

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

фізичний факультет

Кафедра загальної фізики

Фото-е.р.с. в тонких оксидних плівках напівпровідників

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 104 Фізика та астрономія

Освітня програма: Фізика

Спеціалізація: Фізика наноструктур в металах та кераміках

**Кваліфікаційна робота
бакалавра
студентки 4-го курсу
Шпильки Анни Андріївни**

**Науковий керівник:
доктор фіз.-мат. наук,
професор кафедри
загальної фізики
Коротченков О. О.**

Робота заслухана на засіданні кафедри загальної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № 12 від 11 червня 2021 р.

Завідувач кафедри



проф. Боровий М.О.

Київ, 2021

Витяг з протоколу №_____засідання ЕК:

«Визнати, що студентка Шпилька Анна Андріївна виконала та захистила кваліфікаційну роботу бакалавра

з оцінкою «_____»

Голова ЕК №_____

16 червня 2021 р.

АНОТАЦІЯ

Шпилька Анна Андріївна. Фото-е.р.с. в тонких оксидних плівках напівпровідників.

Кваліфікаційна робота бакалавра. Галузь знань: 10 Природничі науки. Спеціальність: 104 Фізика та астрономія. Освітня програма: Фізика. Спеціалізація: Фізика наноструктур в металах та кераміках. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра загальної фізики. – Київ, 2021.

Науковий керівник: Коротченков О. О.

В дипломній роботі розглянуто методи дослідження "поверхневої фото-ЕРС" у напівпровідниках. Експериментально досліджено кінетику релаксації фото-ЕРС у тонких плівках ZnO, осаджених на кремнівій підкладці, при різних довжинах хвилі збуджуючого світла. Дипломна робота містить такі розділи: огляд літератури та методи дослідження фото-ЕРС в тонких оксидних плівках напівпровідників, результати та їх обговорення.

В процесі роботи зроблено висновки на основі проведеного експерименту.

Ключові слова: тонка плівка, напівпровідник, SPV.

SUMMARY

Shpylka Anna. Photo-E.M.F. in thin oxide films of semiconductors.

Bachelor qualification work. Field of knowledge: 10 Natural sciences. Specialty: 104 Physics and Astronomy. Educational program: Physics. Specialization: Physics of nanostructures in metals and ceramics. National Taras Shevchenko University of Kiev, Faculty of Physics, General Physics Department. – Kyiv, 2021.

Research supervisor: Korotchenkov O.

In the diploma work the methods of research of "surface photo-EMF" in semiconductors are considered. The relaxation kinetics of photo-EMF in thin ZnO films deposited on a silicon substrate at different wavelengths of exciting light were investigated experimentally. Thesis contains the following sections: literature review and methods of photo-EMF research in thin oxide films of semiconductors, results and their discussion.

In the course of work conclusions on the basis of the conducted experiment are made.

Keywords: thin film, semiconductor, SPV.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 4 |
| 1. Огляд літературних джерел. Гетероперехід ZnO/Si та його властивості | 6 |
| 2. Методика досліджень | 9 |
| 2.1 Методика дослідження "поверхневої фото-ЕРС" у напівпровідниках | 9 |
| 2.2 Ознайомлення з методикою дослідження "XPS" | 11 |
| 2.3 Зразки | 13 |
| 3. Результати та їх обговорення. | 15 |
| Висновки | 20 |
| Списки використаних джерел | 20 |

Вступ

До найбільш пріоритетних галузей матеріалознавства відноситься розвиток технології отримання матеріалів у вигляді тонких плівок. Це пов'язано з тим, що в тонких плівках властивості матеріалів часто сильно відрізняються від тих, які були типовими для тих самих матеріалів у вихідному стані.

Плівка - тонкий шар зв'язаної конденсованої речовини, товщина яких пропорційна відстані дії поверхневих сил; є термодинамічно стабільною або є метастабільною частиною гетерогенної системи плівка-підкладка.

Тонка плівка - це плівковий шар менш 2.5 мкм.

Тонкі плівки являють собою унікальні за структурою матеріали, які можуть бути отримані у вигляді моно-, полікристалічних, аморфних, склоподібних та полімерних шарів.

З практичних цілей використання тонких плівок у сучасній техніці, зручно розглядати тонкоплівні шари з позиціями зонної моделі, розділена на діелектрики, напівпровідники та метали, при цьому вони можуть бути отримані на основі чистих металів, твердих розчинів та різних класів хімічних сполук.

Тонкі плівки, що застосовуються у вакуумі, широко використовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегрованої мікрохімії (ІМС), а також при підготовці фотомасок - головного технологічного інструменту мікроелектроніки. Сьогодні тонкоплівкові елементи займають до 80% плоских напівпровідникових кристалів, що обумовлено постійним функціональним укладанням ІМС.

Один із найважливіших технологічних процесів формування структур дискових діодів і транзисторів, а також активних і пасивних елементів ІМС пропонується якісно і створений для електрофізичних параметрів тонкоплівкових шарів.

Надійність та якість виробів мікроелектроніки, технічний рівень та економічні показники їх виробництва значною мірою залежать від досконалості технологічних процесів нанесення.

Важливим етапом є контроль параметрів тонких плівок (швидкість нанесення, їх товщина і однорідність, поверхневий опір), який створюється за допомогою спеціальних пристроїв як під час окремих технологічних операцій, так і після завершення всього процесу.

Тонкі плівки наносять у вакуумі термічним випаровуванням та розпиленням іонів. У методах термінового випаровування використовуються випарники з резистивним або електронно-променевим нагріванням, а в іонному розпиленні - система діодного або магнітного розпилення.

На сьогодні вакуумне обладнання для нанесення тонких плівок оснащено насосними системами, які складаються з насосів різних принципів роботи, спеціальних арматур та приладів для вимірювання вакууму. Ефективність значною мірою обумовлена правильністю його використання, знаннями персоналу основ вакуумного обладнання.

Метою роботи є дослідження фото-е.р.с. в тонких плівках ZnO.

1. Огляд літературних джерел. Гетероперехід ZnO/Si та його властивості

Інтеграція тонких плівок із технологією Si передбачає серйозні обмеження мінімальної товщини плівки, що дозволяє створити ізотипний гетероперехід з високою якістю. Це особливо конкурентне завдання, оскільки зазвичай задіяні численні етапи термічної обробки. Однією з найважливіших проблем у цьому відношенні є необхідність уникати утворення великих концентрацій дефектів на межі плівки/підкладки. Відомо, що оксид цинку проявляє унікальні властивості, що робить його цікавим для дослідження та численних застосувань[1]. Один з перспективних типів структур на основі ZnO, придатних для фотоелектричних застосувань, використовує нелеговані шари ZnO, вирощені на пластинах Si [2]. Наявність природного оксиду SiO_x та дефектів на межі розділу впливає на утворення та рекомбінацію носія заряду та різко змінює електричні та фотоелектричні властивості гетеропереходу.

Різні низьковимірні структури з ZnO, напр. тонкі плівки, нанотрубки, нанопровідники, нановолокна виготовлялися з використанням різних методів осадження, таких як МВЕ, CVD, золь-гель метод [3,4]. Також використовувались мікрохвилі та сонохімічний синтез[5-8].

МВЕ(Молекулярно-променева епітаксія)- епітаксіальне зростання в умовах надвисокого вакууму. В основі методу лежить осадження випаруваної в молекулярному джерелі речовини на кристалічну підкладку. Незважаючи на досить просту ідею, реалізація даної технології вимагає надзвичайно складних технічних рішень.

CVD(Хімічне осадження з парової фази, ХОПФ)- процес, який використовується для отримання високочистих твердих матеріалів. Процес часто використовується в індустрії напівпровідників для створення тонких плівок. Як правило, при процесі CVD підкладка поміщається в пари одного або декількох речовин, які, вступаючи в реакцію і / або розкладаючись,

виробляють на поверхні підкладки необхідна речовина. Часто утворюється також газоподібний продукт реакції, що виноситься з камери з потоком газу.

Золь-гель метод- технологія матеріалів, в тому числі наноматеріалів, що включає отримання золю з подальшим переведенням його в гель, тобто в колоїдну систему, що складається з рідкого дисперсійного середовища, укладеної в просторову сітку, утворену об'єднаними частинками дисперсної фази.

За допомогою техніки магнетронного розпилення отримані світлодіоди ZnO-on-p-Si[9]. Поведінка електролюмінесценції ZnO / Si чутливо залежить від умов росту. Морфологічні аспекти тонких плівок ZnO, синтезованих методом магнетронного розпилення[10], було продемонстровано вирішальну роль швидкості осадження у зв'язці підкладка-ZnO.

Як повідомляють Wang та співавт., Зміна температури осадження плівок вурциту ZnO FAZO, спільно легованих фтором та алюмінієм, модифікувала морфологію поверхні плівки таким чином, що спостерігалися форми "піраміди" та "кратера"[11]. Ці перетворення були виявлені комбінуванням різних технік, напр. XRD (рентгенівська дифракція), SEM (сканувальний електронний мікроскоп), AFM (атомно-силовий мікроскоп), XPS(рентгенівська фотоелектронна спектроскопія) та оптична спектроскопія.

Під час легування ZnO Mg, Al та Ga (AGMZO), властивості плівок, такі як структура, морфологія, опір та оптична проникність, залежать від вмісту Mg, як повідомляють Лю та Чжу[12]. Фотоелектричні властивості легованих Sr магнетронових розпилених шарів ZnO вивчали Fageed та співавт. [13]. Було показано, що висота бар'єру в діодах ZnO / Pt Шотткі була знижена через таке легування ZnO. Більше того, коефіцієнт ідеальності діода був покращений. Крім того, легування викликало реакцію діодів у видимій області, хоча нелегована плівка ZnO у фотодіоді не показала належної реакції. Цей ефект був пов'язаний із зменшенням E_g за рахунок легування Sr.

Часто ZnO легують елементами групи IIIA, щоб отримати шар із модифікованими властивостями. Алюміній є найбільш відповідним для цієї

мети, оскільки атоми легуючого Al забезпечують підвищену концентрацію вільних електронів, що збільшує електропровідність[13]. Крім того, додавання алюмінію в ZnO (плівки AZO) змінює E_g . Напр. ZnO: Гетеропереходи Al / Si мають вищу швидкість перемикування та нижчий запас температури в порівнянні з типовими кремнієвими p-n або p-i-n-переходами. Якість гетеропереходу залежить від кількості та типу дефектів на межі розділу та в тонкій плівці. Іонна імплантація при наступних температурних обробках дозволяє змінити точкову концентрацію дефектів у плівці ZnO і отримати структури ZnO / Si з бажаними властивостями.

Тут будуть показані властивості переносу заряду, пов'язані з різними розпиленими магнетронами ZnO тонкоплівковою та інтерфейсною морфологіями, струмовольтними характеристиками та поверхневою фотонапругою та зроблені висновки про сприятливі умови осадження.

Різні плівки AZO товщиною від 10 до 140 нм готували на підкладках Si методом реактивного магнетронного напилення постійним струмом. Деякі з них були модифіковані за допомогою імплантації іонів Ar + (50 і 100 кеВ). Зразки відпалювали швидким термічним та пічним відпалом при температурах від 450 до 750 °C.

2. Методика досліджень

2.1. Методика дослідження "поверхневої фото-ЕРС" у напівпровідниках.

Фотопровідністю твердих тіл називають зміну провідності цих тіл під дією світла. Це явище зумовлене поглинанням фотонів, що спричинює збудження носіїв заряду з непровідного основного стану в стан з більш високою енергією, де вони стають вільними і дають внесок в електропровідність речовини. Фоторезистивним ефектом називають зміну електричного опору напівпровідника під дією випромінювання.

При внутрішньому фотоефекті первинним актом є поглинання фотона. Тому процес утворення вільних носіїв заряду буде відбуватися по-різному в залежності від особливостей процесу переходів має місце власна фотопровідність. Для напівпровідників з прямими зонами при вертикальних переходах енергія фотона $h\nu$ повинна бути не менша за ширину забороненої зони $h\nu \geq E_g$.

У випадку не прямих переходів, коли збереження квазіімпульса забезпечується за рахунок випромінювання фотона з енергією E_p , довгохвильовий край спектра фотопровідності буде лежати при

$$h\nu = E_g + E_p$$

Для сильно легованого напівпровідника n -типа, коли рівень Фермі розміщений вище дна зони провідності на величину ξ_n , довгохвильова границя спектра фотоструму буде відповідати $h\nu = E_g + \xi_n$

В сильно легованому напівпровіднику p -типа рівень Фермі лежить на величину ξ_p , нижче краю валентної зони, тому $h\nu = E_g + \xi_p$

Власна смуга поглинання, завжди мають чітко виражений довгохвильовий кордон, в принципі може мати також короткохвильовий. Однак у багатьох напівпровідників зона провідності перекривається вище розташованими дозволеними зонами, утворюючи суцільну зону. Тому спектральний розподіл фоточутливості в хвилі світла має сягати далеко в

короткохвильову область. Але зі збільшенням енергії фотонів збільшується коефіцієнт власного поглинання. А отже, буде мати місце і збільшення фотопровідності. І якщо квантова ефективність залишається незмінною, то при високих енергіях область поглинання і, отже, область генерації фотоносіїв розташовується поблизу поверхні напівпровідника.

У приповерхневої області напівпровідника час життя носіїв заряду менше, ніж в об'ємі зразка. Зміна часу життя нерівноважних носіїв заряду призведе до зменшення фотопровідності в області коротких довжин хвиль.

При наявності в забороненій зоні напівпровідника локальних рівнів оптичне поглинання може викликати переходи електронів між рівнями домішків і енергетичними зонами. В цьому випадку фотопровідність називають домішковою фотопровідністю.

Релаксація фотопровідності при малому освітленні визначається експоненціальним законом з постійної часу, відповідній часу життя нерівних носіїв заряду. Залежність стаціонарного фотоструму напівпровідника від інтенсивності світла повинна мати дві ділянки. При слабкій освітленості-лінійний, а при великій освітленості-сублінійний.

Якщо в напівпровіднику є центри захоплення, то вони впливають на кінетику фотопровідності. Вільні електрони будуть не тільки рекомбінувати з дірками, але будуть також захоплюватися центрами прилипання, що зменшить швидкість наростання стаціонарив концентрації носіїв заряду. При виключенні збудженого світла спустошення пасток буде затягувати спад концентрації носіїв заряду. В результаті цього буде мати місце зповільнення процесу нарощення і спаду фотопровідності.

Наявність поверхневої рекомбінації призводить до появи максимуму на кривій спектральної залежності фотопровідності.

Об'ємна ЕДС, виникаюча в освітленому напівпровіднику в наслідок різниці в коефіцієнтах дифузії електронів і дірок, отримала назву ЕДС Дембера.

ЕДС Дембера більша, чим сильніше відрізняються рухомість електронів і дірок.

Якщо напівпровідник, освітлений сильно поглиним світлом, помістити в магнітне поле, перпендикулярно напрямку дифузії носіїв заряду, то в ньому виникає поперечна ЕДС. Це явища називають фотоелектромагнітним ефектом.

Напруженість фотоелектромагнітного ефекту прямопропорційна індукції магнітного поля і залежить від концентрації нерівноважних носіїв заряду на протилежних носіях зразка.

2.2. Ознайомлення з методикою дослідження "XPS (x-ray photoemission spectroscopy)"

Метод РФЕС заснований на вимірюванні енергії фотоелектронів, вибитих з різних рівнів атомів досліджуваної речовини збудливим потоком рентгенівських променів. Під дією кванту випромінювання електрони вибиваються з речовини, а енергія рентгенівського кванта, згідно із законом збереження енергії, витрачається на енергію іонізації та віддачу виділеного електрону кінетичну енергію $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Процес фотоелектронної емісії описується рівнянням:

$$h\nu = E_b + E_k + \phi$$

де E_b - енергія зв'язку фотоелектрона, енергія зв'язку визначається як енергія, необхідна для видалення фотоелектрона до нескінченності з нульовою кінетичною енергією. Для твердих речовин для рівня відліку використовують рівень Фермі; E_k - кінетична енергія електрона, який пролетів після фотоефекту; ϕ - "вихідна робота", узагальнений термін, точне значення якого залежить від зразка та спектрометра. Найчастіше ϕ означає роботу спектра вітру.

Рівняння передбачає, що фотоелектронне випромінювання є наслідком процесу пружної взаємодії. Джерелом фотонів служать ультрафіолетові лампи, рентгенівські промені, синхротронне випромінювання (СВ).

Спектр випромінюваних фотоелектронів для шкали кінетичної енергії копіює розподіл енергії електронів у твердому тілі. Кожен хімічний продукт - це значущий внутрішній електронний рівень, тому спектр фотоелектронів, таким чином, відображає елементи складу речовини.

Експериментально спостережувані рентгенівські фотоелектронні спектри (РФЕ-спектри) - це згортка розподілу енергії фотона, електронна структура початкового та кінцевого станів зразка, ефекти, що подовжують час життя іона після фотоіонізації, структура втрати енергії електронів при виході з твердого тіла, а також апаратурної функції спектрометра.

Спектр обстеження демонструє наявність спектрального фону. Це визначається непружними втратами вторинних електронів як первинних, так і оже-електронів під час їх руху в твердому тілі. Не загублені електрони дають інтенсивні спектральні піки, положення максимумів яких визначає енергію зв'язку орбіталей, які втратили електрон. Електрони, які втратили частину своєї кінетичної енергії під час непружного розсіювання, вносять свій внесок у спектральний фон із нижчих енергій (тобто високих енергій зв'язку). Тому після кожного піку фон поступово збільшується. Спектральні лінії поділяються на лінії основних рівнів з енергіями зв'язку ~ 20 еВ, лінії валентних рівнів з енергіями зв'язку $0 - 10$ еВ, оже-електронні лінії, збуджувані первинними рентгенівськими променями. Ці лінії визначають первинну структуру рентгенівських спектрів.

Можливості методу РФЕС широкі - від базових досліджень до лабораторних досліджень. Спосіб придатний для дослідження поверхні органічних, неорганічних матеріалів, вивчення каталізу, вивчення корозії. РФЕС використовується для вивчення процесів адгезії, реакцій на поверхні

полімерів, утворення та зростання оксидних плівок на поверхні, адсорбції газу, сегрегації на кордонах зерен, використовується для вивчення профілів розподілу елементів за глибиною з використанням іонне травлення.

2.3. Зразки

В роботі досліджувалась серія зразків із характеристиками, поданими в Табл. 1.

Таблиця 1. Параметри досліджуваних зразків ZnO/Si

| Зразок № | Товщина плівки, нм | Густина плівки г/см^3 | Шорсткість межі поділу ZnO/Si, виміряна методом рентгенівської дифракції, нм | Шорсткість поверхні ZnO, виміряна методом рентгенівської дифракції, нм |
|----------|--------------------|--------------------------------|--|--|
| 1 | 10.2 | 5.9 | 0.4 | 0.54 |
| 2 | 20.8 | 5.62 | 0.34 | 0.52 |
| 3 | 41.6 | 5.59 | 0.02 | 0.51 |
| 4 | 65.8 | 5.60 | 0.05 | 0.6 |

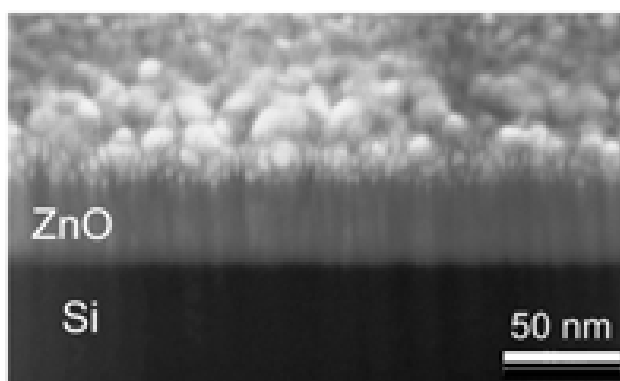


Рис. 2.1. Електронномікроскопічне зображення перерізу зразку ZnO/Si №4

Мас-спектрометричні дослідження, наведені на рис. 2.2, показують, що на межі поділу фаз утворюється надтонкий шар оксидної плівки SiO_2 , що має товщину близько 2 нм, що означає, що в зразках утворюється межа

розділення AZO / SiO₂ / Si. На рис. 2.2 також видно, що домішок Al однорідно розподілений по товщині плівки.

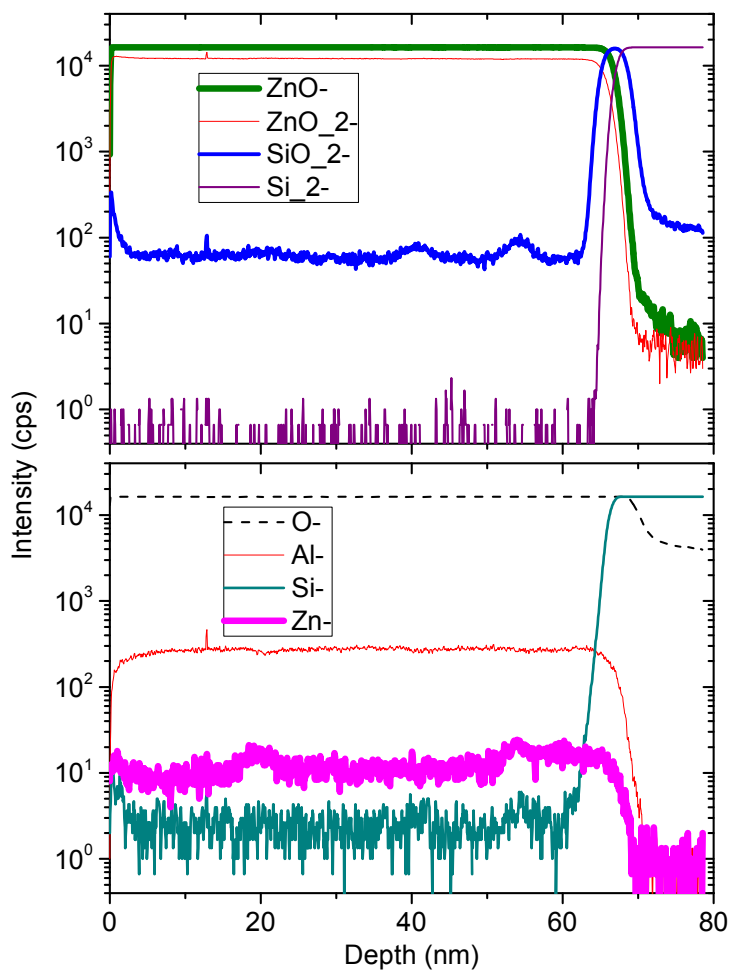


Рис. 2.2. Розподіл елементів всередині плівки ZnO зразку ZnO/Si №4, зареєстрований методом SIMS.

3. Результати та їх обговорення

Поверхнева фотоелектрична напруга (SPV) утворюється шляхом розділення нерівноважних носіїв у приповерхневій області зразка [3.1]. Зокрема, поділ існує в областях просторового заряду, що відбуваються на поверхнях зразків або на кордонах зерен та меж розділів. Величина та напрямок вигину відповідної смуги в цих регіонах визначають величину та знак сигналу SPV, що формується при світловому освітленні. Сам вигин смуги залежить від концентрації та типу дефектів на поверхні та ділянках розділу. Ці концентрація та тип також визначають швидкість генерації та рекомбінації нерівноважних вільних зарядів.

У нашому випадку з гетероструктурами ZnO / SiO₂ / Si амплітуда і час затухання SPV після вимкнення світла, як правило, можуть бути пов'язані з різним вмістом дефектів у плівках ZnO та у вузькій підземній області підкладки Si. Отже, характеристики SPV залежать від методу нанесення та товщини шару ZnO. Крім того, вимірювання SPV може бути цікавим для поліпшення фотоелектричних властивостей гетероструктур ZnO / SiO₂ / Si та NiO / ZnO / Si.

Змінюючи довжину світлової хвилі, можна змінювати глибину проникнення світла в напівпровідникову структуру, таким чином, відповідно змінюючи глибину генерації носіїв, що охоплює області з'єднання гетероструктур. Це особливо вірно у випадку малої ширини імпульсу освітлюючого світла, коли ширина залишається набагато меншою, ніж час життя носія. В іншому випадку, якщо світловий імпульс має порядок або більший за час життя нерівноважних носіїв, тоді носії з товстого підповерхневого шару порівняно з їх дифузійною довжиною вносять свій внесок у сигнал SPV, навіть для сильно поглиненого світла [3.2].

Взявши ширину зазору $E_g = 3,2\text{--}3,3$ eV у ZnO [3,3] та $E_g = 1,12$ eV у підкладці Si [3,4], отримуємо, що збуджуюче світло з $\lambda > 375$ nm відповідає E_g

ZnO [3,3]. Отже, сигнал SPV, генерований видимим світлом, формується лише вільними носіями, збудженими в підкладці Si. Для світла з довжиною хвилі менше ~ 375 нм сигнал надходитиме від нерівноважних носіїв, що генеруються як у плівці ZnO, так і в підкладці Si. Власне кажучи, для обох умов збудження слід враховувати дифузію і дрейф носія з підкладки Si у плівку ZnO та у зворотному напрямку.

Криві розпаду SPV, взяті в різних зразках ZnO-on-Si, показані на рис. 3.1. Зразки збуджуються світловими імпульсами тривалістю 1 мкс з трьома різними довжинами хвиль $\lambda = 405$ нм, 470 нм та 860 нм. За цих умов нерівноважні носії заряду генеруються лише в підкладці Si на глибинах $1 / \alpha \approx 98$ нм, 312 нм та 21 мкм відповідно, де α - коефіцієнт поглинання світла в Si для зазначених трьох довжин хвиль збудження. Негативні сигнали SPV були експериментально виявлені у використаних схемах схем, і для зручності тут, на рис. 3.1, а також у тексті, що далі, криві спаду SPV інвертовані.

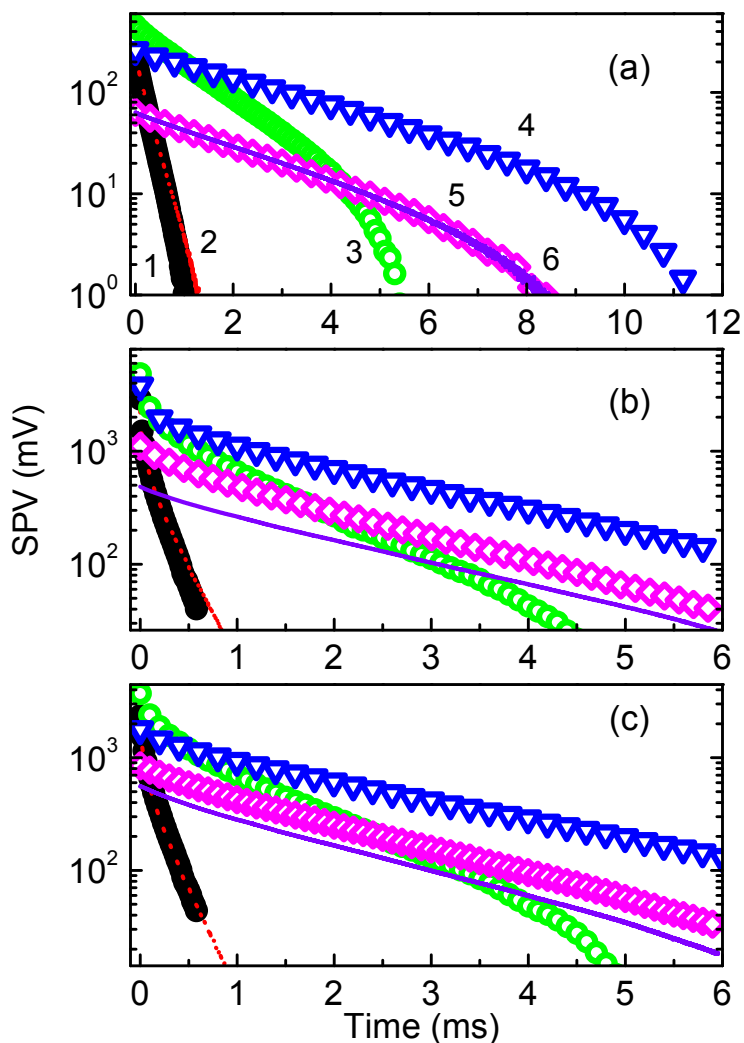


Рис. 3.1. Криві загасання сигналу фото-ЕРС зразків ZnO/Si, збудженої світлодіодами з довжинами хвиль $\lambda=405$ нм (а), 470 нм (b) та 860 нм (с). Довжина мсвітлового імпульсу = 1 мкс. Товщина плівки ZnO = 11 (крива 1), 22 (2), 43 (3), 67 (4), 70 (5) та 120 нм (6).

Це можна побачити у Рис. 3.1, незалежно від довжини хвилі збуджуючого світла, швидкість розпаду SPV монотонно зменшується зі збільшенням товщини ZnO з 11 нм до 67 нм. При подальшому збільшенні товщини до 120 нм швидкість затухання сигналу SPV залишається майже незмінною. У той же час, коли товщина збільшується з 11 нм до 43 нм, значення амплітуди SPV спочатку збільшується монотонно, а потім починає зменшуватися для більшої товщини (до 120 нм).

Якщо ті самі зразки збуджуються світловими імпульсами тривалістю 10 нс від азотного лазера ($\lambda = 337,1$ нм), криві розпаду показані на Рис. 3.2 спостерігаються. В цих умовах збудження генеруються нерівноважні носії заряду як у плівці ZnO, так і в підкладці Si глибиною $1 / \lambda \approx 9$ нм [56]. Можна виявити, що в цьому випадку криві розпаду описуються біекспоненціальним законом. Відповідні постійні часу як першої, так і другої складових зростають із збільшенням товщини ZnO з 11 нм до 120 нм (Рис. 3.3а). На відміну від них, величина сигналу SPV спочатку трохи збільшується при товщинах плівки, що варіюється від 11 нм до 67 нм, а потім різко зменшується при товщинах, більших ≈ 70 нм; див. Рис. 3.3b.

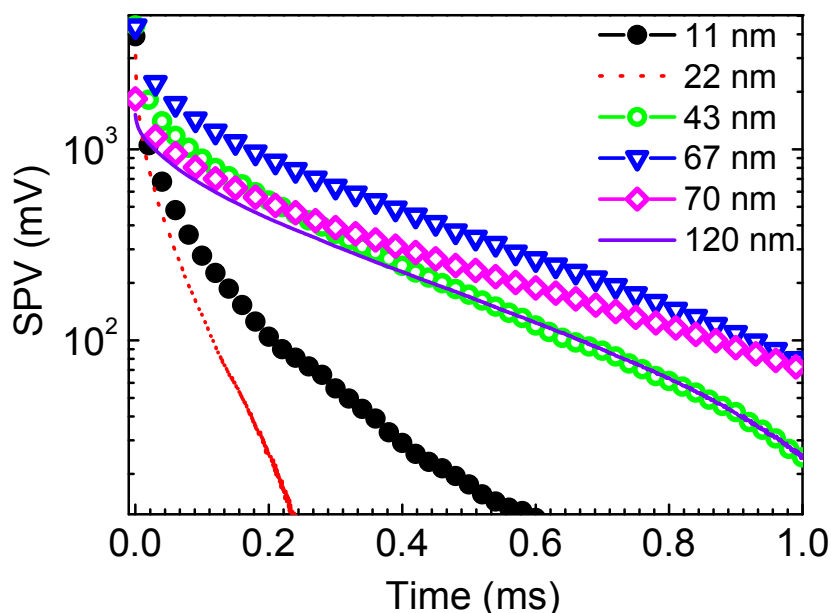


Рис. 3.2. Криві загасання сигналу фото-ЕРС зразків ZnO/Si із різною товщиною плівки ZnO, збудженої світлом азотного лазера із $\lambda=337.1$ нм.

Довжина світлового імпульсу = 10 нс.

Ці результати SPV можна пояснити наступним чином, беручи до уваги зміну морфології плівки з її товщиною. Таким чином, розмір нанозерен та нанокolon може варіюватись приблизно від 10 до 60 нм для товщини

плівки ≤ 67 нм, поки щільний консолідований шар не утворюється в діапазоні приблизно від 65 до 120 нм.

Відповідно до цих спостережень, збільшені значення амплітуди SPV виявляються насамперед завдяки більшому просторовому розділенню фотогенерованих носіїв у більших зернах. Крім того, спостережуване розширення розподілу амплітуди SPV можна пояснити супутньо більшою дисперсією розмірів зерен. Здається, що в діапазоні товщини приблизно від 65 до 120 нм, коли виникає щільний консолідований шар, амплітуда SPV зменшується. Більше того, спостережуване збільшення τ , швидше за все, пов'язане з тим, що збільшення розміру зерна та щільності зерна впливає на склад та концентрацію рекомбінаційно-активних дефектів на кордонах зерен. Нарешті, захоплення носіїв на глибоких рівнях та на поверхні зерна або станах розділу може стати домінуючим над швидкими процесами рекомбінації носіїв, що також збільшує τ .

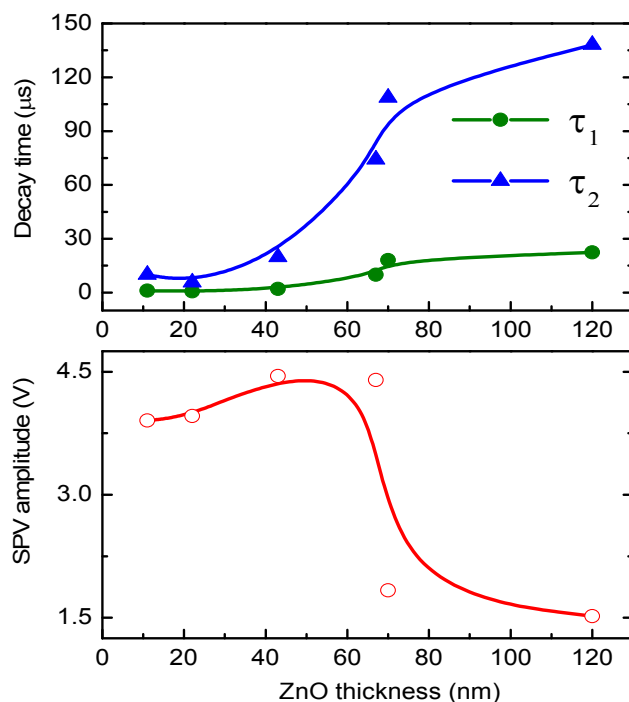


Рис. 3.3. Час загасання (а) та амплітуда (б) сигналу фото-ЕРС зразків ZnO/Si в залежності від товщини плівки ZnO. Фотозбудження - азотний лазер із $\lambda=337.1$ нм та довжиною світлового імпульсу 10 нс..

ВИСНОВКИ

1. Нанесені плівки ZnO товщиною менше ~ 70 нм мають приблизно в 3 рази більшу величину фотоелектричної напруги порівняно з плівками, що мають більшу товщину, і це збігається з мікроструктурною еволюцією плівки.

2. Відповідно сповільнюється розпад SPV, демонструючи час затухання порядку 10 нс при малій товщині плівки та 100 нс при перевищенні ≈ 70 нм.

3. Ці результати можна інтерпретувати з точки зору центрів рекомбінації та захоплення носіїв у плівці та на межі ZnO / Si, концентрація яких змінюється залежно від товщини плівки.

Списки використаних джерел

1. S.J. Pearton, D.P. Norton, K. Ip, Y.W. Heo, and T. Steiner, Recent progress in processing and properties of ZnO, *Prog. Materials science*, v. 50 (3), p. 293-340 (2005).
2. Z. Bedia, A. Bedia, D. Kherbouche, and B. Benyoucef, Electrical properties of ZnO/p-Si heterojunction for solar cell application. *Intern. Journal of Materials Engineering* 3, 59–65 (2013).
3. X. Li, R. Shen, B. Zhang, X. Dong, B. Chen, H. Zhong, L. Cheng, J. Sun, and G. Du, Nitrogen doped ZnO thin films prepared by photo-assisted metalorganic chemical vapor deposition. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 11, 9741–9744 (2011).
4. N. M. Roshchina, P. S. Smertenko, V. G. Stepanov, L. V. Zavyalova, and O. S. Lytvyn, Some properties of thin film structures on the base of ZnO obtained by MOCVD method. *Solid State Phenom.* 256, 228–236 (2013).
5. G. Chatel and D. R. Macfarlane, Ionic liquids and ultrasound in combination: synergies and challenges. *Chem. Soc. Rev.* 43, 8132–8149 (2014).
6. M. Hosni, S. Farhat, F. Schoenstein, F. Karmous, N. Jouini, B. Viana, and A. Mgaidi, Ultrasound assisted synthesis of nanocrystalline zinc oxide: Experiments and modeling. *J. Alloy. Compd.* 615, S472–S475 (2014).
7. M. I. Zakirov and O. A. Korotchenkov, Carrier recombination in sonochemically synthesized ZnO powders. *Mater. Sci.-Poland.* 35, 211–216 (2017).
8. M. I. Zakirov, V. V. Kuryliuk, and O. A. Korotchenkov, Optical properties of ZnO fabricated by hydrothermal and sonochemical synthesis. *J. Phys. Conf. Ser.* 741, 012028 (2016).
9. P. F. Ji, Y. Li, F. Q. Zhou, Y. L. Song, and H. C. Huang, Fabrication and electroluminescence of sheet-like ZnO/Si light-emitting diodes by radio frequency magnetron sputtering method. *Mater. Lett.* In Press, doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127028 (2019).
10. R. M. Nagabharana, N. Kiran, P. Guha, B. Sundaravel, and U. M. Bhatta, Structural characterization of magnetron sputtered ZnO thin films on Si(100) using RBS, scanning and high resolution transmission electron microscopy methods. *Surf. Interfaces* 15, 239–243 (2019).

11. Y. Wang, J. Song, J. Zhang, G. Zheng, X. Duan, X. Xie, B. Han, X. Meng, F. Yang, G. Wang, Y. Zhao, and J. Li, Effect of substrate temperature on F and Al co-doped ZnO films deposited by radio frequency magnetron sputtering. *Solar Energy* 194, 471–477 (2019).
12. Y. Liu and S. Zhu, Preparation and characterization of Mg, Al and Ga co-doped ZnO transparent conductive films deposited by magnetron sputtering. *Results Phys.* 14, 102514 (2019).
13. H.-K. Kim, K.-B. Chung, and J. Kal, Comparison of ZnO buffer layers prepared by spin coating or RF magnetron sputtering for application in inverted organic solar cells. *J. Alloys Compounds* 778, 487–495 (2019).
14. S. Fareed, A. Jamil, N. Tiwari, and M. A. Rafiq, Influence of Cr doping on Schottky barrier height and visible light detection of ZnO thin films deposited by magnetron sputtering. *Micro Nano Eng.* 2, 48–52 (2019).
15. K. Ellmer and A. Bikowski, Intrinsic and extrinsic doping of ZnO and ZnO alloys. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, 413002 (2016).
- 16.[3.1] L. Kronik, Y. Shapira, Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications, *Surf. Sci. Rep.* 37, 1–206 (1999).
- 17.[3.2] K. L. Luke and L. J. Cheng, Analysis of the interaction of a laser pulse with a silicon wafer: Determination of bulk lifetime and surface recombination velocity. *J. Appl. Phys.* 61, 2282–2293 (1987).
- 18.[3.3] X.C.Wang, X.M.Chen, B.H.Yang, Microstructure and optical properties of polycrystalline ZnO films sputtered under different oxygen flow rates, *J. Alloys Compd.* 488, 232–237 (2009).
- 19.[3.4] D. F. Edwards. Silicon (in *Handbook of Optical Constants of Solids*, edited by E. D. Palik, Academic, San Diego, 1998) p.547–569.
- 20.1. В. В. ЗАГОРОДНІЙ “ЛОКАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ”
21. О.О. Коротченко, О.Я. Оліх, І.В. Островський “ ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ”
22. Francisco Javier Aparicio Rebollo “XPS: X-Ray Photoemission Spectroscopy”
23. К.В.Шалимова “ФІЗИКА ПОЛУПРОВІДНИКОВ”, 1985. — 392 с., ил

24. Л.Е. Воробьев, С.Н. Данилов, Г.Г. Зегря, Д.А. Форсов, В.А. Шилыгин, И.Н. Ясиевич, Е.В. Берегулин “Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантованных структурах”.