МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НОВІТНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт
для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування»,
спеціальностей 7(8).05100304 «Прилади і системи екологічного моніторингу»

Рекомендовано Вченою радою приладобудівного факультету

Київ
НТУУ «КПІ»
2014

УДК 502.2; 502.3; 502.051; 004.9

Порєв В.А., Маслов В.П., Маркін М.О. Новітні інформаційно-вимірювальні технології. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», спеціальностей 7(8).05100304 «Прилади і системи екологічного моніторингу» / Укладачі: В. А. Порєв, В. П. Маслов, М. О. Маркін – К.: НТУУ «КПІ», 2014. - 40 с.

Гриф надано Вченою радою приладобудівного факультету
(протокол № 9/14 від "27" жовтня 2014 р.)

Навчальне видання

НОВІТНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ
Методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт
для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування»,
спеціальностей 7(8).05100304 «Прилади і системи екологічного моніторингу»

Укладачі: *Порєв Володимир Андрійович., д.т.н., професор*
Маслов Володимир Петрович, д.т.н., доцент
Маркін Максим Олександрович, к.т.н., доцент

Відповідальний редактор: *Маркіна О.М.*

Рецензент: *Безвесільна О.М., д.т.н., професор*

За редакцією укладачів

ЗМІСТ

ЗМІСТ 3

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ПРИНЦИП РОБОТИ ТА МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕФРАКТОМЕТРА ТИПУ «ПЛАЗМОН» 5

Теоретичні відомості 5

Прилади і обладнання 10

Завдання на лабораторну роботу 13

Порядок виконання роботи 13

Звіт про лабораторну роботу 15

Контрольні запитання 15

Література 16

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 КОНТРОЛЬ НАЯВНОСТІ ЛЕТЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ В ПОВІТРІ РОБОЧИХ ПРИМІЩЕНЬ 19

Теоретичні відомості 19

Прилади і обладнання 23

Завдання на лабораторну роботу 24

Порядок виконання роботи 25

Звіт про лабораторну роботу 26

Контрольні запитання 26

Література 26

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ПОРІВНЯННЯ ОПТИЧНОГО ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ОЛІЇ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЬНОЇ РЕЧОВИНИ 29

Теоретичні відомості 29

Прилади і обладнання 34

Завдання на лабораторну роботу 35

Порядок виконання роботи 35

Звіт про лабораторну роботу 36

Контрольні запитання 36

Література 37
ДОДАТОК А. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ПРЯМИХ РІВНОТОЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ 39
Література 40

Лабораторна робота №1

Принцип роботи та метрологічні аспекти рефрактометра типу «Плазмон»

Мета роботи: вивчити принцип дії рефрактометра на основі поверхневого плазмонного резонансу та навчитися вимірювати кут мінімуму плазмонного резонансу.

Теоретичні відомості

З кінця XX ст. інтенсивно розвиваються нові напрями в електроніці та нанооптиці, пов'язані з вивченням і застосуванням поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ). У науковій літературі такі хвилі називають також поверхневими поляритонами (ПП, англ. surface polaritons), а хвилі на межі середовищ з високою провідністю (метали, напівпровідники) і повітрям - поверхневими плазмон-поляритонами (англ. surface plasmon polaritons), рідше - поверхневими плазмонами, (англ. surface plasmons), виражаючи цим визначальний внесок плазми (вільних носіїв) у їхнє формування. Ці хвилі є окремим випадком широкого загалу поверхневих електромагнітних хвиль, які існують на межі між двома середовищами [2].

Поверхневі плазмон-поляритони (ПП) - це взаємопов'язані між собою коливання густини вільних зарядів усередині провідного середовища та векторів електромагнітного поля в діелектрику, які поширюються вздовж межі між ними одночасно у двох середовищах (рис. 1).

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП. Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ПП і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП.

Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ІІІІ і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

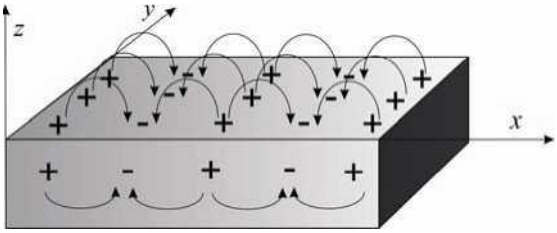

Рис. 1. Схематичне зображення взаємопов'язаних коливань електронного газу у металі (z < 0) та поля в діелектрику (z > 0), що формують ПЕХ[1]

Історичні аспекти, пов'язані з вивченням ПЕХ. Шверхневі електромагнітні хвилі вперше описані А. Зоммерфельдом 1899 р. для випадку поширення хвилі вздовж циліндричного провідника [3]. У 1907 р. І. Ценніке математично описав поширення електромагнітних хвиль уздовж поверхні Землі (провідника) для пояснення далекого радіозв'язку [4].

На початку XX ст. англійський фізик Р. Вуд виявив темні лінії у спектрах дифракції білого світла на металевій ґратці - аномалії Вуда: світло деяких довжин хвиль не відбивалося, а отже, його поглинала ґратка. У 40-х роках це явище пояснив італійський фізик У. Фано, припустивши, що енергія світла, яке не відбивалося від ґратки, затрачалася на збудження поверхневої хвилі у металевій ґратці [5]. Він обґрунтував також метод збудження поверхневих плазмонних хвиль з використанням поверхневої дифракційної ґратки [5].

Приблизно в той же час у ході дослідження розсіяння електронних пучків на тонких металевих плівках виявлено втрати, зумовлені взаємодією на поверхні [6]. Шзні- ше з’ ясовано, що ці втрати мають однакову природу з втратами світла на дифракційних ґратках у видимій ділянці спектра [7]. До того часу також вивчено збурення поверхневих хвиль Зоммерфельда видимим світлом [8] і побудовано загальний опис цих явищ як поверхневих плазмон-поляритонів.

У 60-х роках XX ст. А. Отто [9] та Е. Кречман [10] запропонували способи збудження поверхневих плазмонних хвиль, які ґрунтувалися на методі порушення повного внутрішнього відбивання.

Новий імпульс у дослідженні поверхневих ІІ дала праця французьких фізиків Т. Еббесена та ін. [11], які досліджували спектри пропускання металевих плівок з отворами, діаметр яких d << X: якщо положення отворів було періодичним, то пропускання світла через таку систему зростало в декілька разів. Результати експериментів пояснювали тим, що світло, яке падає на металеву плівку, проходить крізь отвори, збуджуючи поверхневі ІІ , які на іншому боці отвору знову перетворювалися у світло. Ця праця стала вихідною у серії досліджень, присвячених взаємодії структурованих металевих плівок зі світлом, які сформували новий напрям фотоніки, який називають “наноплазмонікою” [12-16].

У 1988 р. німецькі фізики В. Кноль та Б. Ротенхойсер запропонували схему і реалізували мікроскоп на поверхневих хвилях [17]. Розвиток сканувальної ближньопольової мікроскопії дав змогу досліджувати поверхневі поляритони у ближньому полі, що послугувало додатковим імпульсом для розвитку теоретичних моделей взаємодії ІІІІ з неоднородностями поверхонь, їхнього застосування в новітніх фотонних технологіях [18].

На рубежі XX-XXI ст. розпочалося інтенсивне дослідження ПЕХ у мікрохвильовому та терагерцовому діапазонах спектра [19] та в матеріалах з високотемпературною надпровідністю [20].

Поверхневий плазмон – електромагнітна хвиля, що приводиться в рух зміною полярності поверхневих зарядів, які поширюються вздовж границі розділу метал-діелектрик. Добрими носіями для поверхневих плазмонів є метали, такі як алюміній, золото і срібло, у яких $\mathrm{Re}\{\varepsilon_m\} < 0$ (де ε_m — діелектрична постійна металу). По мірі зменшення товщини металевої плівки поверхневі плазмони, існуючі окремо (у разі товстої металевої плівки) на кожній межі метал-діелектрик, зв'язуються, приводячи до двох різних електромагнітних збурень (названим модами Фано), які поширюються паралельно тонкої металевої плівці. [22]

Поверхневі електромагнітні хвилі називають також поверхневими поляритонами (ПП, англ. surface polaritons), а хвилі на межі середовищ з високою провідністю (метали) і повітрям – поверхневими плазмон-поляритонами (англ. surface plasmon polaritons), рідше – поверхневими плазмонами, (англ. surface plasmons), виражаючи цим визначальний внесок плазми (вільних носіїв) у їхнє формування. Ці хвилі є окремим випадком широкого загалу поверхневих електромагнітних хвиль, які існують на межі між двома середовищами.

Поверхневий плазмонний резонанс (ППР) це явище порушення умови повного внутрішнього відбиття, коли значна частина енергії падаючого поверхню металу світла перетворюється в енергію плазмонів, внаслідок чого інтенсивність відбитого від поверхні металевої плівки світла різко спадає. ППР спостерігається при умові повного внутрішнього відбиття і характеризується певним кутом відбиття та значенням показника заломлення речовини над поверхнею металу.

Поверхневий плазмон безпосередньо не пов'язаний з електромагнітним випромінюванням в середовищі контактуючому з металом, так як швидкість плазмону менше за швидкість світла. Технічний спосіб, який дозволяє використовувати поверхневі плазмони в оптиці, базується на використанні повного внутрішнього відбиття. При повному внутрішньому відбитті вздовж поверхні, яка відбиває світло, розповсюджується електромагнітна хвиля,

швидкість якої менша за швидкість світла і залежить від кута падіння випромінення. Якщо при певному куті падіння швидкість цієї хвилі співпадає зі швидкістю поверхневого плазмону на поверхні металу, то умова повного відбиття порушується і відбиття перестає бути повним, виникає поверхневий плазмонний резонанс. Але в металічних системах нанорозмірів виникає модифікація колективних електронних збуджень. Внаслідок малих розмірів системи вимога до співпадіння швидкості розповсюдження збудження і електромагнітної хвилі відпадає, тому поверхневі плазмони безпосередньо пов'язані зі збуджуючим випромінюванням.

Схема спостереження ППР, називається «геометрією Кречмана» (рис. 2). Світло з хвильовим вектором ***k*** проходить через оптично прозоре середовище 1 з відносно великим показником заломлення, наприклад, через призму зі скла, і падає під певним кутом на тонку металеву плівку 2, нанесену на поверхню цього скла. Кут падіння повинен бути більшим за кут повного внутрішнього відбиття. Частина світла проходить в метал і розповсюджується в ньому у вигляді швидко загасаючої електромагнітної хвилі 3. Ця хвиля збуджує електронну плазму з хвильовим вектором k_{SP}. Над металевою плівкою розташована досліджувана речовина 4.

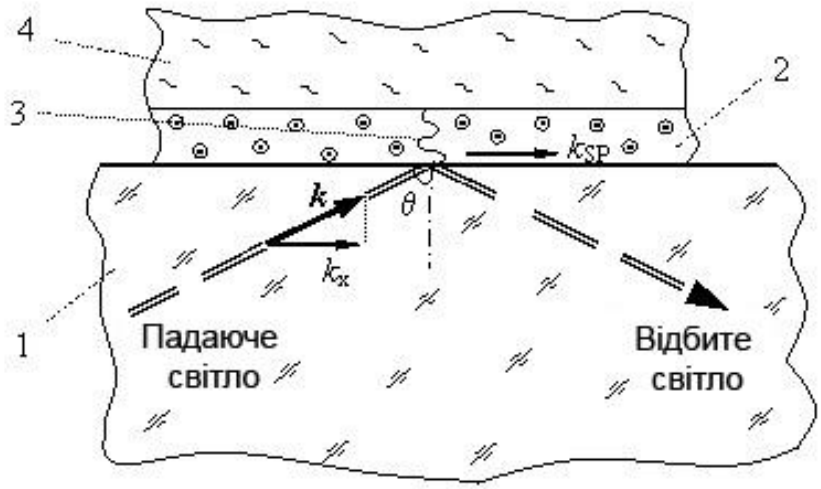

Рис. 2. Схема оптичного спостереження ППР

Якщо металева плівка 2 достатньо тонка (< 200 нм), то значна частина загасаючої в металі електромагнітної хвилі досягає протилежної поверхні металічної плівки. Тоді ППР стає чутливим до властивостей того середовища 4, котре контактує з металом. Від електричної поляризації цього середовища, тобто від його діелектричної постійної (яка в діелектриках рівна квадрату показника заломлення світла), залежить положення мінімуму кривої ППР.

Типова крива ППР показана на рис.3. Крива ППР це залежність інтенсивності відбитого металевою плівкою світла від проекції хвильового вектору на площину плівки. Спостерігається чіткий і доволі гострий резонанс.

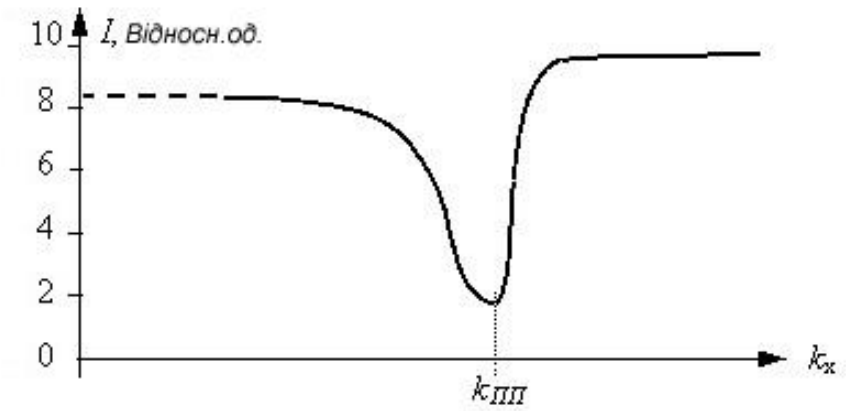

Рис. 3. Типова крива ППР

Прилади і обладнання

Рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6 (Блок-схема та оптична схема показані на рис. 4 та рис. 5), ПК із програмним забезпеченням [21].

Блок-схема та спрощена оптична схема та PLASMON-6 показані на рис.4 та рис 4., відповідно. Монохроматичний p-поляризований паралельний промінь лазерного світла падає на скляну ретропризму повного внутрішнього відбиття і, після відбиття від верхньої робочої та дзеркальної задньої граней, виходить з призми і, після поворотного дзеркала, попадає на робочий детектор (на рисунку праворуч). Завдяки тому, що кут між верхньою та задньою гранями складає

точно 90^0, вхідний та вихідний промені паралельні один одному при любих кутах падіння світла. Оптичний блок забезпечує два паралельні ідентичні оптичні канали PLASMON-6. Канали розташовані паралельно на відстані 7.5 мм один від одного.

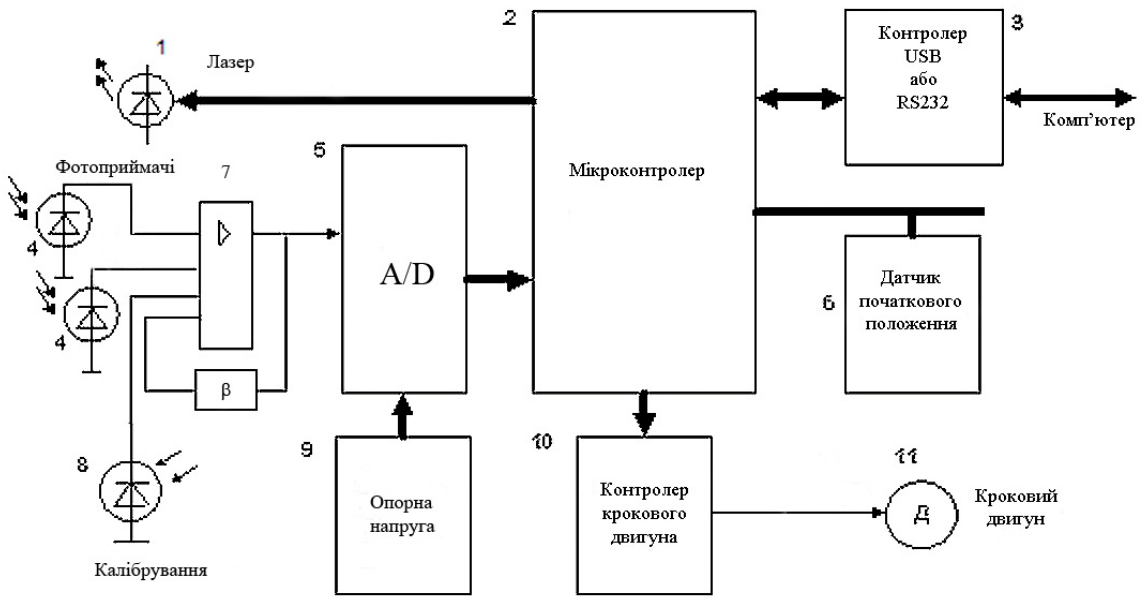

Рис. 4. Блок - схема ППР – приладу:

1 – напівпровідниковий лазерний випромінювач; 2 – мікроконтролер; 3 – контролер USB або RS232 каналу зв'язку з комп'ютером; 4 – фотодетектори інтенсивності відбитого світла двоканального приладу; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – датчик початкового положення механічної системи повороту призми; 7 – комутатор сигналів та підсилювачі; 8 – фотодіод системи калібрування кутового положення призми; 9 – джерело опорного сигналу для аналого-цифрового перетворювача; 10, 11 - кроковий двигун повороту призми та його контролер.

Використання ретропризми дозволило сконструювати оптичний блок у вигляді завершеного змінного конструктиву, що включає джерело випромінювання (напівпровідниковий лазер), світлодільник, робочі детектори-фотодіоди, додаткові фотоприймачі контролю інтенсивності лазерного променя та системи точного калібрування кута падіння світла на робочу грань призми. В ньому також встановлено підсилювачі, схеми стабілізації та модуляції лазерного випромінювання, комутації сигналів тощо. Такий підхід є унікальним

і дозволяє суттєво зменшити і спростити весь рефрактометр PLASMON-6. Розміри приладу 215×100×100, маса не більше 3 кг.

Наявність двох ідентичних каналів дозволяє або проводити два різних дослідження одночасно, або працювати за диференційною схемою, використовуючи один із каналів як опорний. Диференційні виміри значно підвищують реальну чутливість приладу завдяки виключенню впливу багатьох зовнішніх факторів, таких, як температура.

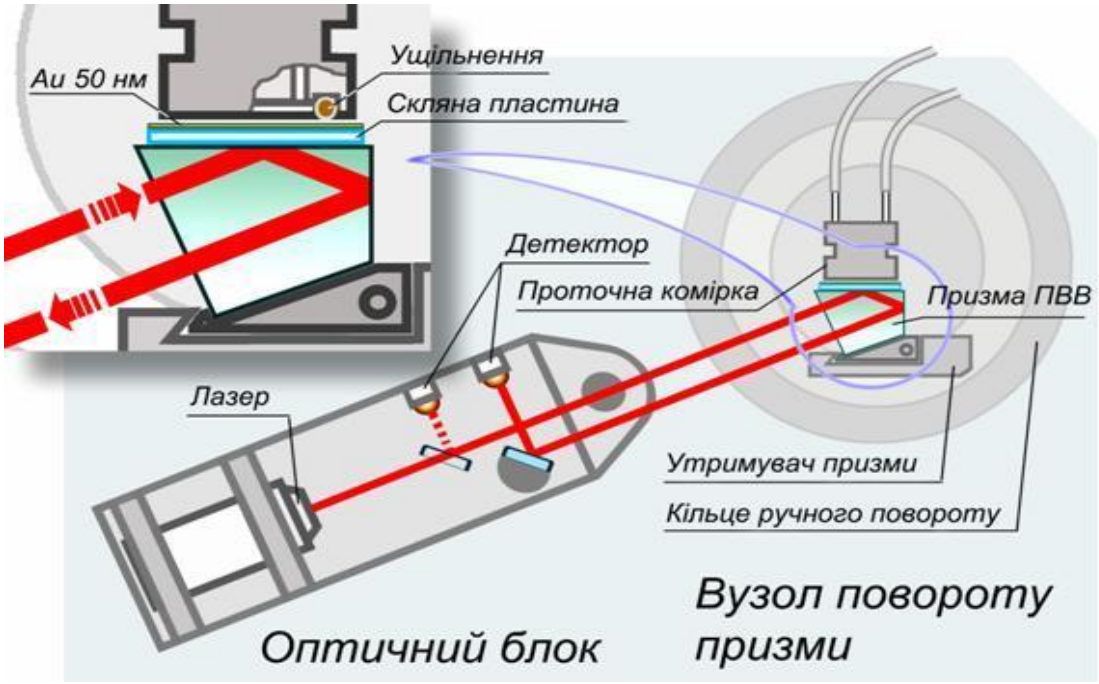

Рис.5. Оптична схема пристроїв серії «ПЛАЗМОН»

На верхню грань ретропризми через імерсійну рідину встановлюється скляна пластина з нанесеною плазмон-підтримуючою тонкою плівкою золота (золота з сріблом) , захищена проточною або відкритою кюветою. На плівку металу з сенсорно чутливою поверхнею спрямовується лінійно поляризоване випромінювання, яким збуджується поверхневий плазмон-поляритон, а кювета забезпечує контакт плівки з досліджуваними рідиною чи газом. Ретропризма, що встановлена на поворотній платформі, може обертатися навколо вісі, що проходить точку падіння світла на плазмон-підтримуючу плівку, змінюючи таким чином кут падіння світла. Поворотна платформа прецизійним

редуктором зв’язана з кроковим двигуном. Максимальний кут сканування 170. Час одного повного сканування не більше 2,5 с.

Завдання на лабораторну роботу

В роботі використовується рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6 та ПК із відповідним ПЗ.

1. Провести калібрування PLASMON-6.
2. Знайти кут мінімуму плазмонного резонансу.
3. Обрахувати похибки вимірювань мінімального кута плазмонного резонансу згідно з додатком А, приймаючи довірчу імовірність $p = 0,95$.
4. Скласти звіт про лабораторну роботу.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з будовою рефрактометра на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6.
2. Провести калібрування PLASMON-6, натиснувши на значок .
3. Знайти кут мінімуму плазмонного резонансу:

   3.1 Змістити кільце ручного повороту так, щоб мінімум плазмонного резонансу опинився приблизно на **початку** діапазону та провести одиничне вимірювання, натиснувши . Потім провести серію вимірювань, вибравши

   , в кількості, виходячи із заданої довірчої імовірності.

   3.2 Зберегти отриманий графік при одиничному вимірюванні та відтворити його у довільному пакеті прикладних програм (Excel, MathCAD, Matlab, тощо).

3.3 Аналітично та графічно розрахувати R_w. Аналітично R_w можна розрахувати за формулою:

$$R_w = \frac{Rmax - Rmin}{2} + Rmin \qquad (1.1)$$

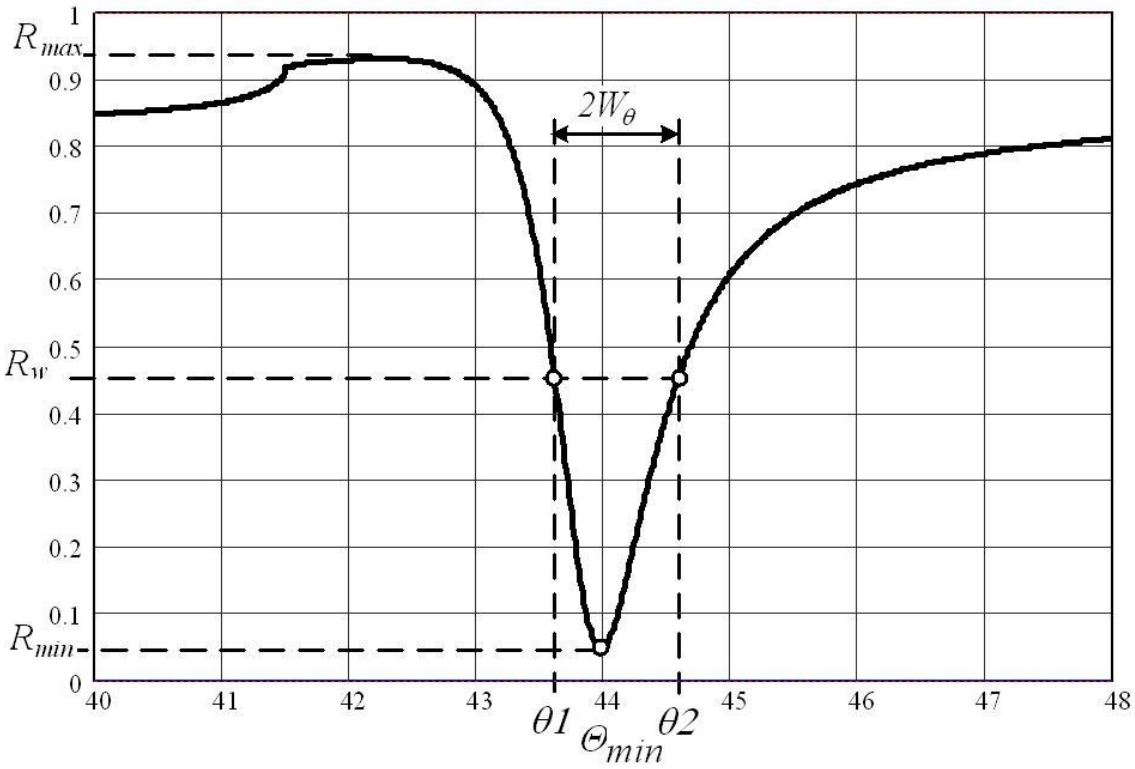

Рис. 5. Знаходження R_w

3.4 Знайти значення кутів Θ на осі абсцис для рівня R_w, які відповідають інтенсивності коефіцієнту відбиття (рис. 5). Отримані точки – Θ_1 та Θ_2 – є границями діапазону півширини плазмонного резонансу.

3.5 Знайти значення W_θ – півширини кута мінімуму плазмонного резонансу.

Кут W_θ розраховується за формулою:

$$W_\theta = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2} \qquad (1.2)$$

4. Змістити кільце ручного повороту так, щоб мінімум плазмонного резонансу опинився приблизно на **середині** діапазону та повторити дії описані в п.п. 3.2 – 3.5.

5. Змістити кільце ручного повороту так, щоб мінімум плазмонного резонансу опинився приблизно на **кінці** діапазону та повторити дії описані в п.п. 3.2 – 3.5.
6. Результати вимірювань занести в таблицю 1.

Таблиця 1.1 – Таблиця результатів вимірювань кута мінімуму плазмонного резонансу, °

№ п/п	$П_1$	$(П_1 - П_{1c})^2$	$П_2$	$(П_2 – П_{2c})^2$	$П_3$	$(П_3 – П_{3c})^2$
1						
2						
…	…	…	…	…	…	…
n						
Σ	$П_{1Σ}$	$Σ(П_1 - П_{1c})^2 =$	$П_{2Σ}$	$Σ(П_2 – П_{2c})^2 =$	$П_{3Σ}$	$Σ(П_3 – П_{3c})^2 =$
Середнє	$П_{1c}$	—	$П_{2c}$	—	$П_{3c}$	—

Звіт про лабораторну роботу

1. Будова та принцип дії рефрактометра на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6.
2. Таблиця результатів вимірювань.
3. Розрахунки результатів вимірювань з поясненням дій.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке поверхневий плазмонний резонанс?
2. Описати технічний спосіб, який дозволяє використовувати поверхневі плазмони в оптиці.
3. Схема оптичного спостереження ППР
4. Структурна схема приладу PLASMON-6.

Література

1. І. Болеста «Поверхневі плазмон-поляритони» // Електроніка та інформаційні технології. 2012. Випуск 2. с. 3–26.
2. Дмитрук Н. Л., Литовченко В. Г., Стрижевский В. Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. - Киев: Наук. думка, 1989. - 375 с.
3. SommerfeldA. Ueber die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen langs eines Drahtes // Ann. der Physik und Chemie. - 1899. - Vol. 303. - P. 233-290.
4. Zenneck J. Uber die Fortpflanzung ebener elektromagnetischer Wellen langs einer ebenen Leiterflache und ihre Beziehung zur drahtlosen Telegraphie // Ann. der Physik. - 1907. - Vol. 328. - P. 846-866.
5. Fano U. The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves) // JOSA. - 1941. - Vol. 31. - P. 213-222.
6. Ritchie R. H. Plasma losses by fast electrons in thin films // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 105.- P. 874-881.
7. Ritchie R. H. Arakawa T. E., Gowan J. J., Hamm R. N. Surfase-plasmon resonance effect sn gratting diffractions // Phys. Rev. Lett. - 1968. - Vol. 21. - P. 1530-1533.
8. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons tcited by light // Z. Naturforschyng. - 1968. - Vol. A23. - P. 2135-2136.
9. Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // Zeitschrift fur Physik. - 1968. - Vol. 216. - P. 398-410.
10. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflachenplasmaschwingungen // Zeitschrift fur Physik. - 1971. - Vol. 241. - P. 313-324.
11. Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F., Thio T., Wolff P. A. Extraordinary

optical transmission through sub-wavelength hole arrays // Nature. - 1998. - Vol. 391. - P. 667-669.

12. Grupp D. E., Lezec H. J., Thio T., Ebbesen T. W. Beyond the Bethe Limit: Tunable Enhanced Light Transmission Through a Single Sub-Wavelength Aperture. - 1999. - Vol. 11. - P. 860-862.
13. A. Degiron, H.J. Lezec, N. Yamamoto and T. W. Ebbesen Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal // Optics Comm. - 2004. - Vol. 239. - P. 61-66.
14. A. Degiron and T.W. Ebbesen The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2005. - Vol. 7. - P. S90-S96.
15. WannemacherR. Plasmon-supported transmission of light through nanometric holes in metallic thin films // Opt. Comm. - 2001. - Vol. 195. - P. 107-118.
16. Genet C., Ebbesen T. W. Light in tiny holes // Nature. - 2007. - Vol. 445. - P. 39-46.
17. Rothenhausler B., Knoll W. Surface-plasmon microscopy // Nature. - 1988. - Vol. 332. - P. 615-617.
18. Zayats A. V., Smolyaninov 1.I., Maradydin A. A. Nanooptics of surface Plasmon polaritons // Phys. Reports. - 2005. - Vol. 408. - P. 131-314.
19. Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестн. НГУ. Сер. Физика. - 2007. - Т. 2. - Вып. 1. - С. 108-121.
20. Жирнов С. В., Семенцов Д. И. Поверхностные поляритоны в тонком слое анизотропного сверхпроводника // Оптика и спектроскопия. - 2008. - Т. 104. - № 3. - С. 520-527.
21. Gridina N., Dorozinsky G., Khristosenko R., Maslov V., Samoylov A., Ushenin Yu., Shirshov Yu. Surface Plasmon resonance biosensor// Sensors & Transducers Journal - 2013. – Vol.149, № 2. – P.60-68.
22. Фізичні основи поляриметрії високої інформативної здатності: монографія / Г. В. Бекетов, О. С. Климов, І. Є. Матяш та ін.; під ред.

Б.К. Сердеги. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – с. 184-218.

Лабораторна робота №2

Контроль наявності летючих компонентів в повітрі робочих приміщень

Мета роботи: навчитися визначати коефіцієнт заломлення газових сумішей за допомогою рефрактометру на основі плазмонного резонансу.

Теоретичні відомості

З кінця XX ст. інтенсивно розвиваються нові напрями в електроніці та нанооптиці, пов'язані з вивченням і застосуванням поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ). У науковій літературі такі хвилі називають також поверхневими поляритонами (ПП, англ. surface polaritons), а хвилі на межі середовищ з високою провідністю (метали, напівпровідники) і повітрям - поверхневими плазмон-поляритонами (англ. surface plasmon polaritons), рідше - поверхневими плазмонами, (англ. surface plasmons), виражаючи цим визначальний внесок плазми (вільних носіїв) у їхнє формування. Ці хвилі є окремим випадком широкого загалу поверхневих електромагнітних хвиль, які існують на межі між двома середовищами [2].

Поверхневі плазмон-поляритони (ПП) - це взаємопов'язані між собою коливання густини вільних зарядів усередині провідного середовища та векторів електромагнітного поля в діелектрику, які поширюються вздовж межі між ними одночасно у двох середовищах (рис. 1).

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП. Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ПП і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП.

Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ІІІІ і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

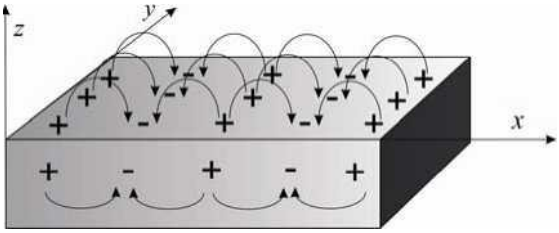

Рис. 1. Схематичне зображення взаємопов’язаних коливань електронного газу у металі (z < 0) та поля в діелектрику (z > 0), що формують ПЕХ [1]

Історичні аспекти, пов’язані з вивченням ПЕХ. Шверхневі електромагнітні хвилі вперше описані А. Зоммерфельдом 1899 р. для випадку поширення хвилі вздовж циліндричного провідника [3]. У 1907 р. І. Ценніке математично описав поширення електромагнітних хвиль уздовж поверхні Землі (провідника) для пояснення далекого радіозв’язку [4].

На початку ХХ ст. англійський фізик Р. Вуд виявив темні лінії у спектрах дифракції білого світла на металевій ґратці - аномалії Вуда: світло деяких довжин хвиль не відбивалося, а отже, його поглинала ґратка. У 40-х роках це явище пояснив італійський фізик У. Фано, припустивши, що енергія світла, яке не відбивалося від ґратки, затрачалася на збудження поверхневої хвилі у металевій ґратці [5]. Він обґрунтував також метод збудження поверхневих плазмонних хвиль з використанням поверхневої дифракційної ґратки [5].

Приблизно в той же час у ході дослідження розсіяння електронних пучків на тонких металевих плівках виявлено втрати, зумовлені взаємодією на поверхні [6]. Шзні- ше з’ ясовано, що ці втрати мають однакову природу з втратами світла на дифракційних ґратках у видимій ділянці спектра [7]. До того часу також вивчено збурення поверхневих хвиль Зоммерфельда видимим світлом [8] і побудовано загальний опис цих явищ як поверхневих плазмон-поляритонів.

У 60-х роках XX ст. А. Отто [9] та Е. Кречман [10] запропонували способи збудження поверхневих плазмонних хвиль, які ґрунтувалися на методі порушення повного внутрішнього відбивання.

Новий імпульс у дослідженні поверхневих II дала праця французьких фізиків Т. Еббесена та ін. [11], які досліджували спектри пропускання металевих плівок з отворами, діаметр яких d << X: якщо положення отворів було періодичним, то пропускання світла через таку систему зростало в декілька разів. Результати експериментів пояснювали тим, що світло, яке падає на металеву плівку, проходить крізь отвори, збуджуючи поверхневі II , які на іншому боці отвору знову перетворювалися у світло. Ця праця стала вихідною у серії досліджень, присвячених взаємодії структурованих металевих плівок зі світлом, які сформували новий напрям фотоніки, який називають "наноплазмонікою" [12-16].

У 1988 р. німецькі фізики В. Кноль та Б. Ротенхойсер запропонували схему і реалізували мікроскоп на поверхневих хвилях [17]. Розвиток сканувальної ближньопольової мікроскопії дав змогу досліджувати поверхневі поляритони у ближньому полі, що послугувало додатковим імпульсом для розвитку теоретичних моделей взаємодії IIII з неоднородностями поверхонь, їхнього застосування в новітніх фотонних технологіях [18].

На рубежі XX-XXI ст. розпочалося інтенсивне дослідження ПЕХ у мікрохвильовому та терагерцовому діапазонах спектра [19] та в матеріалах з високотемпературною надпровідністю [20].

Поверхневий плазмонний резонанс (ППР) це явище порушення умови повного внутрішнього відбиття, коли значна частина енергії падаючого поверхню металу світла перетворюється в енергію плазмонів, внаслідок чого інтенсивність відбитого від поверхні металевої плівки світла різко спадає. ППР спостерігається при умові повного внутрішнього відбиття і характеризується певним кутом відбиття та значенням показника заломлення речовини над поверхнею металу.

Оптична схема рефрактометра типу «Плазмон» [21] наведена на рисунку 2.

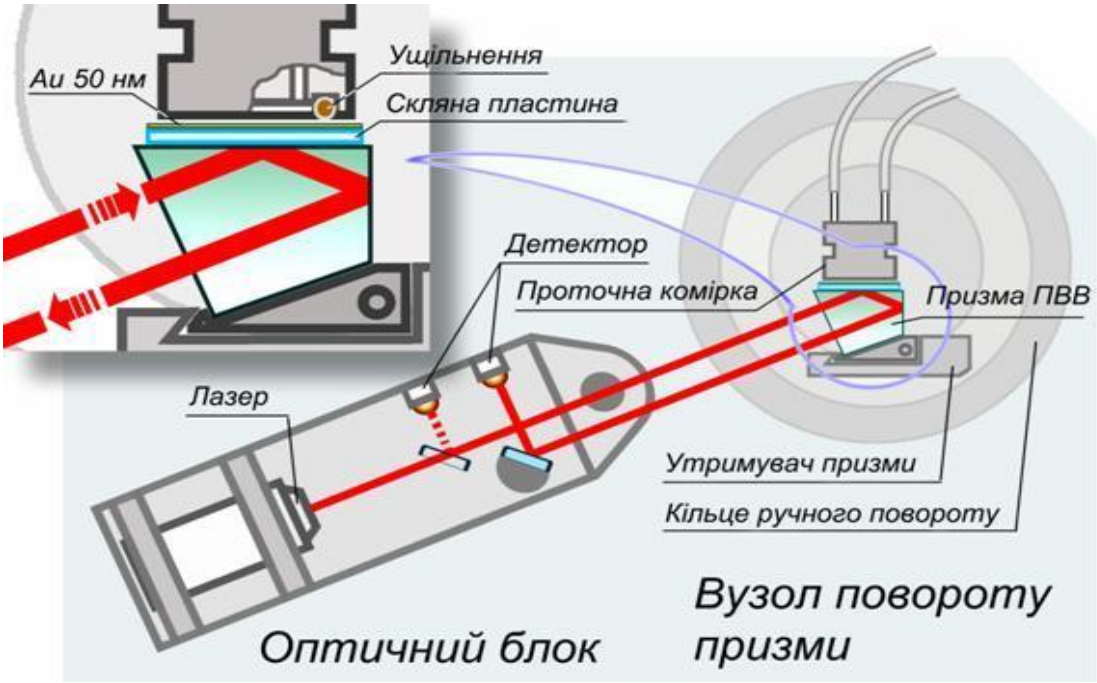

Рис. 2. Оптична схема пристроїв серії «ПЛАЗМОН»

Етанол (C_2H_5OH) — одноатомний спирт, при стандартних умовах горюча, летюча, безбарвна прозора рідина.

Етиловий спирт використовується як розчинник, паливо, наповнювач у спиртових термометрах і як дезінфікуючий засіб [22].

Сучасна промислова технологія отримання етилового спирту з харчової сировини включає наступні стадії:

- Підготовка і подрібнення крохмалистої сировини - зерна (насамперед - жита, пшениці), картоплі, кукурудзи і т. п.

- Ферментація. (Ферментативне розщеплення крохмалю до зброджуваних цукрів. Для цих цілей застосовуються рекомбінантні препарати альфа-амілази, отримані біоінженерним шляхом - глюкамілаза, амілосубтілін).
- Бродіння. (Відбувається накопичення в бразі спирту завдяки бродінню дріжджів цукрів).
- Брагоректифікації. (Здійснюється на розгінних колонах).

При достатньому доступі повітря горить (за рахунок кисню) світлим блакитним полум'ям, утворюючи термінальні продукти окислення — діоксид вуглецю і воду:

$$C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

Прилади і обладнання

Рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6, ПК із програмним забезпеченням, набір газових сумішей, насос Pump-02 (рис. 3).

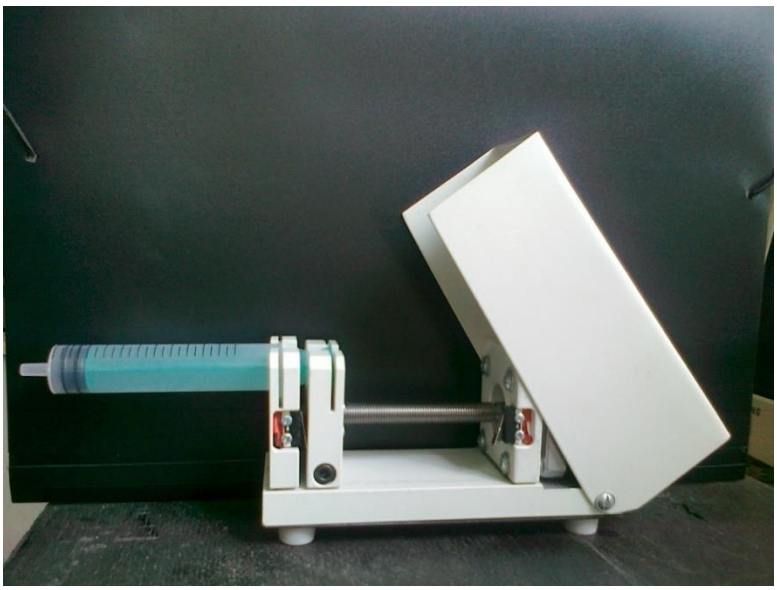

Рис. 3. Насос Pump-02

У рефрактометрі на основі поверхневого плазмонного резонансу передбачено використання двох типів призм – для рідких та газоподібних речовин. Відповідно, для вимірювання мінімального кута плазмонного

резонансу парів спирту використовується призма для газоподібних середовищ марки К8-50 зі скла типу «крон» (рис. 4). Скло цієї призми має коефіцієнт заломлення 1,52. Робочий кут призми К8-50 складає 50°.

Для роботи з газоподібними середовищами основним режимом роботи є режим Slope mode без механічного сканування по куту. У цьому режимі чутливість приладу в значній мірі визначається формою ППР-кривої і вибором робочої точки на ній.

Програмне забезпечення приладу включає засоби вибору робочої точки, що забезпечує роботу в режимі максимальної чутливості. Передбачена також функція автоматичного пошуку оптимальної робочої точки.

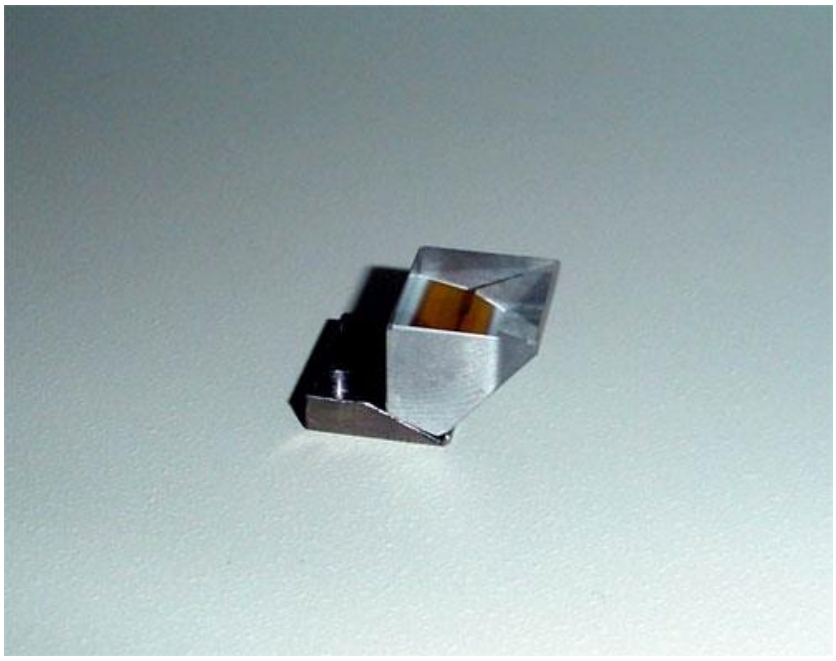

Рис. 4 Призма марки К8-50

Завдання на лабораторну роботу

В роботі використовується рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6, ПК із відповідним ПЗ та набір парів газів.

1. Знайти кут мінімуму плазмонного резонансу при певних концентраціях парів спирту (кількість проб та концентрацію парів в них задає викладач).
2. Знайти коефіцієнт заломлення для кожної концентрації.

3. Обрахувати похибки вимірювань згідно з додатком А, приймаючи довірчу імовірність p = 0,95.
4. Скласти звіт про лабораторну роботу.

Порядок виконання роботи

1. Провести калібрування PLASMON-6. Натиснути кнопку та зачекати проведення автоматичного калібрування.
2. Отримати певну концентрацію парів спирту в ємності насосу. Для цього через силіконовий конектор з'єднати ємність насосу із ємністю проби. Виставити на насосі швидкість перекачування 3000 мкл\хв. Концентрацію отримувати пропорційно додаючи повітря, приймаючи концентрацію у ємності проби за 100%.
3. Запустити вимірювання в режимі SLOPE/Difference, вибравши відповідні пункти в меню налаштувань. Запустити пари спирту в кювету, використовуючи насос. Виміряти рівень відгуку.
4. Продути повітрям кювету, ввести іншу концентрацію парів спирту в кювету та виміряти рівень відгуку при зміні концентрації.
5. Результати вимірювань занести в таблицю 1.

Таблиця 2.1 – Таблиця результатів вимірювань кута мінімуму плазмонного резонансу, °

№ п/п	$П_1$	$(П_1 - П_{1c})^2$	$П_2$	$(П_2 – П_{2c})^2$	$П_3$	$(П_3 – П_{3c})^2$	$П_4$	$(П_4 – П_{4c})^2$
		…		…		…		…
	$П_{1\Sigma}$	$\Sigma(П_1 - П_{1c})^2 =$	$П_{2\Sigma}$	$\Sigma(П_2 – П_{2c})^2=$	$П_{3\Sigma}$	$\Sigma(П_3 – П_{3c})^2 =$	$П_{4\Sigma}$	$\Sigma(П_4 – П_{4c})^2=$
	$П_{1c}$	—	$П_{2c}$	—	$П_{3c}$	—	$П_{4c}$	—

Звіт про лабораторну роботу

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Таблиця результатів вимірювань.
3. Розрахунки результатів вимірювань з поясненням дій.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Плазмонний резонанс.
2. Навести короткі фізичні властивості етанолу.
3. Описати способи отримання етилового спирту.
4. Особливості вимірювання газових середовищ на рефрактометрі PLASMON-6.
5. В чому полягає основна відмінність режиму Slope від Multiple?

Література

1. І. Болеста Поверхневі плазмон-поляритони. // Електроніка та інформаційні технології. 2012. Випуск 2. С. 3-26.
2. Дмитрук Н. Л., Литовченко В. Г., Стрижевский В. Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. - Киев: Наук. думка, 1989. - 375 с.
3. SommerfeldA. Ueber die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen langs eines Drahtes // Ann. der Physik und Chemie. - 1899. - Vol. 303. - P. 233-290.
4. Zenneck J. Uber die Fortpflanzung ebener elektromagnetischer Wellen langs einer ebenen Leiterflache und ihre Beziehung zur drahtlosen Telegraphie // Ann. der Physik. - 1907. - Vol. 328. - P. 846-866.
5. Fano U. The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves) // JOSA. - 1941. - Vol. 31. - P. 213-222.
6. Ritchie R. H. Plasma losses by fast electrons in thin films // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 105.- P. 874-881.
7. Ritchie R. H. Arakawa T. E., Gowan J. J., Hamm R. N. Surfase-plasmon

resonance effect sn gratting diffractions // Phys. Rev. Lett. - 1968. - Vol. 21. - P. 1530-1533.

8. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons tcited by light // Z. Naturforschyng. - 1968. - Vol. A23. - P. 2135-2136.
9. Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // Zeitschrift fur Physik. - 1968. - Vol. 216. - P. 398-410.
10. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflachenplasmaschwingungen // Zeitschrift fur Physik. - 1971. - Vol. 241. - P. 313-324.
11. Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F., Thio T., Wolff P. A. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays // Nature. - 1998. - Vol. 391. - P. 667-669.
12. Grupp D. E., Lezec H. J., Thio T., Ebbesen T. W. Beyond the Bethe Limit: Tunable Enhanced Light Transmission Through a Single Sub-Wavelength Aperture. - 1999. - Vol. 11. - P. 860-862.
13. A. Degiron, H.J. Lezec, N. Yamamoto and T. W. Ebbesen Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal // Optics Comm. - 2004. - Vol. 239. - P. 61-66.
14. A. Degiron and T.W. Ebbesen The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2005. - Vol. 7. - P. S90-S96.
15. WannemacherR. Plasmon-supported transmission of light through nanometric holes in metallic thin films // Opt. Comm. - 2001. - Vol. 195. - P. 107-118.
16. Genet C., Ebbesen T. W. Light in tiny holes // Nature. - 2007. - Vol. 445. - P. 39-46.
17. Rothenhausler B., Knoll W. Surface-plasmon microscopy // Nature. - 1988. - Vol. 332. - P. 615-617.
18. Zayats A. V., Smolyaninov 1.I., Maradydin A. A. Nanooptics of surface Plasmon polaritons // Phys. Reports. - 2005. - Vol. 408. - P. 131-314.

19. Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестн. НГУ. Сер. Физика. - 2007. - Т. 2. - Вып. 1. - С. 108-121.
20. Жирнов С. В., Семенцов Д. И. Поверхностные поляритоны в тонком слое анизотропного сверхпроводника // Оптика и спектроскопия. - 2008. - Т. 104. - № 3. - С. 520-527.
21. Gridina N., Dorozinsky G., Khristosenko R., Maslov V., Samoylov A., Ushenin Yu., Shirshov Yu. Surface Plasmon resonance biosensor// Sensors & Transducers Journal - 2013. – Vol.149, № 2. – P.60-68.
22. "Химическая энциклопедия" т.5 М.: Советская энциклопедия, 1999 стр. 501-503.

Лабораторна робота №3

Порівняння оптичного показника заломлення олії на прикладі модельної речовини

Мета роботи: навчитися визначати коефіцієнт заломлення олії за допомогою рефрактометру на основі плазмонного резонансу.

Теоретичні відомості

Показник заломлення — це число, характерне для кожного середовища, яке визначає в скільки разів швидкість розповсюдження світла в даному середовищі менша за швидкість світла у вакуумі.

Поверхневий плазмонний резонанс (ППР) це явище порушення умови повного внутрішнього відбиття, коли значна частина енергії падаючого на поверхню металу світла перетворюється в енергію плазмонів, внаслідок чого інтенсивність відбитого від поверхні металевої плівки світла різко спадає. ППР спостерігається при умові повного внутрішнього відбиття і характеризується певним кутом відбиття та значенням показника заломлення речовини над поверхнею металу.

З кінця XX ст. інтенсивно розвиваються нові напрями в електроніці та нанооптиці, пов’язані з вивченням і застосуванням поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ). У науковій літературі такі хвилі називають також поверхневими поляритонами (ПП, англ. surface polaritons), а хвилі на межі середовищ з високою провідністю (метали, напівпровідники) і повітрям - поверхневими плазмон-поляритонами (англ. surface plasmon polaritons), рідше - поверхневими плазмонами, (англ. surface plasmons), виражаючи цим визначальний внесок плазми (вільних носіїв) у їхнє формування. Ці хвилі є окремим випадком широкого загалу поверхневих електромагнітних хвиль, які існують на межі між двома середовищами [2].

Поверхневі плазмон-поляритони (ПП) - це взаємопов’язані між собою коливання густини вільних зарядів усередині провідного середовища та

векторів електромагнітного поля в діелектрику, які поширюються вздовж межі між ними одночасно у двох середовищах (рис. 1).

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП. Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ПП і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

Поля, що їх переносять ці хвилі, є локалізованими біля межі поділу і швидко загасають з віддаленням від неї, зумовлюючи двовимірну природу поверхневих ПП.

Унаслідок цього властивості поверхневих ПП значно залежать від властивостей і стану поверхонь, по якій поширюються. Тому оптичні характеристики металу і діелектрика, рельєф межі поділу, домішки, адсорбовані на поверхні тощо впливатимуть на швидкість поширення ІІІІ і залежність цієї швидкості від частоти (дисперсію поверхневих ПП), а також на інші параметри поверхневих хвиль.

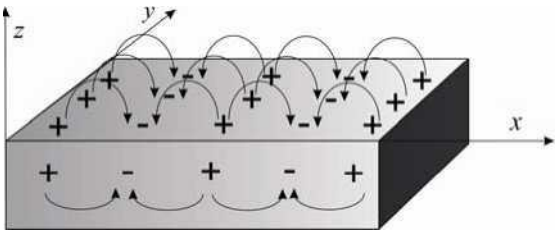

Рис. 1. Схематичне зображення взаємопов’язаних коливань електронного газу у металі (z < 0) та поля в діелектрику (z > 0), що формують ПЕХ [1]

Історичні аспекти, пов’язані з вивченням ПЕХ. Шверхневі електромагнітні хвилі вперше описані А. Зоммерфельдом 1899 р. для випадку поширення хвилі вздовж циліндричного провідника [3]. У 1907 р. І. Ценніке

математично описав поширення електромагнітних хвиль уздовж поверхні Землі (провідника) для пояснення далекого радіозв'язку [4].

На початку XX ст. англійський фізик Р. Вуд виявив темні лінії у спектрах дифракції білого світла на металевій ґратці - аномалії Вуда: світло деяких довжин хвиль не відбивалося, а отже, його поглинала ґратка. У 40-х роках це явище пояснив італійський фізик У. Фано, припустивши, що енергія світла, яке не відбивалося від ґратки, затрачалася на збудження поверхневої хвилі у металевій ґратці [5]. Він обґрунтував також метод збудження поверхневих плазмонних хвиль з використанням поверхневої дифракційної ґратки [5].

!риблизно в той же час у ході дослідження розсіяння електронних пучків на тонких металевих плівках виявлено втрати, зумовлені взаємодією на поверхні [6]. Шзні- ше з' ясовано, що ці втрати мають однакову природу з втратами світла на дифракційних ґратках у видимій ділянці спектра [7]. До того часу також вивчено збурення поверхневих хвиль Зоммерфельда видимим світлом [8] і побудовано загальний опис цих явищ як поверхневих плазмон-поляритонів.

У 60-х роках XX ст. А. Отто [9] та Е. Кречман [10] запропонували способи збудження поверхневих плазмонних хвиль, які ґрунтувалися на методі порушення повного внутрішнього відбивання.

Новий імпульс у дослідженні поверхневих II дала праця французьких фізиків Т. Еббесена та ін. [11], які досліджували спектри пропускання металевих плівок з отворами, діаметр яких d << X: якщо положення отворів було періодичним, то пропускання світла через таку систему зростало в декілька разів. Результати експериментів пояснювали тим, що світло, яке падає на металеву плівку, проходить крізь отвори, збуджуючи поверхневі II , які на іншому боці отвору знову перетворювалися у світло. Ця праця стала вихідною у серії досліджень, присвячених взаємодії структурованих металевих плівок зі світлом, які сформували новий напрям фотоніки, який називають "наноплазмонікою" [12-16].

У 1988 р. німецькі фізики В. Кноль та Б. Ротенхойсер запропонували схему і реалізували мікроскоп на поверхневих хвилях [17]. Розвиток сканувальної ближньопольової мікроскопії дав змогу досліджувати поверхневі поляритони у ближньому полі, що послугувало додатковим імпульсом для розвитку теоретичних моделей взаємодії ІІІІ з неоднородностями поверхонь, їхнього застосування в новітніх фотонних технологіях [18].

На рубежі XX-XXI ст. розпочалося інтенсивне дослідження ПЕХ у мікрохвильовому та терагерцовому діапазонах спектра [19] та в матеріалах з високотемпературною надпровідністю [20].

Поверхневий плазмонний резонанс спостерігають на рефрактометрі типу «Плазмон», розроблений в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України [21]. Його блок схему наведено на рисунку 2.

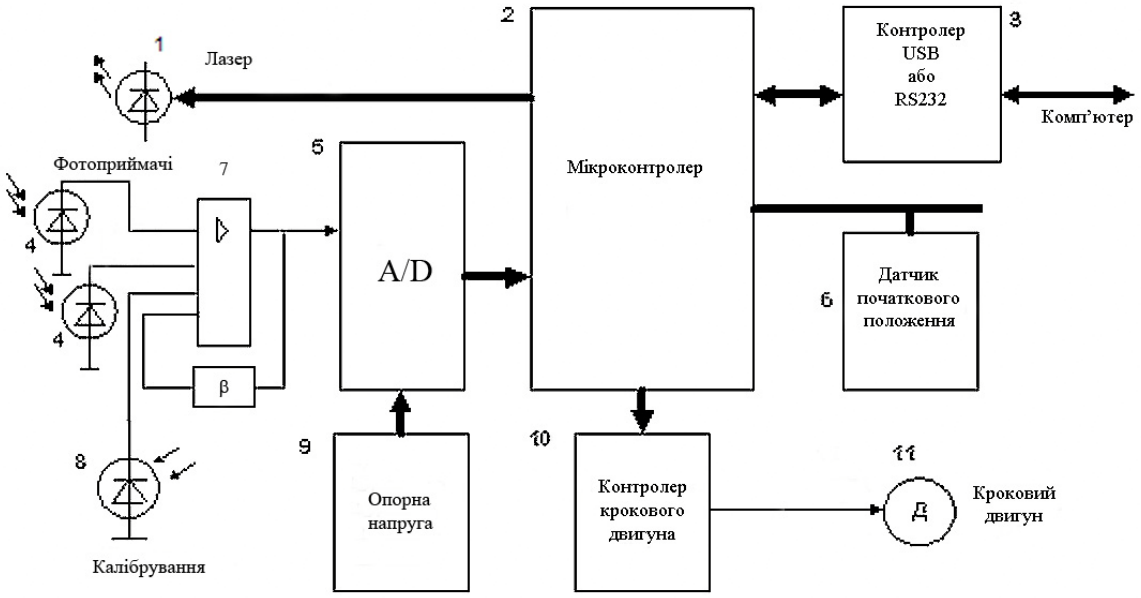

Рис. 2 Блок - схема ППР – приладу:

1 – напівпровідниковий лазерний випромінювач; 2 – мікроконтролер; 3 – контролер USB або RS232 каналу зв'язку з комп'ютером; 4 – фотодетектори інтенсивності відбитого світла двоканального приладу; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – датчик початкового положення механічної системи повороту призми; 7 – комутатор сигналів та підсилювачі; 8 – фотодіод системи калібрування кутового положення призми; 9 – джерело опорного сигналу для аналого-цифрового перетворювача; 10, 11 - кроковий двигун повороту призми та його контролер.

Оптичні показники заломлення олії та спиртів значно відрізняються від показників води. В якості модельної речовини використовується гліцерин. Оптичні показники заломлення у гліцерину близькі до показників олії.

Олія — будь-яка речовина, яка є рідиною при температурі навколишнього середовища і не змішується з водою, але може змішуватися з іншими маслами і органічними розчинниками і жирна на дотик. Це загальне визначення включає в себе рослинні олії і жири, летючі ефірні масла, терпентинову олію (сирець скипидару), мастило,нафтохімічні масла (солярове масло, мінеральна олія) і синтетичні масла [22].

Мастило — речовина, яку наносять або підводять до поверхні, яка перебуває під силою тертя, для зменшення зносу.

Мастило являє собою пластичний матеріал, який по суті є структурованою загусником оливою, яку застосовувують для герметизації ущільнень, зменшення тертя, консервації виробів і тому подібне.

За хімічним складом олії — це тригліцериди вищих ненасичених карбонових кислот. Як домішки, в оліях присутні білки та вода (які зумовлюють каламутність нерафінованої олії), а також деякі ліпіди (фосфоліпіди, воски), каротини, токофероли, хлорофіл, а також вуглеводи, мінеральні речовини та ін. Домішки каротинів та хлорофілу обумовлюють забарвлення олій: жовте, янтарне, коричневе, зеленувате. Олії нерозчинні у воді, розчиняються в неполярних розчинниках, а також в ацетоні та у спирті.

При контакті з киснем або при нагріванні до 250-300°С повітря деякі рослинні олії піддаються окислювальній полімеризації (висихають) утворюючи плівки. Ця здатність до висихання використовується у виробництві лакофарбових матеріалів. [23]

За ступенем полімеризації олії ділять на висихаючі, напіввисихаючі і невисихаючі.

- Висихаючі олії (гліцероли насичених кислот з двома або більше подвійними зв'язками): льняна, конопляна, тунгова, перилова. Якщо

їх нанести тонким шаром на будь-яку поверхню — на повітрі вони перетворюються в еластичну суху плівку.

- До напіввисихаючих олій відносять соняшникову, соєву, макову, свиріп'яні олії. У цих олій таке перетворення потребує довшого часу, а плівка буває більш липкою і не такою тривкою, як висихаючих олій.
- Невисихаючими оліями є кокосова та пальмова. Вони зовсім не утворюють плівки.

Для отримання олії насіння підсушують, товчуть в ступці, а після цього заливають невеликою кількістю кип'ятку. Через деякий час на поверхні з'явиться шар олії.

Іншим способом розтворення (екстрагування) всіх жирів, які знаходиться в насінні є наступний. Насіння подрібнюють в ступці або на кавовому млині, злегка підігрівають і закладають у банку, краще в воронку з гумовою трубкою, і заливають сірчаним ефіром або екстракційним бензином. Банку закривають склом і залишають на 10-20 хвилин, після цього ефір чи бензин зливають в чашку і опускають цю чашку в горячу воду.

Ефір при 35 градусах почне випаровуватись, а олія залишиться в чашці. Якщо потрібно зберегти ефір (чи бензин), то розчин масла вливають в колбу з відвідною трубкою.

Прилади і обладнання

Рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6, ПК із програмним забезпеченням, ємності з досліджуваною речовиною.

Для вимірювання мінімального кута плазмонного резонансу олії використовується призма для рідких середовищ марки F1-65 зі скла типу «крон» (рис. 3). Скло цієї призми має коефіцієнт заломлення 1,61. Робочий кут призми F1-65 складає 65°.

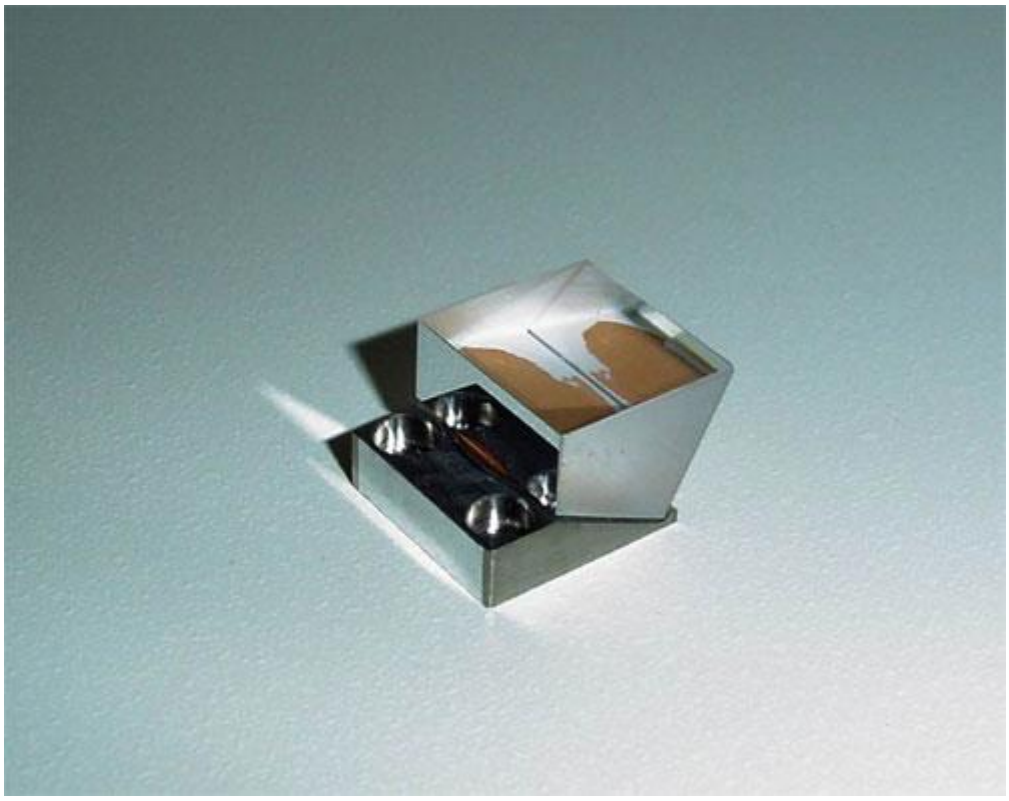

Рис. 3 Призма марки F1-65

Завдання на лабораторну роботу

В роботі використовується рефрактометр на основі поверхневого плазмонного резонансу PLASMON-6, ПК із відповідним ПЗ, зразки еталонної рідини та набір олій.

1. Знайти кут мінімуму плазмонного резонансу олії.
2. Знайти коефіцієнт заломлення олії.
3. Обрахувати похибки вимірювань згідно з додатком А, приймаючи довірчу імовірність p = 0,95.
4. Скласти звіт про лабораторну роботу.

Порядок виконання роботи

1. Провести калібрування PLASMON-6, натиснувши кнопку та зачекати проведення автоматичного калібрування.
2. Додати олію в один канал кювети, а в другий – еталонний розчин для порівняння. Додавати рідини до повного заповнення кювети.

3. Виміряти кут мінімуму плазмонного резонансу олії. Для цього натиснути на кнопку , а потім провести серію вимірювань, вибравши пункт на панелі інструментів Multiple mode .
4. Визначити коефіцієнт заломлення олії, виходячи із експериментальних даних. Для цього потрібно переключитись на відповідне вікно із графіком зміни коефіцієнту заломлення.
5. Результати вимірювань занести в таблицю 1.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань кута мінімуму плазмонного резонансу та коефіцієнту заломлення олії.

№ п/п	П	$(П - П_c)^2$	n	$(n – n_c)^2$
		…		…
	$П_\Sigma$	$\Sigma(П - П_c)^2 =$	n_Σ	$\Sigma(n – n_c)^2=$
	$П_c$	—	n_c	—

Звіт про лабораторну роботу

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Таблиця результатів вимірювань.
3. Розрахунки результатів вимірювань з поясненням дій.
4. Висновки.

Контрольні запитання

1. Плазмонний резонанс.
2. Що таке олія?
3. Назвати відмінності мастила від олії.
4. Що таке коефіцієнт заломлення? Що він показує?

Література

1. І. Болеста Поверхневі плазмон-поляритони. // Електроніка та інформаційні технології. 2012. Випуск 2. С. 3-26.
2. Дмитрук Н. Л., Литовченко В. Г., Стрижевский В. Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. - Киев: Наук. думка, 1989. - 375 с.
3. SommerfeldA. Ueber die Fortpflanzung elektrodynamischer Wellen langs eines Drahtes // Ann. der Physik und Chemie. - 1899. - Vol. 303. - P. 233-290.
4. Zenneck J. Uber die Fortpflanzung ebener elektromagnetischer Wellen langs einer ebenen Leiterflache und ihre Beziehung zur drahtlosen Telegraphie // Ann. der Physik. - 1907. - Vol. 328. - P. 846-866.
5. Fano U. The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves) // JOSA. - 1941. - Vol. 31. - P. 213-222.
6. Ritchie R. H. Plasma losses by fast electrons in thin films // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 105.- P. 874-881.
7. Ritchie R. H. Arakawa T. E., Gowan J. J., Hamm R. N. Surfase-plasmon resonance effect sn gratting diffractions // Phys. Rev. Lett. - 1968. - Vol. 21. - P. 1530-1533.
8. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons tcited by light // Z. Naturforschyng. - 1968. - Vol. A23. - P. 2135-2136.
9. Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // Zeitschrift fur Physik. - 1968. - Vol. 216. - P. 398-410.
10. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflachenplasmaschwingungen // Zeitschrift fur Physik. - 1971. - Vol. 241. - P. 313-324.
11. Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F., Thio T., Wolff P. A. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays // Nature. - 1998. - Vol. 391. - P. 667-669.
12. Grupp D. E., Lezec H. J., Thio T., Ebbesen T. W. Beyond the Bethe Limit:

Tunable Enhanced Light Transmission Through a Single Sub-Wavelength Aperture. - 1999. - Vol. 11. - P. 860-862.

13. A. Degiron, H.J. Lezec, N. Yamamoto and T. W. Ebbesen Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal // Optics Comm. - 2004. - Vol. 239. - P. 61-66.
14. A. Degiron and T.W. Ebbesen The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2005. - Vol. 7. - P. S90-S96.
15. WannemacherR. Plasmon-supported transmission of light through nanometric holes in metallic thin films // Opt. Comm. - 2001. - Vol. 195. - P. 107-118.
16. Genet C., Ebbesen T. W. Light in tiny holes // Nature. - 2007. - Vol. 445. - P. 39-46.
17. Rothenhausler B., Knoll W. Surface-plasmon microscopy // Nature. - 1988. - Vol. 332. - P. 615-617.
18. Zayats A. V., Smolyaninov 1.I., Maradydin A. A. Nanooptics of surface Plasmon polaritons // Phys. Reports. - 2005. - Vol. 408. - P. 131-314.
19. Князев Б. А., Кузьмин А. В. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестн. НГУ. Сер. Физика. - 2007. - Т. 2. - Вып. 1. - С. 108-121.
20. Жирнов С. В., Семенцов Д. И. Поверхностные поляритоны в тонком слое анизотропного сверхпроводника // Оптика и спектроскопия. - 2008. - Т. 104. - № 3. - С. 520-527.
21. Gridina N., Dorozinsky G., Khristosenko R., Maslov V., Samoylov A., Ushenin Yu., Shirshov Yu. Surface Plasmon resonance biosensor// Sensors & Transducers Journal - 2013. – Vol.149, № 2. – P.60-68.
22. В.М.Поліщук. Тваринні та рослинні жири як сировина для виробництва біодизеля (узагальнення досвіду). Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Збірник наукових праць. - 2010, Вип.144, ч.3, С. 122-125.
23. ДСТУ 3437-96 «Нафтопродукти. Терміни та визначення».

Додаток А. Обробка результатів прямих рівноточних вимірювань

В математичній статистиці приймається, що для рівноточних вимірювань оцінкою математичного очікування величини X, яка вимірюється, є середнє арифметичне значення виборки $X_1, X_2, \quad X_n$, яке і приймається за результат вимірювання

$$X_C = \frac{1}{n}\sum_i X_i . \qquad (A.1)$$

Точність отриманого значення оцінюється середнім квадратичним відхиленням результату вимірювання, яке визначається наступною формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \left(X_i - X_C\right)^2}{n(n-1)}} . \qquad (A.2)$$

Мінімально необхідне число вимірювань визначається за формулою

$$n_{\min} = \frac{2}{1-P}, \qquad (A.3)$$

де P – значення довірчої ймовірності.

Визначення довірчих меж ΔX випадкової складової результату вимірювання провадиться для вибраної довірчої ймовірності P (як правило, P =0,95) після обчислення середнього квадратичного відхилення та перевірки гіпотези про нормальність виборки

$$\Delta X = \pm 2\sigma, \qquad (A.4)$$

Якщо число вимірювань менше 30, то довірчі межі визначають за формулою

$$\Delta X = \pm \sigma K_C, \qquad (A.4)$$

де K_C – коефіцієнт Ст'юдента (Госсета).

Таблиця А1. Значення коефіцієнтів Ст'юдента [1]

$n-1$	1	2	3	4	5	6	7	8
P =0,95	12,7	4,30	3,18	2,77	2,57	2,45	2,36	2,30
P =0,99	63,65	9,92	5,84	4,60	4,03	3,70	3,59	3,35

Продовження табл. А1

$n-1$	9	10	11	12	13	14	15	16
P =0,95	2,26	2,20	2,20	2,20	2,20	2,10	2,10	2,10
P =0,99	3,25	3,20	3,10	3,10	3,00	3,00	2,90	2,90

Перед проведенням вимірювань вибирається число вимірювань за формулою (А.3), приймаючи значення довірчої імовірності рівній 0,95. Або обирається довільне інше число вимірювань n. Проводиться обрана кількість вимірювань та складається таблиця вимірювань (табл. А.2).

Таблиця А.2. Результати вимірювань

№ п/п	X_i	$(X_C - X_i)^2$
1	X_1	$(X_C - X_1)^2$
…	…	…
n	X_n	$(X_C - X_n)^2$
Середнє	X_C	$\sum(X_C - X_i)^2$

X_C , σ та Δ X вираховуються за формулами (А.1), (А.2) та (А.4) відповідно.

Якщо обрано кількість вимірювань n менше 30, то Δ X вираховують за формулою (А.5).

Далі записується результат $X_C = \Delta X$.

Якщо X_C залежить від декількох вимірювальних величин, то спочатку вираховують відносну похибку кожної вимірювальних величин, а ΔX обчислюється за формулою

$$\Delta X = X\left(\frac{\Delta Y}{Y_C} + \frac{\Delta Z}{Z_C}\right). \qquad (А.6)$$

Література

1. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К. : Вища шк., 1976. – 432 с.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М. : ГИТТЛ, 1953. – С. 565 – 570.