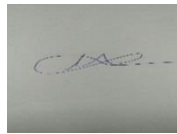


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

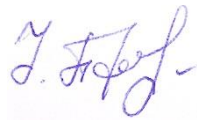
Кваліфікаційна робота магістра
**ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК Ge та Si**

Магістрант гр.ЕП.м-92



М.А. Малецький

Науковий керівник
канд. фіз.-мат. наук, доцент



І.М. Пазуха

Зав. кафедри ЕЗПФ
д-р фіз.-мат. наук, професор



І.Ю. Проценко

Суми-2020

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у аналізі результатів та вивченні явища фотоефекту у тонких напівпровідникових плівках германію та кремнію, визначення чутливості плівкових зразків до дії зовнішнього опромінення у залежності від їх товщини.

Під час виконання роботи використовувалися такі методи як термічне випаровування у вакуумі для одержання зразків, оптична інтерферометрія для визначення товщини та резистометрія для дослідження впливу опромінювання на величини опору плівок. В якості приладів використовувались установка ВУП-5М, інтерферометр МП-4, світлофотометр.

У результаті проведених досліджень було проведено дослідження явища фотоефекту в тонких плівках Ge і Si та визначено коефіцієнт чутливості K , який показує як змінюється питомий опір зразка при зміні інтенсивності джерела випромінювання. Встановлено, що величина коефіцієнта K при зростанні товщини зменшується.

Робота викладена на 31 сторінка, зокрема містить 10 рисунків, 4 таблиці список використаних джерел з 15 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПІВПРОВІДНИКОВА ПЛІВКА, ФОТОЧУТЛИВІСТЬ, ФОТОПРОВІДНІСТЬ, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ НАПІВ- ПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	6
1.1 Поняття «фотоефект».....	6
1.2 Особливості явища фотоефекту у тонких плівках.....	11
1.3 Застосування явища фотоефекту в мікроелектроніці.....	14
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	18
2.1 Методика одержання тонкоплівкових зразків.....	18
2.2 Метод оптичної інтерферометрії для визначення товщини.....	20
2.3 Методика дослідження явища фотоефекту.....	22
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ	26
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	30

ВСТУП

Фотоефект це один з основних проявів квантових властивостей електромагнітного випромінювання. Він проявляється тим сильніше, чим більша енергія (частота) квантів. Тому він властивий не лише для видимого світла, а в більшій мірі для ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання. Фотоефект використовується в фотоелементах – датчиках електромагнітного випромінювання; електронно-оптичних перетворювачах; фотопомножувачах; сонячних батареях-джерелах електричної енергії.

Останнім часом спостерігається дуже великий інтерес до використання різних альтернативних джерел електроенергії. Так як уже зараз досить важко задовольняти потреби людства за рахунок невідновлювальних джерел енергії, тому людство все більше звертає увагу на альтернативну енергетику, одним з найперспективніших напрямків якої є сонячна енергетика, на основі якої розробляються різні фоточутливі датчики, елементи в основі яких лежить явище фотоефекту

Сучасний рівень досліджень в хімічній технології характеризується використанням нових перспективних матеріалів та покриттів з високими значеннями фотоелектричних показників для виготовлення альтернативних фотоелектричних перетворювачів на основі створення енергозберігаючих технологій [1].

Для існуючих технологій виготовлення фотоелементів доцільним є удосконалення процесу нанесення покриття, зниження вартості вихідних матеріалів, виявлення резервів зниження енергетичних та виробничих витрат. Враховуючи вище зазначене, формування покриттів з фотоелектричними властивостями є актуальною науково-практичною задачею.

Мета даної роботи полягає у вивченні явища фотоефекту у тонких напівпровідникових плівках германію та кремнію, визначення чутливості плівкових зразків до дії зовнішнього опромінення у залежності від їх товщини.

РОЗДІЛ 1

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВОК (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

1.1 Поняття «фотоефект»

Фотоелектричний ефект був відкритий в 1887 році німецьким фізиком Г. Герцем і в 1888-1890 роках експериментально досліджений А. Г. Столетова. Найбільш повне дослідження явища фотоефекту було виконано Ф. Ленард в 1900. До цього часу вже був відкритий електрон (1897 р Дж. Томсон), і стало ясно, що фотоефект (або точніше - зовнішній фотоефект) складається в виривання електронів з речовини під дією падаючого на нього світла.

Зовнішнім фотоелектричним ефектом називають випускання електронів речовиною під дією електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 10^{-5} до 10^{-12} метрів. Цей діапазон включає в себе як оптичне, так і рентгенівське випромінювання. Потік випущених речовиною фотоелектронів утворює фотоелектричний струм, величина якого може бути вимірною. Зовнішній фотоелектричний ефект - це фізичне явище, закони якого можна пояснити, розглядаючи, згідно А. Ейнштейну, електромагнітне випромінювання як потік фотонів. При поглинанні речовиною енергія кванта витрачається в речовині на здійснення роботи A по виривання електрона з речовини ("роботи виходу") і повідомлення йому додаткової кінетичної енергії

$$h\nu = A_B + \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad (1.1)$$

де A_B -робота виходу електронів з матеріалу катода, $\frac{mv_{\max}^2}{2}$ - максимальна кінетична енергія фотоелектронів. У цьому полягає сенс

рівняння Ейнштейна.

Серед металів найменшою роботою виходу володіють лужні метали. Наприклад, у натрію $A_b = 1,9$ еВ, що відповідає червоною кордоні фотоефекту $\lambda_{кр} \approx 680$ нм. Тому з'єднання лужних металів використовують для створення катодів в фотоелементах, призначених для реєстрації видимого світла.

Кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає з частотою світла і не залежить від інтенсивності падаючого світла.

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_3 = h\nu - A_b \quad (1.2)$$

Замінюючи в приладі матеріал фотокатода, Столетов встановив, що червона межа фотоефекту є характеристикою даної речовини. Червона межа фотоефекту визначається формулою:

$$V_k = \frac{A_b}{h} \quad (1.3)$$

Рівняння 1.1 називається рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.

В експериментах використовується скляний вакуумний балон з двома металевими електродами, поверхня яких ретельно очищається. До електродів прикладається деяка напруга U , полярність якого можна змінювати.

Один з електродів (катод K) через кварцове віконце висвітлюється монохроматическим світлом певної довжини хвилі λ . При незмінному світловому потоці знімається залежність сили фотоструму I від прикладеної напруги U . На рис.1.2 зображені типові криві залежності сили фотоструму від прикладеної напруги. $I_{н1}$ і $I_{н2}$ - струми насичення, отримані при двох значеннях інтенсивності світлового потоку, що падає на катод, U_3 - замикає (затримує) потенціал.

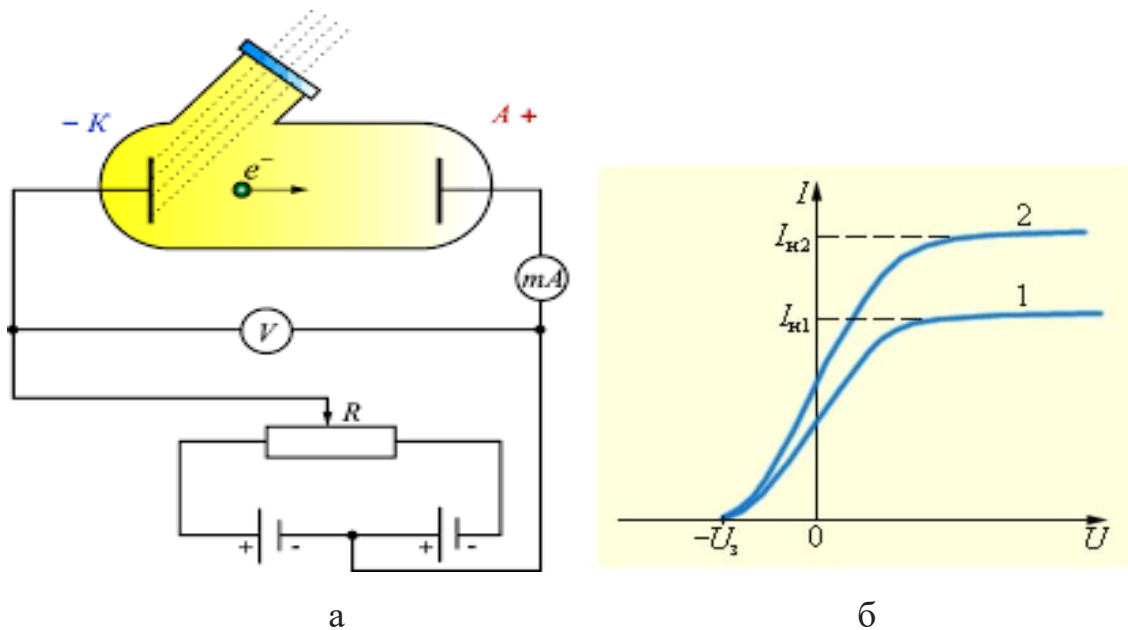


Рис. 1.1. Схема установки (а) для отримання вольт-амперної характеристики фотодіода (б)

Криві показують, що при досить великих позитивних напругах на аноді А фотострум досягає насичення, так як всі електрони, вирвані світлом з катода, досягають анода. Ретельні вимірювання показали, що струм насичення I_n прямо пропорційний інтенсивності падаючого світла. Коли напруга на аноді негативна, електричне поле між катодом і анодом гальмує електрони. Анода можуть досягти тільки ті електрони, кінетична енергія яких перевищує величину $|eU|$.

При $U = U_3$ сила струму в ланцюзі анода дорівнює нулю. При $U > U_3$ в результаті опромінення електрони, вибиті з електрода, можуть досягти протилежного електрода і створити деякий початковий струм.

У реальному фотоелементі навіть при нульовій освітленості катода тече деякий (дуже невеликий) темновий струм I_t , обумовлений частково термоелектронною емісією з катода, почасти різницею робіт виходу для катода і анода, почасти просто витокм струму між висновками фотоелемента. Темновий струм - струм в ланцюзі фотоелемента за відсутності світла.

При різниці потенціалів між катодом і анодом, близькою до U_3 , сила струму в ланцюзі анода того ж порядку, що і темної струм. Однак величина темного струму залежить від безлічі параметрів і в принципі може змінюватися в ході експерименту. Зі сказаного ясно, що спосіб експериментального визначення U_3 як напруги, при якому струм на виході фотоелемента дорівнює нулю (або навіть попередньо виміряного значенням I_t) не цілком надійний. Для отримання більш достовірного значення U_3 слід збільшувати (по модулю) негативне анодна напруга до тих пір, поки не припинить зменшуватися анодний струм фотоелемента.

При позитивних значеннях анодної напруги темної ток становить незначну частину повного струму. Тому при знятті вольт-амперної характеристики в області $U > 0$ облік темного струму не потрібно.

Якщо напруга на аноді менше, ніж U_3 , фототок припиняється. Вимірюючи U_3 , можна визначити максимальну кінетичну енергію фотоелектронів:

$$E_{k \max} = \frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3 \quad (1.4)$$

Рівняння Ейнштейна для випадку, коли кінетична енергія електрона дорівнює за величиною роботі сил електричного поля, тобто при затримуваній напрузі:

$$h\nu = A_b + eU_3 \quad (1.5)$$

Величина U_3 виявилася незалежною від інтенсивності падаючого світлового потоку. Ретельні вимірювання показали, що замикає потенціал лінійно зростає зі збільшенням частоти ν світла (рис. 1.2).

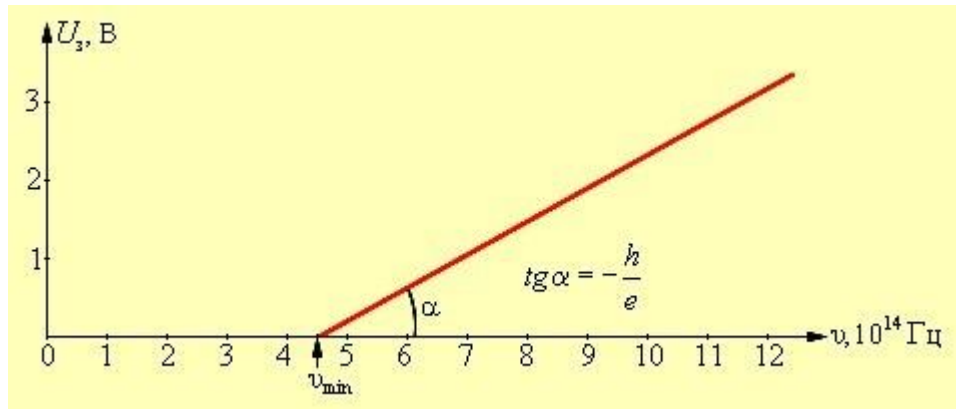


Рис. 1.2 Залежність замикаючої напруги від частоти світла

Численними експериментаторами були встановлені наступні основні закономірності фотоефекту:

1. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає зі збільшенням частоти світла ν і не залежить від його інтенсивності.

2. Для кожної речовини існує так звана червона межа фотоефекту, т. Е. Найменша частота ν_{min} , при якій ще можливий зовнішній фотоефект.

3. Число фотоелектронів, що вириваються світлом з катода за 1 с, прямо пропорційно інтенсивності світла.

4. Фотоефект практично безінерційна, фототок виникає миттєво після початку освітлення катода за умови, що частота світла $\nu > \nu_{min}$.

Всі ці закономірності фотоефекту в корені суперечили уявленням класичної фізики про взаємодію світла з речовиною.

Згідно хвильовим уявленням при взаємодії з електромагнітної пучком електрон мав би поступово накопичувати енергію, і треба було б чимало часу, залежне від інтенсивності світла, щоб електрон накопичив достатньо енергії для того, щоб вилетіти з катода. Як показують розрахунки, це час мало б обчислюватися хвилинами або годинами. Однак, досвід показує, що фотоелектрони з'являються негайно після початку освітлення катода. У цій моделі також було неможливо зрозуміти існування червоної межі фотоефекту.

Хвильова теорія світла не могла пояснити незалежність енергії фотоелектронів від інтенсивності світлового потоку і пропорційність максимальної кінетичної енергії частоті світла. Таким чином, електромагнітна теорія світла виявилася нездатною пояснити ці закономірності. Вихід був знайдений А. Ейнштейном в 1905 р Теоретичне пояснення спостережуваних закономірностей фотоелектру було дано Ейнштейном на основі гіпотези М. Планка про те, що світло випромінюється і поглинається певними порціями, причому енергія кожної такої порції визначається формулою:

$$E = h\nu \quad (1.6)$$

де h - постійна Планка.

Ейнштейн зробив наступний крок в розвитку квантових уявлень. Він прийшов до висновку, що світло має переривчасту (дискретну) структуру. електромагнітна хвиля складається з окремих порцій - квантів, згодом названих фотонами. При взаємодії з речовиною фотон цілком передає всю свою енергію $h\nu$ одному електрону. Частина цієї енергії електрон може розсіяти при зіткненнях з атомами речовини. Крім того, частина енергії електрона витрачається на подолання потенційного бар'єру на межі метал-вакуум. Для цього електрон повинен зробити роботу виходу A , що залежить від властивостей матеріалу катода.

1.2 Особливості явища фотоелектру у тонких плівках

Розглянемо які особливості має явище фотоелектру у тонких плівках. Були проведені дослідження дослідження фотоелектричних властивостей тонких CdTe, що мають електронну провідність, яка за температури 300К змінюється у межах $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Плівки наносили на скляні підкладки типорозміром $20 \times 20 \times 1 \text{ мм}^3$, які попередньо обезжирювали в соляній кислоті,

піс-ля чоґо промивали їх деіонізованою водою. Нанесення плівок проводили у вакуумі, який становив $\sim 10^{-6}$ Торр, на гарячі підкладки з температурою більшою від 550 К.

Були виготовлені фоточутливі плівки з відхи-ленням від стехіометричного складу в бік надлишку Cd або Te, використовуючи додаткові джерела випаровування компонентів Cd або Te. Плів-ки наносили при різних температурах підкладок, які змінювали в межах 400÷700 К. Товщина отриманих плівок становила ~ 1 мкм.

За таких умов, по-перше, протягом усього процесу вирощування плівки підтримувався високий ступінь чистоти поверхні підкладки.

Оскільки для адсорбції навіть моноатомного шару залишкових газів потрібно декілька годин [1], і, по-друге, практично усувається забруднення ма-теріалу, яке можливе при використанні термічних випаровувачів. За допомогою такої технології вирощені плівки телуриду кадмію на скляних підкладках. З отриманими плівками проводили дослідження електрофізичних, фотоелектричних та оптичних характеристик. Результати вимірювання і їх обговорення.

Електричні та фотоелектричні властивості тонких плівок CdTe. Вимірювання електропро-відності плівок проводили при кімнатних температурах компенсаційним методом на постійному струмі. Усі досліджені плівки характеризувались *p*-типом провідності. Електропровідність плівок була $\sim 10^{-7}$ Ом⁻¹ при 300 К. Для підвищення значення величини σ плівки відпалювали на повітрі при $T=500-700$ К протягом 5-15 хв. Отримані результати зведені у таблиці 1. Видно, що термообробка в атмосферних умо-вах призводить до збільшення провідності плівок. Це можна пояснити тим, що сорбоване повітря і водяна пара зумовлюють збільшення кількості акцепторних домішок.

Крім цього, у процесі від-палу збільшується концентрація вакансій Cd внаслідок часткового випаровування атомів з по-верхні, що теж спричинює зростання величини σ .

Таблиця 1.1 - Вплив відпалу на електричні властивості плі-вок CdTe. Температура підкладки 600 К [7]

№ п/п	Температура відпалу, К	Час відпалу, хв	σ , Ом ⁻¹
1	Не відпалена	Не відпалена	$5 \cdot 10^{-7}$
1'	500	5	$1 \cdot 10^{-7}$
1''	700	15	$1 \cdot 10^{-6}$

Одержані плівки мали добру фоточутливість, що ілюструється залежністю опору плівки від сили падаючого на неї світла. Ця залежність наведена на рис. 1.

При силі світла $I \geq 10^6$ Лк залежність $R(I)$ досягає стану насичення і опір плівки становить $\sim 1,2 \cdot 10^5$ Ом. Тобто, при зміні сили світла від $2 \cdot 10^6$ Лк до $(7-9) \cdot 10^6$ Лк опір плівки зменшується більш як на 3 порядки. Спектральна залежність фоточутливості плі-вок наведена на рис.1. Видно, що залежність $I_{\Phi} \text{ Im}\Phi = f(h\nu)$ має вигляд типової кривої для напівпровідникових матеріалів. Максимум фоточутливості розташований в області енергій фотонів $h\nu = 1,48-1,5$ еВ, що збігається з краєм власного поглинання. Зменшення фоточутливості при великих значеннях енергії фотонів зумовлене поверхневою рекомбінацією фотозбуджених носіїв заряду. Оптичні властивості тонких плівок CdTe Пропускання світла отриманими плівками CdTe вимірювали дифракційним монохроматором МДР-23.

Спектральна залежність коефіцієнта пропускання наведена на рис.2. Пропускання світла плівкою, близькою до стехіометричного складу крива значно більше, ніж плівкою з надлишком Те (крива 2). Після відпалу при температурі 700 К протягом 10 хв спектральна залежність пропускання для плівки з надлишком Те (крива 3) добре узгоджується із залежністю $T(\lambda)$ для зразка близького до стехіометричного складу. Характерна особливістю кривої 1 рис. 1.2 в тому, що при $\lambda > 0,84$ мкм залежність $T(\lambda)$ має вигляд синусоїди, що зумовлено наявністю інтерференції у отриманих плівках.

Інтерференційну картину використали для визначення товщини плівки. Використовуючи значення показника заломлення для тонких плівок CdTe $n=3,25$ [2], оцінено значення величини коефіцієнта відбивання R за формулою:

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

1.3 Застосування явища фотоелектру в мікроелектроніці

Явище фотоелектру широко застосовують в науці і техніці: воно дозволяє здійснити безпосереднє перетворення енергії світла в електричну енергію. Прилади, в основі принципу дії яких лежить явище фотоелектру, називають фотоелементами.

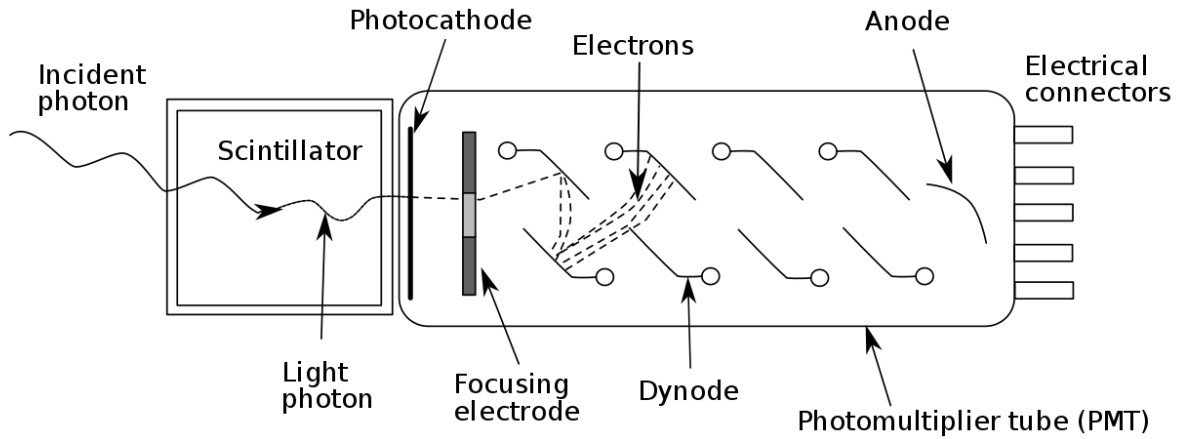
У фотоелементах енергія світла керує енергією електричного струму або перетворюється в неї. Фотоелементи, які використовують зовнішній фотоелектр, перетворюють в електричну енергію лише незначну частину енергії випромінювання. Тому джерела електроенергії їх не використовують, зате широко застосовуються в різних схемах автоматики для управління електричними ланцюгами за допомогою світлових пучків.

За допомогою фотоелементів здійснюється відтворення звуку, записаного на кіноплівці, а так же передачі рухомих зображень (телебачення). У аеронавігації, у військовій справі широко застосовують фотоелементи, чутливі до інфрачервоних променів. Інфрачервоні промені невидимі, хмари і туман для них прозорі. З явищем фотоелектру пов'язані фотохімічні процеси, що протікають під дією світла в фотографічних матеріалах.

Величезна різноманітність завдань, що вирішуються за допомогою фотоелементів, викликало до життя надзвичайно велика різноманітність типів фотоелементів з різними технічними характеристиками. Вибір оптимального типу фотоелементів для вирішення кожної конкретної задачі

ґрунтується на знанні ці характеристик. Для фотоелементів із зовнішнім фотоэффектом (вакуумних фотоелементів) необхідне знання наступних характеристик: робоча область спектра; відносна характеристика спектральної чутливості (вона будується як залежність від довжини хвилі падаючого світла безрозмірною величиною відносини спектральної чутливості при монохроматичному освітленні до чутливості в максимумі цієї характеристики); інтегральна чутливість (вона визначається при висвітленні фотоелемента стандартним джерелом світла); величина квантового виходу (процентне відношення числа емітованих фотоелектронів до числа падаючих на фотокатод фотонів); інерційність (для вакуумних фотоелементів вона визначається зазвичай через час прольоту електронів від фотокатода до анода). Важливим параметром служить також темновий ток фотоелемента, який складається з термоемісії фотокатода при кімнатній температурі і струму витoku. Дуже важливою перевагою вакуумних фотоелементів є їх висока сталість і лінійність зв'язку світлового потоку з фотострумом. Тому вони тривалий час переважно використовувалися в об'єктивній фотометрії, спектрометрії, спектрофотометрії та спектральному аналізі у видимій ультрафіолетовій областях спектра. Головним недоліком вакуумних фотоелементів при світлових вимірах слід вважати трохи електричних сигналів, вироблюваних цими приймачами світла. Останній недолік повністю усувається в фотоелектронних помножувачах (ФЕУ), що представляють як би розвиток фотоелементів. ФЕУ були вперше побудовані в 1934 р.

Принцип дії ФЕП можна простежити на рис 1.4 Фотоелектрони, що емітуються з фотокатода ФК під дією електричного поля, прискорюються і потрапляють на перший проміжний електрод. Падаючи на нього, фотоелектрони викликають емісію вторинних електронів, причому в певних умовах ця вторинна емісія може в кілька разів перевищувати первинний потік фотоелектронів. Конфігурація електродів така, що більшість фотоелектронів потрапляє на електрод, а більшість вторинних електронів



M

Рис. 1.3. Схема пристрою фотопомножувача [6]

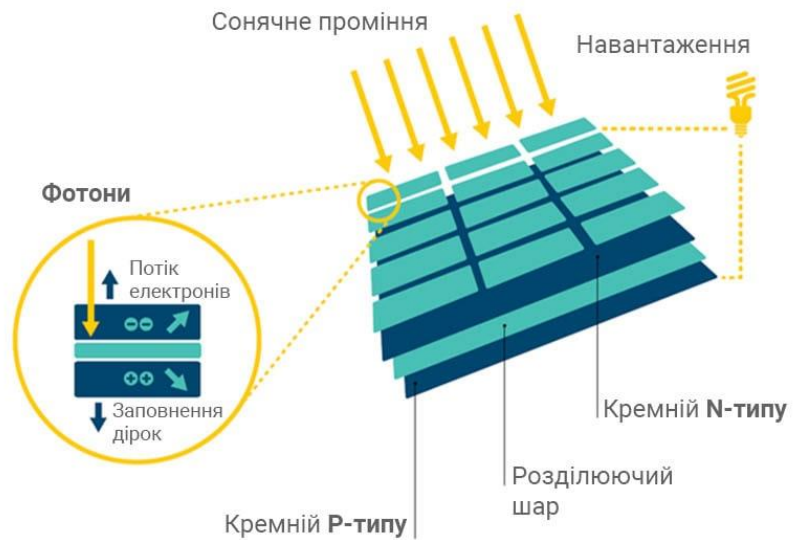


Рис. 1.4. Схема роботи кремнієвої сонячної батареї: 1 - чистий монокристалічний кремній; 2 - «забруднений» кремній; 3 – акумулятор [7]

потрапляє на наступний електрод, де процес множення повторюється, і т. Д. Вторинні електрони з останнього з електродів (діодов), а їх буває до 10 - 15, збираються на анод. Загальний коефіцієнт посилення таких систем досягає, а інтегральна чутливість ФЕП досягає тисяч ампер на люмен. Це, звичайно, не означає можливості отримання великих струмів, а свідчить лише про можливість вимірювання малих світлових потоків.

Явище фотоефекту практично було застосоване в пристроях для прямого перетворення світлової або сонячної енергії в електроенергію, які називаються фотоелементами (з англійської Photovoltaics, від грецького photos – світло і назви одиниці електрорушійної сили – вольт).

Напівпровідникові фотоелектричні елементи, що працюють на принципі перетворення світлової енергії сонячного випромінювання безпосередньо в електрику називають сонячними батареями.

Тонка пластина складається з двох шарів кремнію з різними фізичними властивостями. Внутрішній шар являє собою чистий монокристалічний кремній. Зовні він покритий дуже тонким шаром «забрудненого» кремнію, наприклад з домішкою фосфору. Після опромінення такої «вафлі» сонячними променями між шарами виникає потік електронів і утворюється різниця потенціалів, а в зовнішньому ланцюзі, що з'єднує шари, з'являється електричний струм.

При цьому генерується постійний струм. Енергія може використовуватися як напряму різними навантаженнями постійного струму, запасатися в акумуляторних батареях для подальшого використання або покриття пікового навантаження, а також перетворюватися в змінний струм напругою 220 В для живлення різного навантаження змінного струму.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика одержання тонкоплівкових зразків

Перший етап роботи полягав у виготовленні підкладок для подальшого дослідження явища фотоефекту в тонки напівпровідникових плівках. Для спрощення процедури дослідження та з метою ефективного використання часу та робочого обладнання одночасно виготовлялося п'ять підкладок. У якості підкладок були використані текстолітові пластини, центральна частина якої звільнялася від провідного покриття механічним шляхом. Розміри плівкового зразка задавалися розмірами підкладки і становили $6,5 \times 11$ мм (рис. 2.1a). На наступному етапі проводилося безпосереднє нанесення на підкладку тонкоплівкових зразків. У якості напівпровідникового матеріалу був використаний власний напівпровідник германій, оскільки саме від знайшов досить широке практичне використання при виготовленні елементної бази сучасної мікроелектроніки.

Плівкові зразки отримувалися методом термічного випаровування у вакуумній установці ВУП-5М (тиск газів залишкової атмосфери 10^{-4} Па). На рисунку 2.2 представлено схематичне зображення вакуумної камери з використаним при роботі устаткуванням. Конденсація здійснювалася при кімнатній температурі на текстолітові (для дослідження фотоефекту) та ситалові (для визначення товщини методом оптичної інтерферометрії) підкладки. У даній роботі у якості випарника був використаний випарник із вольфрамового дроту у вигляді спіралі.

Ефективність процесу розпилення визначається насамперед малим часом осадження у перерахунку на одну підкладку і максимальною рівномірністю товщини плівки на всій поверхні підкладки. Відповідно до цього при конструюванні випарників для випаровування речовини у вакуумних установках велике значення має знання характеристик

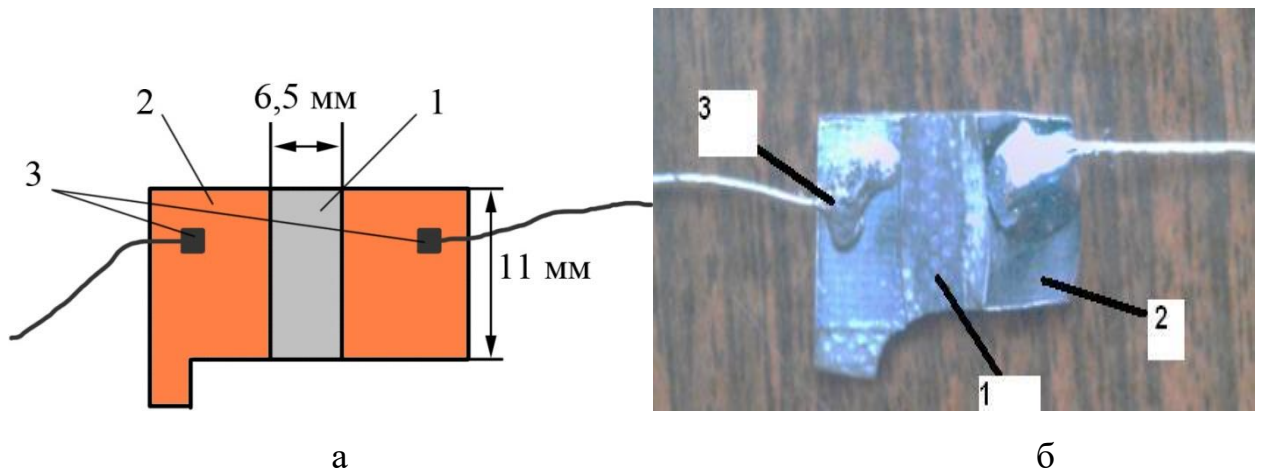


Рис. 2.1. Схематичне зображення (а) та фотографія підкладки з нанесеним плівковим зразком (б): 1 – тонкоплівковий зразок; 2 – мідні контакти; 3 – вивідні контакти для підєднання до вимірювального приладу

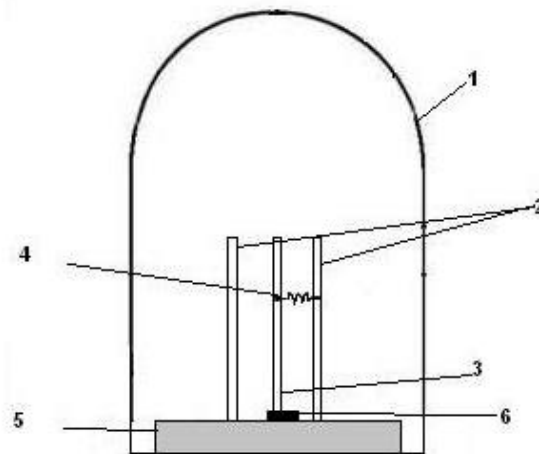


Рис. 2.2. Схематичний рисунок вакуумної камери: 1 – ковпак; 2 – електроди; 3 – заземлення; 4 - вольфрамовий випарник; 5 – столик; 6 – зразок

випаровування, які істотно впливають на розподіл конденсованої речовини за товщиною. Оскільки в більшості випадків, при створенні різних мікроелектронних приладів, необхідно отримувати плівки заданої товщини, то очевидно, що важливим параметром випаровувача є площа поверхні підкладки, яка може бути покрита рівномірно плівкою однакової товщини.

Використовуючи закони випаровування, профіль товщини плівки може бути виведений не тільки для точкових випаровувачів і випаровувачів з малою поверхнею, а й для будь-якої форми поверхні підкладки та для будь-якого положення підкладки відносно випаровувача. Однак зазвичай використовують плоскі підкладки і розташовують їх паралельно до ефективної площини випаровування.

Отже, у роботі з метою проведення дослідження явища фотоефекту у тонких плівках германію, була отримана серія зразків (рис. 2.2б), товщина яких змінювала в межах $d = 24-40$ нм. Товщина плівкових зразків вимірювалися методом оптичної інтерферометрії, детально описаної у наступному пункті.

2.2 Методи оптичної інтерферометрії для визначення товщини

Під інтерференцією світла розуміють великий спектр явищ, в яких при накладенні пучків світла результуюча інтенсивність не дорівнює сумі інтенсивностей окремих пучків: в одних місцях вона більша, а в інших менша, тобто виникає чергування світлих та темних ділянок-інтерференційних смуг. До явища інтерференції світла мають безпосереднє відношення такі поняття як принцип суперпозиції коливань, когерентність хвиль та інтенсивність результуючого коливання.

Для спостереження інтерференції світло від одного джерела необхідно розділити на два пучка, а потім накласти їх один на другий. Експериментальні методи отримання когерентних пучків з одного світлового пучка можна

розділити на два класи: розділення хвильового фронту (метод Юнга) або розділення амплітуди хвилі (метод Лінника).

У методі Юнга пучок проходить через два близько розміщених отвори у непрозорому екрані. Таких метод придатний лише при достатньо малих розмірах джерела. У методі Лінника пучок ділиться на одній або декількох частково відбиваючих або частково пропускаючих поверхнях. Цей метод забезпечує велику інтенсивність і є основою дії різноманітних інтерферометрів.

Оптичний метод – метод, що базується на реєструванні параметрів оптичного випромінювання, що взаємодіє з контролюючою деталлю. Метод використовується для покриття з коефіцієнтом відбивання не менше 0.3. Відносна похибка методу $\pm 5\%$. Товщину покриттів контролюють 2-ма типами методів: руйнуючі та неруйнуючі.

Точність вимірювання товщини плівкового матеріалу до великої міри залежить від точності визначення товщини, тому потрібно отримувати чітку картинку картину інтерференції, що визначається до великої міри інтенсивністю відбитого променя. Інтерферометрами називають оптичні прилади, в основі принципу роботи яких лежить явище інтерференції світла.

В залежності від числа пучків, які складаються, інтерферометри розділяють на двопроменеві та багатпроменеві. Вони використовуються для точного вимірювання довжин, кутів, у тому числі товщини прозорих покриттів, характеристик оптичних поверхонь, показників заломлення середовищ, спектрального складу випромінювання і т.д.

При додаванні пучків світла, відбитих від еталону і зразка спостерігаються смуги інтерференції, які зміщені (зігнуті) у відповідності з профілем досліджуваної поверхні (рис. 2.3). Кривизну смуг вимірюють, наприклад, за допомогою окулярного мікрометра. Вона є кількісною характеристикою мікронеоднорідності поверхні зразка. Вимірювання можна проводити у білому чи монохроматичному світлі.

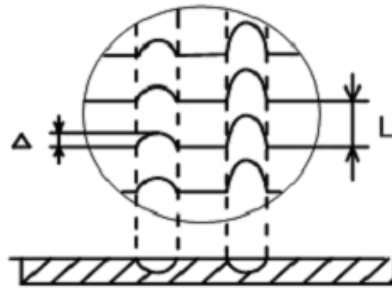


Рис. 2.3. Схема заміщення смуг інтерференції [13]

Для визначення товщини плівкового зразка необхідно використовувати монохроматичне світло. При геометрії, представленій на рис. 2.3, товщина обчислюється за формулою:

$$d = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta}{L}, \quad (2.1)$$

де λ – довжина хвилі; Δ – величина зміщення інтерференційної смуги; L – відстань між смугами.

Величини Δ і L оцінюють візуально або за допомогою окулярного мікрометра.

2.3 Методика дослідження фотоефекту

Для дослідження фотопровідності напівпровідникових плівкових матеріалів використовується лабораторний стенд, схема якого наведена на рисунку 2.4, а зовнішній вигляд на рисунку 2.5.

Процедура дослідження фотопровідності тонких напівпровідникових плівок германію полягала у наступному. Нанесена на підкладку плівка фіксувалася у лабораторному стенді за допомогою тримача. Після цього проводилося вимірювання повністю затемненого зразка (рис. 2.6а). Зауважемо, що для того щоб виключити вплив денного світла на опір зразків, дослідження проводилися у приміщенні із затемненими вікнами, вимкненому світлі. Після

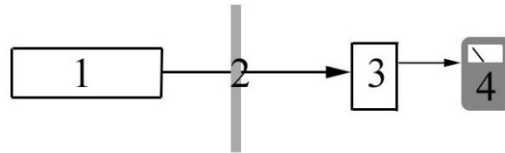


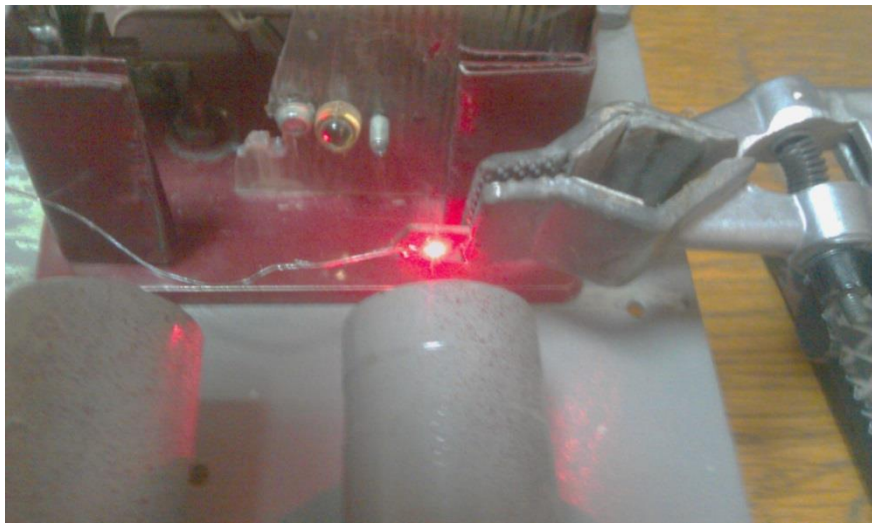
Рис. 2.4. Схема стенду: 1 – джерело світла (лазер, лампа накаливання, природне освітлення); 2 – напівпрозоре дзеркало; 3 – тонка плівка на підкладці; 4 – мультиметр [15]



Рис. 2.5 Зовнішній вигляд лабораторної установки для дослідження фотопровідності тонких напівпровідникових плівок: а) вид збоку; б) вид зверху

цього крізь зразок направлялося лазерне випромінювання і вимірювався опір повністю засвітленого зразка (рис. 2.6 б).

На наступному етапі на шляху лазерного випромінювання між лазером та зразком розміщувалися фільтри та проводилося вимірювання опору. У якості фільтрів були використані напівпрозорі дзеркала. Виготовлення фільтрів проходило наступним чином. П'ять скляних пластинок однакової форми, попередньо очищених і обезжирених, по чергово розміщувалися у вакуумній камері установки ВУП-5М. На поверхню скляних пластин методом термічного випарування наносилися методом термічного випарування плівки алюмінію різної товщини. За допомогою спеціального приладу, світлофотометра, визначалася коефіцієнт прозорості кожного з фільтрів.



а

б

Рис. 2.6. Фотознімки лабораторної установки в режимах повного затемнення (а) та максимально засвітлення (б)

Таким чином, в результаті отримуємо залежність опору зразків від інтенсивності лазерного випромінювання.

На останньому етапі визначення фотопровідності проводилися розрахунки питомого опору за співвідношенням

$$\rho = R \frac{a \cdot d}{l}, \quad (2.2)$$

де R – опір плівкового зразка; l , a та d – довжина, ширина та товщина плівки відповідно.

Після цього будувалися залежності питомого опору від інтенсивності лазерного випромінювання та розраховувалася чутливість плівкового зразка за співвідношення:

$$K = \Delta\rho/\Delta I. \quad (2.3)$$

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Германій і кремній у масивному чи плівковому стані є типовими власними напівпровідниками. У таких напівпровідниках концентрація електронів (n_-) у зоні провідності дорівнює концентрації дірок (n_+) у зоні валентності ($n_- = n_+$). Крім того, як кремній так і германій відносять до елементарних напівпровідників, які базовими матеріалами при виготовленні елементної бази мікро- і наноелектроніки. Оскільки і в кремнії і в германії проявляється фоторезистивний ефект (під дією випромінювання відбувається зміна питомого опору речовини), то вони також можуть бути використані при виготовленні фото чутливих елементів. Зокрема, на основі кремнію виготовляються фотодіоди, які характеризуються високою швидкістю [9].

У ході виконання роботи були проведені дослідження ефекту фотопровідності для плівкових зразків германію, товщиною $d = 50, 60, 80$ нм. Для визначення фоточутливості, дані зразки опромінювалися

Таблиця 3.1

Результати дослідження ефекту фотопровідності у тонких плівках Ge та Si

Зразок	d , нм	$\rho(I=0)$, Ом·м	$\rho(I_{\max})$, Ом·м	K , Ом·м/Лк
Ge	50	13,5	9	0,031
	60	9,0	6,48	0,017
	80	5,76	5,28	0,003
Si	35	2,35	2,33	0,005
	20	3,60	2,15	0,010
	12	1,58	1,01	0,040
	10	7,09	2,36	0,030

лазерним випромінювання, максимальна інтенсивність якого становила 145 Лк.

На основі експериментальних результатів дослідження явища фотоефекту в тонких плівках кремнію визначалася чутливість плівкового зразка за співвідношенням (2.3). Коефіцієнт K складає величину 0,031; 0,017; 0,003 Ом·мЛк відповідно для зразків товщиною $d = 50, 60$ і 80 нм. Результати зведені у таблиці 3.1. Розмірна залежності коефіцієнту чутливості плівкового зразка представлена на рисунку 3.1. На основі даної залежності можна зробити висновок, що чутливість до лазерного випромінювання зменшується при зростанні товщини зразків.

У ході виконання роботи були проведені дослідження ефекту фотопровідності для чотирьох плівкових зразків кремнію, товщиною $d = 10, 12, 20, 35$ нм. Для визначення фоточутливості, дані зразки також як і у випадку плівок германію опромінювалися лазерним випромінювання, максимальна інтенсивність якого становила 145 Лк.

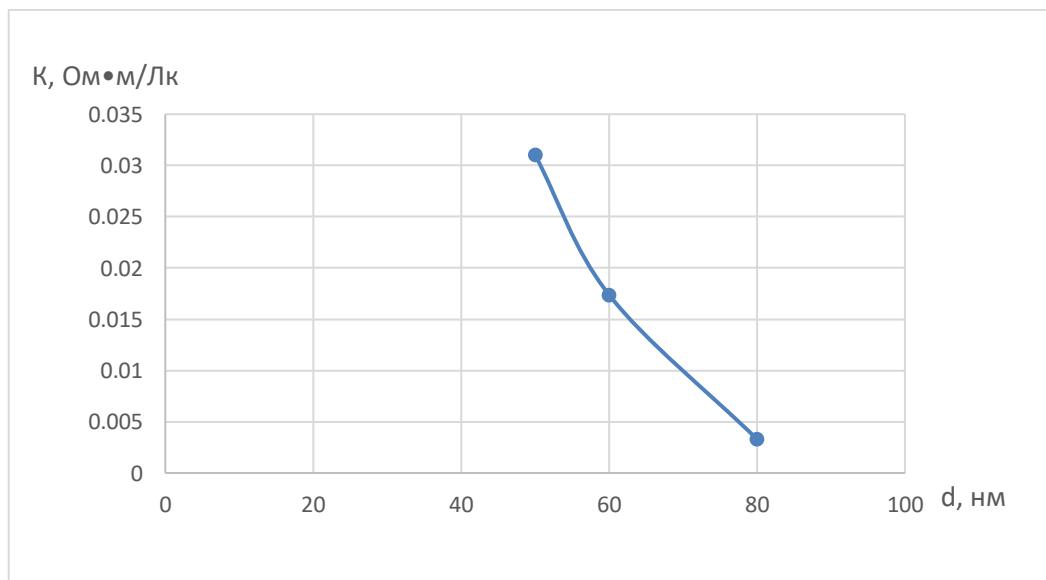


Рис. 3.1. Розмірна залежність фоточутливості тонких плівок Ge

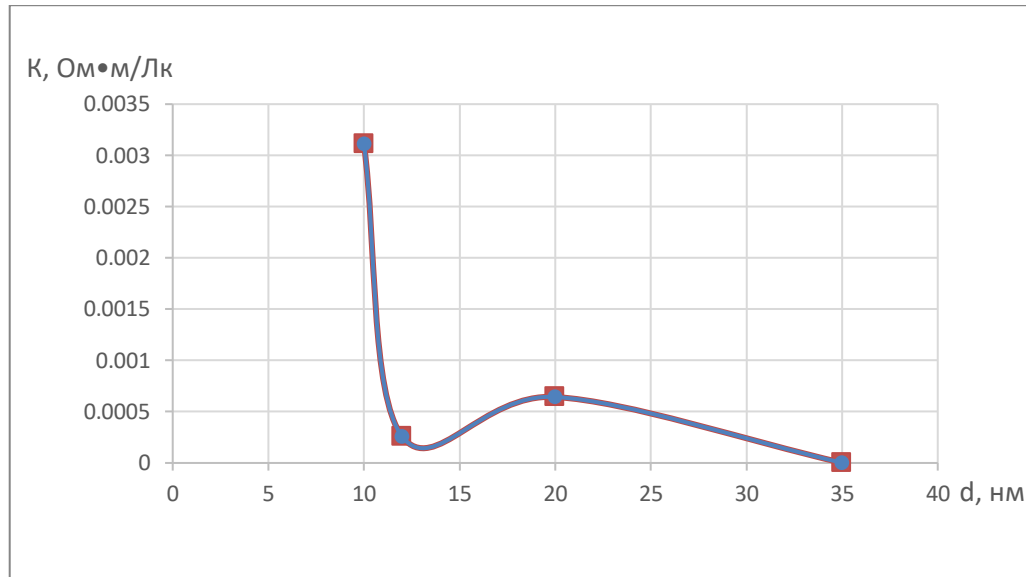


Рис. 3.2. Розмірна залежність fotocутливості тонких плівок Si

На основі експериментальних результатів дослідження явища фотоефекту в тонких плівках кремнію були побудовані залежності питомого опору від інтенсивності лазерного випромінювання. Дані для питомого опору від інтенсивності лазерного випромінювання для плівок Si, товщиною 10, 12, 20, 35 нм представлені в таблиці 3.1. На основі даних таблиці 3.1, визначалася чутливість плівкового зразка за співвідношенням (2.3). Коефіцієнт K складає величину 0,03; 0,04; 0,01; 0,005 Ом·мЛк відповідно для зразків товщиною $d = 10, 12, 20$ і 40 нм. Розмірна залежності коефіцієнту чутливості плівкового зразка представлена на рисунку 3.2 На основі даної залежності можна зробити висновок, що чутливість до лазерного випромінювання зменшується при зростанні товщини зразків.

ВИСНОВКИ

1. Фотоефект отримав широке застосування у пристроях для перетворення світлових сигналів на електричні або для безпосереднього перетворення світлової енергії на електричну.

2. Існують два великі класи таких пристроїв: вакуумні фотоелементи, дія яких ґрунтується на зовнішньому фотоефекті та напівпровідникові фотоелементи, дія яких заснована на внутрішньому фотоефекті.

3. Вакуумні фотоелементи здебільшого застосовують у різноманітних фотореле (для автоматичного вмикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою і кольором, у системах безпеки тощо) і вимірювальних приладах (для вимірювання освітленості, вимірювання потужності імпульсних оптичних сигналів).

4. Напівпровідникові фотоелементи застосовують у чутливих фотоприймачах, які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні; у сонячних батареях, в яких сонячна енергія перетворюється на електричну.

5. Освоєна методика дослідження явища фотопровідності у тонких напівпровідникових матеріалах з використанням спеціально розробленого лабораторного стенду.

6. На основі проведених дослідження ефекту фоточутливості тонких плівок Ge та Si в діапазоні товщин $d = 50-80$ нм та $d = 10-35$ нм, відповідно, були отримані залежності питомої провідності від інтенсивності лазерного випромінювання. На основі даних залежностей був визначений коефіцієнт чутливості K , який показує як зміниться питомий опір зразка при зміні інтенсивності джерела випромінювання. Було показано, що величина коефіцієнта K при зростанні товщини зменшується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sabbatucci L., Salvat F. Theory and calculation of the atomic photoeffect // Radiation Physics and Chemistry. – 2016. – V. 121. – P. 122-140.
2. Qikun Li, Sheng Bi, Kyeiwaa Asare-Yeboah et al. High Performance Vertical Resonant Photo-Effect-Transistor with an All-Around OLED-Gate for Ultra-Electromagnetic Stability // ACS Nano. – 2019. – V.13, No7. – P. 8425–8432.
3. Крилик Л. В. Матеріали електронної техніки: навч. посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 120 с.
4. Радіотехніка : енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мазора, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. – Київ : Вища школа, 1999. – 838 с.
5. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації : навч. посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 208 с.
6. Сонячні паналі (дата доступу 18.12.2020 р.) https://sun-energy.com.ua/articles/yak_pratsuyut_sonyachni_paneli
7. Фотоелектричний помножувач (дата доступу 18.12.2020) https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B6%D1%83%D0%B2%D0%B0%D1%87
8. Осадчук В. С. Волоконно-оптичні системи передачі : навч. посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 225 с.
9. Прищепа М. М. Мікроелектроніка. Частина I. Елементи електроніки / М. М. Прищепа, В. П. Погребняку. – Київ : Вища школа, 2004. – 431 с.
10. Проценко І. Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок. – Суми : СумДУ, 2000. – 148 с.
11. Проценко І. Ю. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) : навч. посібник /

- І. Ю. Проценко, Л. В. Однодворець. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 231 с.
12. Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посібник / Г. М. Розорінов, Д. О. Соловйов. – 2-е вид., перероб. і доп. – Київ : Кафедра, 2012. – 344 с.
13. Стахів П. Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування / П. Г. Стахів, В. І. Коруд, О. Є. Гамола. – Львів : Новий світ-2000, 2003. – 128 с.
14. Швець Є. Я. Матеріали і компоненти електроніки : навч. посібник / Є. Я. Швець, І. Ф. Червоний, Ю. В. Головка Ю. В. – Запоріжжя : ЗДІА, 2011. – 278 с
15. Опанасюк Н. М.,. «Мікроелектронні сенсори» Н. М. Опанасюк, А. О. Степаненко – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 34 с.