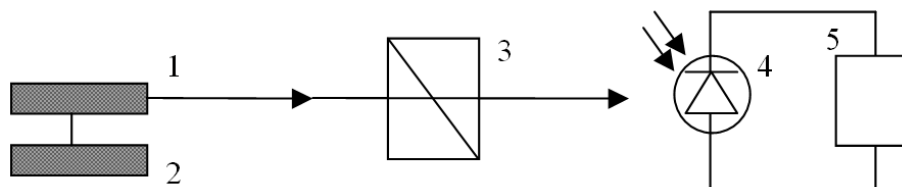


Рис. 8. Схема установки для перевірки закону Малюса: 1 – лазер, що випромінює поляризоване світло; 2 – блок живлення лазера; 3 – поляризатор; 4 – фотодіод; 5 – пристрій реєстрації.

5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати установку рис. 8.

2. Скерувати лазерний пучок на фотодіод і виміряти його струм I (мкА), який прямо пропорційний до інтенсивності світла після поляризатора, залежно від кута α ($^\circ$). Кут α приймає значення від 0° до 360° із кроком 10° (або з іншим кроком, заданим викладачем).

3. Результати вимірювань занести в Таблицю 1.

$\alpha, ^\circ$	$I, \text{мкА}$
0	...
10	...
20	...
...	...
350	...
360	...

Таблиця 1

Результати вимірювань залежності інтенсивності лазерного світла після поляризатора від кута між площиною поляризації лазерного світла і площиною пропускання поляризатора

4. Ознайомитися з одним зі стандартних програмних пакетів для чисельного аналізу даних і наукової графіки. Наведені нижче вказівки та ілюстрації стосуються програмного пакету Origin. У разі його обрання перенести результати вимірювань з Таблиці 1 у таблицю Origin (див. Таблицю 2).

	A(X)	B(Y)
Long Name	α	I
Units	$^{\circ}$	mkA
Comments		
1	0	...
2	10	...
3	20	...
4	30	...
5
36	350	...
37	360	...

Таблиця 2

Таблиця програми Origin для перенесення результатів вимірювань із Таблиці 1

5. Ознайомитись з полярною системою координат для побудови експериментального графіка залежності інтенсивності I світла на виході поляризатора від кута поляризатора α .

Коротко опишемо особливості даної системи координат. Полярна система координат містить точку O (*полюс*) і промінь (*полярну вісь*), яка виходить із точки O . Координати точки на площині задають полярним кутом α і полярним радіусом r . *Полярний радіус* r – це відстань від точки до полюса O , а *полярний кут* α – це кут, на який потрібно повернути полярну вісь проти годинникової стрілки, щоби потрапити в цю точку (див. рис. 9).

Координатними лініями в полярній системі координат є концентричні кола, які відповідають полярним радіусам r , і промені, які відповідають полярним кутам α . Тому полярна система координат має вигляд полярної сітки (рис. 10).

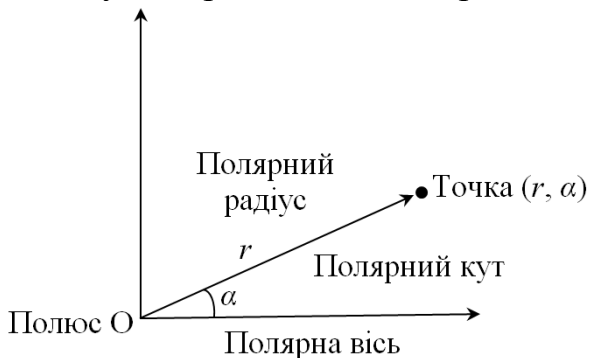


Рис. 9. Точка з координатами r і α у полярній системі координат.

6. Побудувати *експериментальний графік* залежності інтенсивності світла I на виході поляризатора від кута поляризатора α у полярній системі координат. Для цього слід виконати такі дії.

А. Визначити полярний радіус r як *нормовану інтенсивність* I/I_0 , тобто відношення інтенсивності I до її максимального значення I_0 :

$$r = I/I_0. \quad (3).$$

Б. Для розрахунку нормованої інтенсивності в таблиці Origin створити новий стовпець $C(Y)$ (за допомогою комбінації клавіш Ctrl+D або опції Add New Column у випадаючому меню, яке з'являється, коли клікнути правою клавішею миші по екрану на вільному місці справа від таблиці).

В. Виділити стовпець $C(Y)$, клікнувши лівою клавішею миші по його назві. Стовпець виділиться чорним кольором. Клікнувши правою клавішею миші по виділеному стовпцеві, ми викличемо випадаюче меню, з якого обираємо опцію Set

Column Values. Столпцеві C(Y) присвоїти значення відповідно до формули (3) (див. рис. 11).

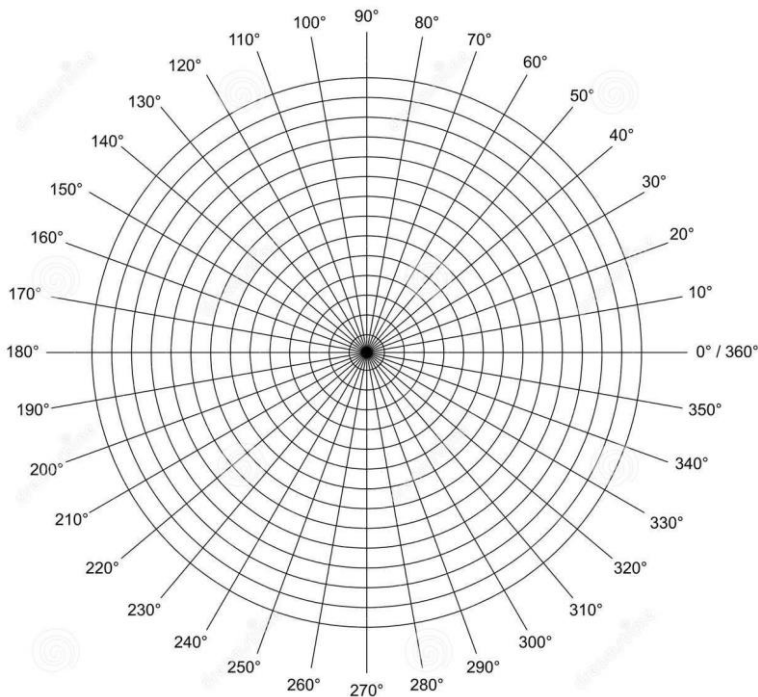


Рис. 10. Координатні лінії у полярній системі координат у вигляді полярної сітки.

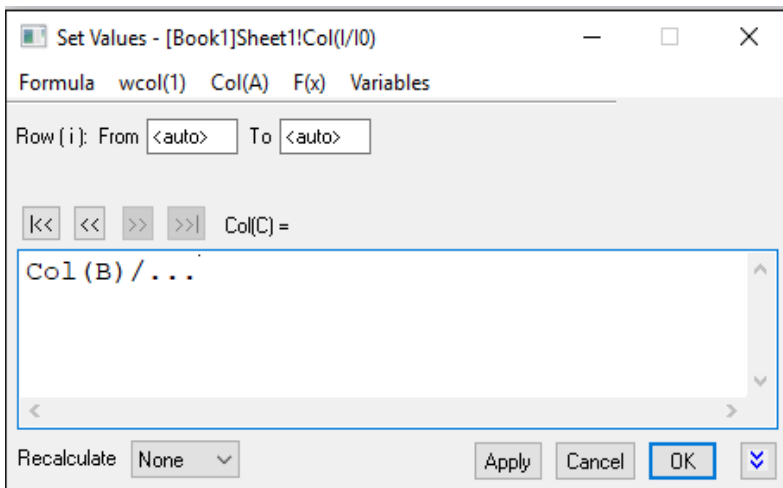


Рис. 11. Діалогове вікно для присвоєння стовпцеві C(Y) значення I/I_0 . У формулі замість трьох крапок потрібно підставити найбільше експериментальне значення інтенсивності I_0 .

Г. Побудувати графік залежності $I/I_0 = f(\alpha)$, використавши таку послідовність пунктів меню: Plot -> Specialized -> Polar Theta (X) r(Y). У діалоговому вікні присвоїти значення X і Y відповідним стовпцям (див. рис. 12) і вибрати тип графіка «Scatter».

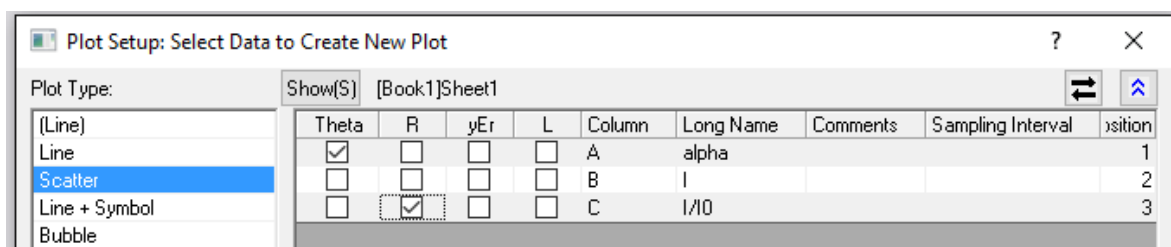


Рис. 12. Діалогове вікно вибору даних для побудови експериментального графіка $I/I_0 = f(\alpha)$ у програмі Origin.

Приклад експериментального графіка $I/I_0 = f(\alpha)$ зображено на рис. 13.

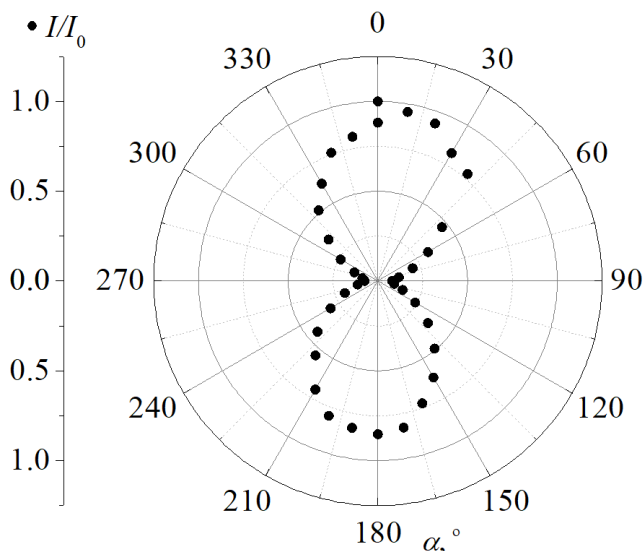


Рис. 13. Приклад графіка залежності $I/I_0 = f(\alpha)$. Експериментальний графік побудовано точками, які не потрібно з'єднувати лініями.

7. Побудувати у полярній системі координат *теоретичний графік* залежності інтенсивності I світла на виході поляризатора від кута поляризатора α . Для цього слід виконати такі дії.

А. Як і для експериментального графіка, полярний радіус r слід також визначити як *нормовану інтенсивність* – тобто інтенсивність I , поділену на її максимальне значення I_0 : $r = I/I_0$. Тоді з формули (2) одержимо залежність

$$r(\alpha) = \cos^2 \alpha . \quad (4)$$

Б. У таблиці Origin створити нові стовпці D(Y) і E(Y). У стовпцеві D(Y) перевести значення кутів α із градусів у радіани за формулою $\alpha(\text{рад}) = \alpha(^{\circ})\pi/180$ (див. рис. 14), а стовпцеві E(Y) присвоїти значення відповідно до формули (4) (див. рис. 15).

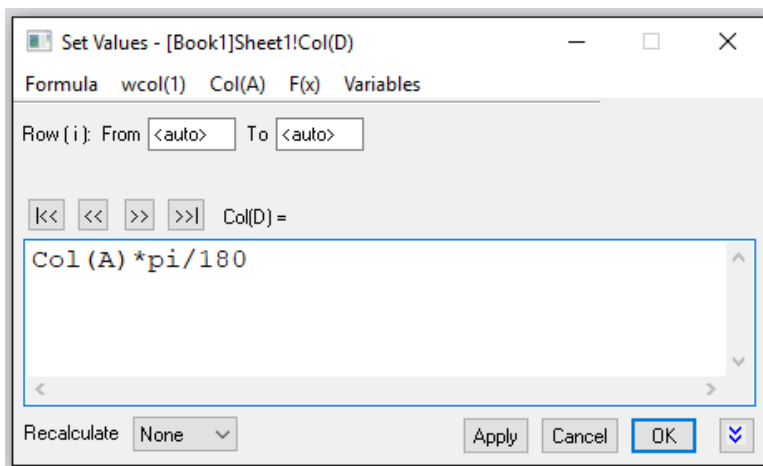


Рис. 14. Діалогове вікно для присвоєння стовпцеві D(Y) значень кутів α , переведених із градусів у радіани.

В. Для побудови теоретичного графіка $I/I_0 = \cos^2 \alpha = f(\alpha)$ вживають таку послідовність пунктів меню програми Origin: Plot -> Specialized -> Polar Theta (X) r(Y). У дія-

логовому вікні присвоюють значення X і Y відповідним стовпцям (рис. 16) і обирають тип графіка «Line».

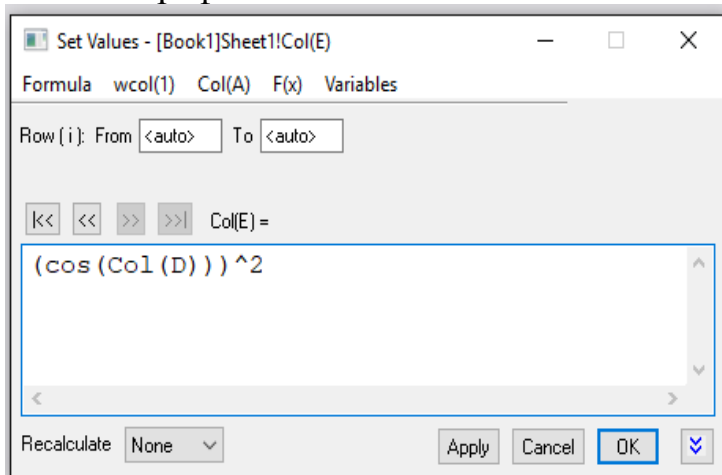


Рис. 15. Діалогове вікно для присвоєння стовпцеві E(Y) значень $\cos^2\alpha$.

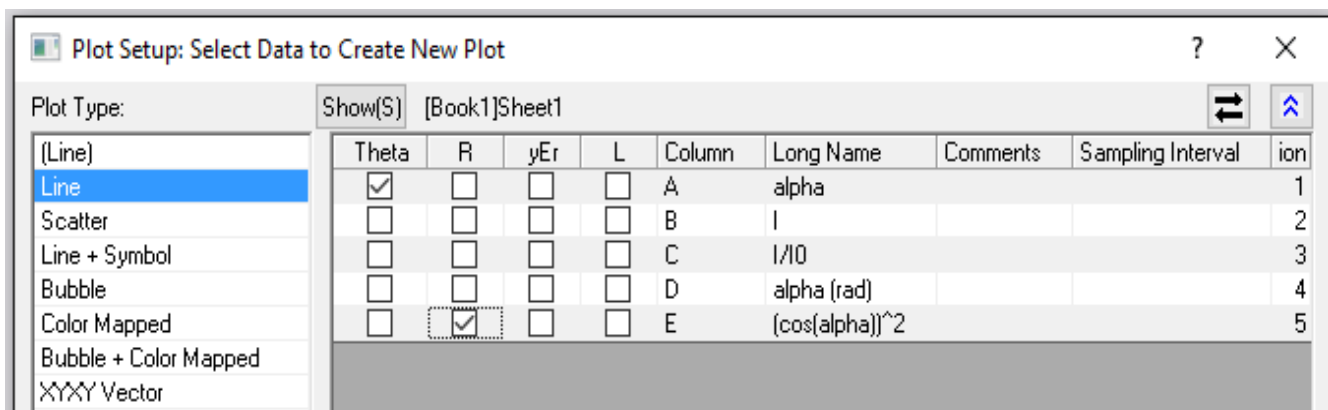


Рис. 16. Діалогове вікно вибору даних для побудови теоретичного графіка $I/I_0 = \cos^2\alpha = f(\alpha)$ у програмі Origin.

Приклад теоретичної залежності $I/I_0 = \cos^2\alpha = f(\alpha)$ у полярних координатах показано на рис. 17.

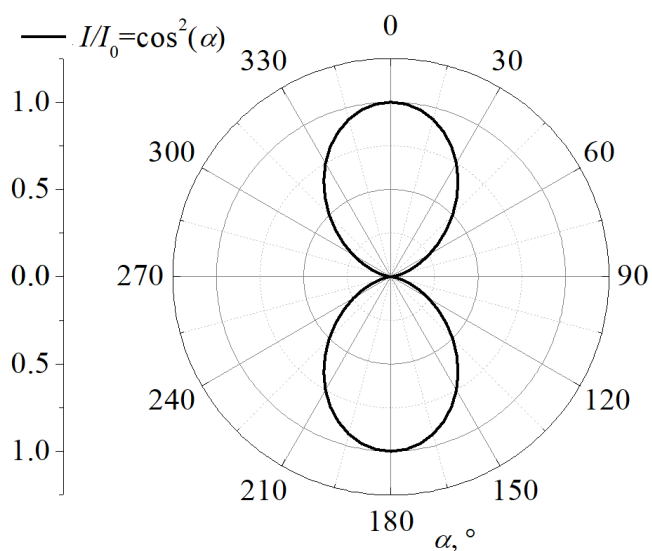


Рис. 17. Приклад теоретичного графіка залежності $I/I_0 = \cos^2\alpha = f(\alpha)$. Теоретичний графік побудовано суцільною лінією.

8. Порівняти експериментальну та теоретичні залежності інтенсивності лазерного світла на виході поляризатора. Зробити висновки стосовно узгодження цих залежностей. У разі їхньої розбіжності пояснити фактори, які могли вплинути на експериментальні і/або теоретичні дані.

Наведемо деякі міркування на допомогу студентів у цьому завданні. Порівнюючи графіки рис. 13 і рис. 17, бачимо деяку розбіжність експериментальної кривої $I/I_0 = f(\alpha)$ із теоретичною. Частково вона зумовлена похибками експерименту.

На додаток, спостерігаємо поворот «пелюсток» експериментальної залежності відносно вертикально орієнтованих «пелюсток» теоретичної залежності. Причиною є те, що на практиці ми безпосередньо працюємо не з кутами α поляризатора, а лише з показами (чи відліками) α' , які зчитуємо на поворотному механізмі поляризатора. Останні покази загалом не дорівнюють кутам α . Скажімо, кут $\alpha = 0$ повинен відповідати поляризації лазерного світла, паралельній до напрямку поляризації, заданого поляризатором, а тому максимальній інтенсивності світла на виході. А кут $\alpha = 90^\circ$ повинен відповідати їхній схрещеній орієнтації, а тому нульовій інтенсивності світла.

Отже, кут $\alpha = 0$ можна визначити як той показ поляризатора α' , при якому експериментально одержана інтенсивність I набуває найбільшого значення за законом Малюса ($I = I_0$ і $r = I/I_0 = 1$). Наприклад, якщо значення $I = I_0$ і $r = 1$ трапляються для показу $\alpha' = 17^\circ$, то відповідний кут α дорівнює $\alpha = 0$. Тому загальна формула переведення показів α' в кути α така: $\alpha = \alpha' - 17^\circ$. Проте переведення показів α' до кутів α ми не ставимо як завдання, обов'язкове для виконання студентами.