

## РОЗДІЛ 1

### ПЕРЕДУМОВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА

#### 1.1. Ефекти впливу ультразвуку на мікроелектронні структури та матеріали

Загальновідомо, що поширення акустичних хвиль (АХ) у кристалічних тілах зумовлене вимушеним коливальним рухом атомів. Явища, які супроводжують подібні процеси, знаходять своє застосування у багатьох прикладних сферах, включаючи і мікроелектроніку. В останньому випадку найяскравішим прикладом є акустoeлектроніка — галузь, що базується на використанні взаємодії акустичних та електричних сигналів у п'єзоелектричних середовищах. Проте у цьому підрозділі класичний ефект акустoeлектронної взаємодії у об'ємних кристалах залишиться поза увагою і буде розглянуто, переважно, дещо інший аспект використання ультразвуку, зумовлений, насамперед, можливістю акустоіндукованої (АІ) перебудови дефектної підсистеми напівпровідників.

Дефекти, як відомо, є визначальними для властивостей як самих кристалів, так і приладів на їхній основі. У літературі вже достатньо давно використовується термін «інженерія дефектів», який передбачає нерівноважну модифікацію дефектно-домішкової підсистеми з метою отримання нових властивостей кристала, структури чи приладу шляхом формування «потрібних» активних центрів чи нанокластерів [55]. Безумовно, найбільш поширені та вивчені методи цього технологічного напрямку пов'язані з

- а) використанням висотемпературних обробок (відпалів), різноманітних за тривалістю, атмосферою та іншими умовами проведення;
- б) опромінення частинками різної природи (високоенергетичними фотонами, електронами, нейтронами, іонами) та енергії;
- в) вибором режиму (температури, швидкості, атомарного складу сировини тощо) вирощування кристалу.

Проте акустичні коливання ультразвукового діапазону є також перспективним та ефективним засобом активного впливу на властивості напівпровідників. Насамперед про це свідчить накопичений достатньо широкий експериментальний матеріал. Надалі у підрозділі розглянуті літературні дані, які стосуються змін властивостей внаслідок ультразвукових обробок (УЗО), ефекти, які виникають у напівпровідниках під час поширення пружних коливань, а також можливість застосування ультразвука (УЗ) під час виготовлення пристроїв та для оцінки дефектної підсистеми.

### **1.1.1. Результати застосування ультразвукових обробок**

Насамперед зупинимось на зміні властивостей напівпровідникових кристалів та пристроїв на їхній основі в результаті тривалого ( $10^3 \div 10^4$  с) збудження в кристалах АХ значної (зазвичай не менше  $1 \text{ Вт/см}^2$ ) інтенсивності. Характерною особливістю подібних експериментів є те, що визначення параметрів відбувається після припинення дії пружних коливань.

Різноманітні АІ ефекти спостерігалися як у кристалах напівпровідникових сполук, так і в ковалентних кристалах, матриця яких складається з атомів одного сорту. Зміни властивостей у першому випадку нерідко зумовлені рухом і розмноженням дислокацій в акустичному полі. Зокрема, перерозподіл дислокацій зміню пружних модулів GaP та GaAs [56]. УЗО також може стимулювати дифузію різноманітних дефектів при температурах, близьких до кімнатних, що зумовлено АІ зменшенням енергії активації чи надбар'єрним рухом дефектів у полі пружних напруг [57]. Так, у роботі [58] показано, що завдяки підсиленню дифузії водню в акустичному полі відбувається покращення пасивації дефектів на границях зерен [58] та підсилення фотолюмінесценції [59, 60] у полікристалічному кремнії. Проте частіше акустодифузія є причиною зміни властивостей поверхні: прикладами можуть бути зміни коефіцієнта відбиття Si та GaAs [61], зменшення густини поверхневих станів [62] та зростання адгезійної здатності [63] Si внаслідок дифузії домішок від поверхні напівпровідника. Зауважимо, що напрям акусто-стимульованого руху може бути і протилежним: у роботі [64] спостерігалось переміщення атомів калію та натрію до поверхні кремнію. Серед інших

виявлених АІ змін властивостей поверхні можна виокремити зміцнення поверхневого шару кремнію через утворення точкових дефектів типу вакансійних та вакансійно-домішкових кластерів [65], або викликану генерацією дефектів зміну енергетичного спектра поверхневих станів Si [62].

Нерідко виявлені АІ зміни параметрів пов'язані із рухом легуючих домішок до стоків, у ролі яких виступають дислокації. Подібне переміщення акцепторів у кристалах CdTe вважається причиною послаблення інтенсивності як домішкової, так і екситонної люмінесценції [66], а безактиваційний рух мілких донорів у CdS — зменшення фото- та термостимульованого струмів [67–69]. У кубічних кристалах  $Zn_xCd_{1-x}Te$  УЗО викликає зміни величини провідності (як темної, так і фото-) та інтенсивності фотолюмінесценції [70]. Автори вважають, що для малодислокаційних кристалів ці явища зумовлені збільшенням кількості дислокацій та стіканням на них рухливих акцепторів; при високій концентрації лінійних дефектів відбувається відхід акцепторів у об'єм.

Ряд виявлених ефектів дослідники пов'язують з перебудовою точкових дефектів внаслідок УЗО. Наприклад, саме таке пояснення запропоновано для акусто-індукованих підсилення фотолюмінесценції поруватого кремнію [71], змін фотопровідності [72], фоточутливості та випромінювальної рекомбінації [73] кристалів ZnSe, домішкового поглинання [74] та спектра фотопровідності [75] арсеніду галію, спектра фотолюмінесценції та коефіцієнта відбиття фулеренових плівок [76]. Крім того, чимало досліджень присвячено впливу УЗО безпосередньо на точкові дефекти. Наприклад, виявлено перебудови власних дефектів у GaAs [77–79] та Si [80], розпад домішкових пар в кремнії [81–83].

Певну окрему групу утворюють результати, отримані при УЗО кристалів  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (надалі — КРТ). У цьому випадку суттєву роль в АІ змінах електрофізичних параметрів відіграють коливання сітки малокутових меж субблоків [84, 85]. Зокрема, при невисоких інтенсивностях АХ вони стають причиною гетерування електрично активних дефектів та відповідного збільшення рухливості та часу життя носіїв [86, 87], зміни ступеня компенсації та зниження шуму [88]. Особливістю твердих розчинів КРТ також є те, що АІ ефекти мають яскраво виражений резонансний характер при наближенні частоти АХ до частоти коливань малокутових меж [84–86, 88]. При надпорогових інтенсивностях УЗ в

$n$ -КРТ переважають процеси генерації електричноактивних дефектів, що викликає зменшення концентрації та рухливості вільних електронів [84, 86]. В епітаксійних структурах, вирощених на основі КРТ, виявлено АІ ефекти зміни типу провідності, появи негативного диференційного опору, підвищення фоточутливості, модифікації спектра фотопровідності [89, 90].

У гетероструктурах УЗО нерідко викликає релаксацію внутрішніх механічних напруг. Подібні ефекти спостерігалися в системах Ge–GaAs [91, 92] та Si–SiO<sub>2</sub> [93]. Крім того, відбувається АІ модифікація електрофізичних параметрів. Наприклад, у системах на основі кремнію УЗО викликає зміну часу життя неосновних носіїв у приконтатній області напівпровідника внаслідок трансформації генераційно–рекомбінаційних центрів [93, 94]; зменшення швидкості поверхневої рекомбінації внаслідок перебудови напружених валентних зв'язків [94, 95]; підвищення яскравості електролюмінесценції систем Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnS–SiO<sub>2</sub>, викликане дифузією домішкових центрів [96]. Про АІ зміну дефектного стану межі Si–SiO<sub>2</sub> повідомляється в роботах [97, 98].

УЗО може бути причиною зміни властивостей бар'єрних напівпровідникових пристроїв. Наприклад, із літератури відомо, що подібна обробка викликає покращення фотоелектричних параметрів AlGaAs/GaAs [99] та CuInSe<sub>2</sub> [100] сонячних елементів у результаті перерозподілу домішкових атомів, відпалу рекомбінаційних центрів та розпаду домішкових скупчень; зменшення концентрації носіїв заряду [101] та зростання фактора неідеальності [102] внаслідок зміни енергетичного спектра дефектів у кремнієвих  $p$ – $n$ –структурах; зміну тунельної складової струму в InAs  $p$ – $n$ –переходах [103], немонотонне зменшення світності GaAsP світловипромінюючих діодів внаслідок захоплення дислокаціями невивипромінюючих центрів (при малих часах обробки) чи акустогенерації дефектів (при тривалих навантаженнях) [104]. У фотодіодах  $p$ –Si/ $n$ –CdS/ $n^+$ –CdS спостерігається АІ зменшення густини поверхневих станів на інтерфейсній межі, що призводить до змін вольт–амперних характеристик та підвищення фоточутливості [105, 106]. Не залишилися поза увагою дослідників і структури з контактом Шотткі. Виявлено, що УЗО викликає деградацію фотоелектричних властивостей структур  $(a$ –PbSb)– $n$ –Si [107, 108], зменшує величини зворотного струму кремнієвих [109] та арсенід–галієвих [110] систем, підсилює та змінює

спектр фотолюмінісценції підкладок та приконтактних областей структур метал—GaAs [110]. В останньому випадку причиною вважається впорядкування дислокаційної структури, викликане потоком вакансій [110].

Зауважимо, що УЗО впливає не лише на ростові чи технологічні дефекти, але й викликає відпал порушень періодичності радіаційного походження внаслідок їхнього розпаду, перебудови та дифузії до стоків. Повне чи, що частіше, часткове відновлення радіаційно—деградованих властивостей спостерігалось у кристалах Si [111–114], Ge [115], InP [116], CsI [117], структурах Si—SiO<sub>2</sub> [118, 119], кремнієвих сонячних елементах [120],  $\alpha$ —NiTi—*n*—Si діодах Шотткі [121], GaAsP світловипромінюючих діодах [104, 122].

Зміни властивостей, викликані УЗО, не завжди є стабільними. Наприклад, кристали з AI зміною провідності та CuInSe<sub>2</sub> сонячні елементи відновлюють свої попередні властивості після зберігання при кімнатній температурі протягом декількох діб [67, 70, 100, 114], комплексоутворення зруйнованих під дією УЗО домішкових пар чи перебудованих радіаційних дефектів відбувається протягом десятків хвилин [81, 82, 114], характерний час відновлення параметрів InAs *p*—*n*—переходів — декілька місяців [103].

Наведені результати свідчать, що можливості ультразвукової «інженерії дефектів» охоплюють широкий спектр напівпровідникових матеріалів та їхніх властивостей. Отримані за допомогою УЗО результати нерідко можна продублювати з використанням більш технологічно звичних методів на кшталт відпалу чи радіаційного опромінення. Проте необхідно зауважити, що використання УЗ має переваги, зумовлені локалізацією впливу: наприклад, ступінь релаксації внутрішніх напруг при УЗО глибший, ніж при опроміненні [92], а акустичний відпал радіаційних дефектів [113, 117, 120] відбувається при температурах, недостатніх для підсилення дифузії легуючих домішок, а отже і розмиття профіля легування, який може супроводжувати процес звичайного термовідпалу.

Водночас значна тривалість та висока інтенсивність УЗО не завжди є доречними з технологічного погляду. На думку автора, перспективнішим для практичного застосування є використання УЗ не як основного інструменту модифікації, а як додаткового фактора впливу під час класичних технологічних операцій. За таких умов напівпровідникові структури зазвичай опиняються у

нерівноважному стані та їхня дефектно–домішкова підсистема здатна легше модифікуватися під дією пружних коливань. Тобто йде мова про те, що УЗ виконуватиме лише керуючу роль, в той час як переважні енергетичні затрати лягають на плечі радіаційної чи термічної обробок. Застосування АХ меншої інтенсивності дозволить підвищити локалізованість впливу саме на дефектах.

Чи не найяскравішим експериментальним доказом даного припущення є результати, отримані при використанні УЗ одночасно з іонною імплантацією, яка мала на меті легування або формування аморфного чи діелектричного шарів [123–131]. Зокрема показано, що при пошмренні АХ підсилюється процес аморфізації поверхневого шару кремнію [124, 128], відбувається зменшення механічних напруг біля внутрішніх меж [125, 130] та концентрації дефектів міжвузлового типу в області збіднення  $p$ – $n$ –переходів [129], створюються умови для формування ультра–мільких переходів [131], покращуються властивості та зменшується товщина шару WO на поверхні  $p$ –Si [126, 127].

АХ можуть використовуватися не лише під час опромінення, але й бути частиною будь–якої обробки, пов’язаної зі зміною дефектної підсистеми. Наприклад, застосування УЗ паралельно з лазерною обробкою систем Fe–Si–C викликає суттєве (в 2–3 рази) зменшення залишкового аустеніту [132]; а УЗО під час виготовлення поруватого кремнію, люмінофорів на основі ZnS чи осаджені ZnO призводить до структурного впорядкування [133], змін фото– та електролюмінесценції [134] чи підвищення однорідності плівок [135], відповідно.

Збудження УЗ під час опромінення кристалів може бути фактором підвищення радіаційної стійкості напівпровідників завдяки а) підвищенню швидкості рекомбінації (акустовідпалу) первинних радіаційних дефектів (РД); б) створенню електрично та рекомбінаційно неактивних вторинних РД внаслідок реакцій між первинними РД та домішками, так як процеси дифузії та перебудови РД також є акустоактивованими [114, 118]. Крім того, ще одним позитивним фактором впливу АХ може бути стимуляція переведення занурених радіаційним чином домішок у положення, що відповідає електричноактивному стану — наприклад, іонів–легантів у вузлове положення.

Йонна імплантація використовується і для формування різноманітних кластерів у твердотільних матрицях. У цьому випадку УЗ також може бути

додатковим позитивним фактором впливу, про що свідчать результати робіт [136–139]. Наприклад, показано, що наявність УЗ викликає збільшення розмірів занурених металевих кластерів у кремнії [136] та оксиді кремнію [137], зміни парамагнітних [138] та фотолюмінесцентних [139] властивостей нанокластерів Si в SiO<sub>2</sub>. Зауважимо, що акустичні коливання активно використовуються не лише під час створення наночастинок у кристалічній матриці. Достатньо широко застосовується УЗ під час хімічного синтезу різноманітних (CdS, ZnO, CdSe, Au, Cu, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiS) наночастинок у розчинах (див., наприклад, роботи [140–145] та посилення в них), що дозволяє покращити якість кінцевого виробу (зменшити розміри частинок, підвищити їхню поруватість тощо). Теоретично та експериментально досліджується можливість самоорганізації наночастинок, зокрема вуглецевих, безпосередньо в акустичному полі [146, 147].

### 1.1.2. Динамічні акусто–індуковані ефекти

Іншим перспективним напрямом досліджень є пошук можливості використання ефектів, які спостерігаються у напівпровідникових системах лише за умов поширення в них пружних коливань. Зокрема, такий підхід може бути розглянутий в рамках функціональної електроніки — галузі, яка використовує для управління інформаційним сигналом неоднорідності середовища, що виникають під дією керуючого сигналу. Роль керуючого сигналу має виконувати АХ, динамічно змінюючи стан дефектів і, таким чином, уможливлуючи створення акусто–керованих пристроїв. Наприклад, для створення генератора або підсилювача використовуються транзистори, резистори, конденсатори. При використанні інтегральної схемотехніки всі ці елементи реалізуються на базі напівпровідників. Зміна провідності кристалу, і, відповідно, номіналу елементу (у найпростішому випадку — опору резистора) під дією УЗ має викликати керувану (напр., інтенсивністю чи частотою АХ) перебудову робочої частоти пристрою.

Принципову можливість реалізації подібного підходу підтверджують, зокрема, результати спостереження оборотного збільшення електропровідності у Si [148], кристалах CdTe:Cl [149, 150] та KPT [151, 152] під час поширення

УЗ. Зміни концентрації та рухливості носіїв пов'язують із АІ збільшенням ефективного радіуса дислокаційних кластерів та дифузійною перебудовою хмари Котрела [149, 150], зі звільненням зв'язаних дефектів донорного типу та сгладжування розсіюючого потенціалу [151, 152] чи з перебудовою метастабільних дефектів [148]. Зміною стану бістабільного центру Fe–В під час ультразвукового навантаження (УЗН) пояснюються динамічні зміни довжини вільного пробігу електронів у кристалах кремнію авторами робіт [153, 154]. У кремнії також виявлено підсилення емісії електронів із донорних домішок, зумовлене їхнім зміщенням відносно оточення [155]. Зауважимо, АІ зміни стану окремих точкових дефектів є перспективними і з погляду створення запам'ятовуючих пристроїв. Відомо [156], що бістабільний дефект є перспективним елементом пам'яті нового покоління, дві конфігурації якого відповідають логічним «0» та «1». У такому випадку УЗ може виступати інструментом перемикавання подібного елемента. Зокрема, гітотетичний механізм переведення дефекту з одного стану в інший може бути наступним: при поширенні АХ дефект зміщується відносно оточення, що викликає зміну його симетрії; в свою чергу, це може стати причиною перезарядки центру, наприклад внаслідок ефекту Яна–Теллера. Нерідко у різних зарядових станах мінімальній енергії відповідають різні просторові конфігурації, що і дозволяє зафіксувати новий логічний стан. Окрім вже згаданих ефектів динамічної конфігураційної перебудови комплексів у кремнії, на користь можливості такого механізму свідчить виявлена АІ трансформація DX–центру в плівках  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [157]. Звичайно, подібний підхід вимагає вирішення задачі локалізації УЗ впливу на окремому дефекті.

При розгляді динамічних ефектів необхідно також врахувати можливість оборотного впливу УЗ на процеси поширення нерівноважних носіїв, чия поява зумовлена інжекцією або фотогенерацією. Механізмом впливу для подібного випадку може бути АІ перебудова (та/або перезарядка) центрів рекомбінації (прилипання), що змінює переріз захоплення та час життя носіїв. Наприклад, експериментальне дослідження впливу УЗ на нерівноважні носії у арсенід–галієвих фотоприймачах та гетероструктурах GaAs/AlGaAs проведено в роботах [158, 159]. Основною причиною виявлених ефектів є електричне поле, супроводжує пружні коливання у п'єзоелектриках. За умов УЗН у гетероструктурах



SiGe/Si спостерігалися ефекти підвищення фотонапруги та зміни часової залежності її релаксації [153, 160], у світловипромінюючих GaP діодах — зменшення інтенсивності світіння [161]. Процеси зумовлені акусто–дислокаційною взаємодією: у першому випадку її результатом є вихід домішок чи інших дефектів із котрелівської хмари, що викликає утворення ефективних рекомбінаційних центрів; у другому — виникають нерівноважні дислокаційні скупчення та відбувається руйнування екситонів внаслідок вимушених коливань лінійних дефектів.

Яскравим прикладом динамічного акусто–індукованого ефекту є явище акустолюмінесценції, тобто виникнення світіння в об’ємі кристалів чи в приграничній області при розповсюдженні ультразвуку. Причиною його появи є стимульовані рухом дислокацій перебудови дефектної підсистеми чи п’єзоелектричні поля — достатньо повні огляди з цього приводу наведено в [162, 163]. Сонолюмінесценція спостерігається і в гранульованих середовищах, яке складається, переважно, з мікрометрових частинок напівпровідникових сполук [164]. Зауважимо, що просторовий розподіл інтенсивності сонолюмінесценції використовується для оцінки ступеню пакування гранульованих систем [165]. До цього ж класу явищ можна віднести і зміну спектрів фотопровідності внаслідок генерації (звільнення з дислокацій) власних дефектів при УЗН надпорогової інтенсивності, яке спостерігається, зокрема, в кристалах ZnS та ZnSe [163, 166].

П’єзоелектричне поле є рушійною силою АІ змін інтенсивності фотолімінесценції кристалів CdS [167, 168] та GaAs [169], викликаних змінами часу життя екситонів та положення дефектів. Зауважимо, що ефекти АІ впливу на екситони та фотолімінесцентні процеси (зміна інтенсивності та часу релаксації) спостерігаються не лише в об’ємних кристалах, але й в структурах із квантовими ямами. Зокрема повідомляється про п’єзоелектричне переміщення екситонів у системах ZnSe/ZnS [153, 170], дисоціацію в GaAs/InGaAs [171] чи перетворення зв’язаних на вільні в GaAs/AlAs [172]. Ще одним прикладом є ефекти обертання площини поляризації [173, 174] зміни інтенсивності [175–177], частоти [178] чи напряму [179] лазерного випромінення в структурах InGaAsP/InP з квантовими ямами під час поширення АХ. Загалом, взаємодія п’єзоелектричного поля, викликаного розповсюдженням пружних коливань, із носіями заряду в

системах зі зниженою розмірністю досліджується настільки широко, що можна говорити про появу нового напрямку — «наноакустoeлектроніки».

У зв'язку з труднощами збудження УЗ безпосередньо у низькорозмірних системах, типовою експериментальною конфігурацією є шарувата структура, в якій досліджуваний об'єкт розташовується на поверхні п'єзoeлектрика (найчастіше — ніобату літію), що і виступає у ролі звукопроводу. Саме у такій конфігурації виявлені, наприклад, ефекти зміни спектра фотонапруги [180], перебудови [160] та просторової модуляції [181] фотолюмінесцентних спектрів, зумовлених просторовим розділенням заряду в квантових ямах GaAs/AlGaAs. Зазначимо, що на відміну від всіх згаданих ефектів, поява яких завдячує поширенню пружних коливань із частотою в діапазоні від сотень кілогерц до декількох десятків мегагерц, в останній роботі збуджувалися АХ в гігагерцевій області. Використання таких частот дозволило, зокрема, динамічно створити квантові дроти в системі стаціонарних квантових ям, що відкриває ще один напрям використання використання надвисокочастотного УЗ — динамічне створення наноструктур. Загалом, саме комбінація шаруватої структури з гігагерцевим діапазоном видається чи не найпридатнішою для активного впливу на нанооб'єкти. Наприклад, в літературі повідомляється про дослідження акустoeлектричного струму в графені [182–185] та одномірному каналі [186, 187], про вплив УЗ на одноелектронний транспорт в AlGaAs/GaAs [188, 189] та АІ одноелектронне перенесення між квантовими точками [190]. Окремо виділимо ефекти магніто–акустoeлектронної взаємодії. Наприклад, у шаруватих структурах спостерігалися ефекти появи спінового струму [191] та керування феромагнітним резонансом [192] у плівках магнітних напівпровідників, зміни швидкості спінової релаксації в квантових ямах GaAs/AlGaAs [193], контролю спин–орбітальної взаємодії [194]; досліджувалися можливості контролю намагніченості доменних стінок [195] та їхнє переміщення в нанодротах [196].

Зауважимо, що в цьому пункті згадані не всі відомі динамічні АІ ефекти, УЗ може бути причиною багатьох інших цікавих явищ, на кшталт квантової телепортації [197], маніпуляції наночастинками [198, 199], переорієнтації рідких кристалів [200] чи левітації [200].

Отже, застосування активного УЗ у різноманітних областях, пов'язаних з виготовленням та застосуванням різноманітних мікроелектронних пристроїв є достатньо перспективним та потребує ретельного експериментального та теоретичного дослідження. Водночас необхідно підкреслити, що незважаючи на достатньо великих масив даних щодо АІ динамічних ефектів практично всі вони зумовлені акусто–дислокаційної взаємодією чи впливом п'єзоелектричного поля. Проте на сьогодні основу як фотофольтаїки, так і мікроелектронної техніки складають малодислокаційні неп'єзоелектричні матеріали на кшталт кремнію. Поодинокі вже згадані роботи, які стосуються акусто–дефектної оборотної взаємодії в Si, з одного боку, свідчать про перспективність застосування УЗ методів до керування подібними пристроями, проте, з іншого, не стосуються дослідження ефектів у кремнієвих бар'єрних структурах під час функціонування. Водночас значна частина представленої дисертаційної роботи присвячена саме результатам досліджень динамічних ефектів у кремнієвих структурах із бар'єром Шотткі та  $p$ – $n$ –переходом.

### 1.1.3. Ультразвукові методи дослідження дефектної структури

Два попередні пункти присвячені використанню активного ультразвука як додаткового фактора впливу при створенні напівпровідникових кристалів та пристроїв, методу модифікації їхніх властивостей, а також як знаряддя динамічного керування властивостями. У цьому параграфі буде звернута увага на ще одну іпостась УЗ — інструменту характеристикації напівпровідників, зокрема їхньої дефектної підсистеми як визначального елемента фізичних властивостей.

Розпочнемо з методів, які ґрунтуються на ефекті зміни пружних властивостей при дефектоутворенні. Відомо, що внаслідок модифікації пружних модулів при виникненні ян–теллерівських дефектів на температурних залежностях швидкості та поглинання УЗ можуть виникати екстремуми. Зокрема подібне явище спостерігається, якщо напрям поширення чи поляризації АХ збігається з напрямом дисторсій. Дослідження подібних аномалій дозволяє успішно визначати концентрацію різноманітних дефектів, досліджувати їхні структурні та динамічні властивості як у досить поширених напівпровідниках (напр., вакансії

в Si [201–204] та ZnSe [205], заміщуючі атоми ( $\text{Cu}_{\text{Ga}}$ ) в GaAs [206]), так і в більш рідкісних сполуках (власні дефекти в  $\text{TlInS}_2$  [207], центри, пов'язані з легуючими домішками в  $\text{SrF}_2$  [208] чи атомами перехідних металів у  $\text{La}_{1/3}\text{Sr}_{2/3}\text{MO}_3$  [209] та  $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  [210]). Зауважимо, що метод достатньо чутливий і дозволяє, наприклад, виявляти вакансії в кремнії при концентрації  $10^{12} \div 10^{15} \text{см}^{-3}$ .

До цього ж класу можна віднести методи вивчення розташування дислокацій та тріщин по розподілу деформацій під час резонансного пружного коливання кремнієвих пластин [211–214]. Інший запропонований варіант з'ясування позиції дислокацій в кристалах КРТ орієнтований на виявлення областей підвищення температури [215, 216]. Фактично, в цьому випадку реалізується один із широко вживаних варіантів неруйнуючого контролю, що базується на взаємодії УЗ із механічними неоднорідностями твердих тіл, наприклад дислокаціями чи преципітатами, і застосовний не лише до напівпровідників [217]. Зазвичай окрім локального підвищення температури, при цьому спостерігається ще й нелінійні ефекти, що виявляються у інтенсивній генерації гармонік [217, 218]. Для підсилення чутливості подібних методів запропоновано, зокрема, використовувати не монохроматичні АХ [218].

Методи різницевої спектроскопії базуються на порівнянні спектрів, отриманих при УЗН, та без нього. Підґрунтям для них є ефект АІ зміни зарядового стану. Зокрема, дослідження присвячені ідентифікації дефектів на межі структур SiGe/Si внаслідок модифікації DLTS-спектрів [219], в кристалах CdS за спектрами пропускання [220] чи в епітаксійних плівках GaAs [153, 221, 222] та структурах GaAs/AlGaAs [223] за спектрами відбивання.

В останніх випадках основну роль у перезарядці дефектів відіграє п'єзоелектричне поле. Як і у випадку динамічних АІ ефектів, чимало досліджень проведено з використанням шаруватої структури п'єзоелектрик–напівпровідник. Зокрема, запропоновано і перевірено експериментально метод акустоелектричної релаксаційної спектроскопії [224–226], який ґрунтується на вивченні релаксаційних залежностей поперечної акустоелектричної напруги (ПАН), поява якої зумовлена перерозподілом вільних носіїв заряду та носіїв, захоплених пастками у приповерхневому шарі. Однією з переваг такого підходу є можливість визначення параметрів рівнів, пов'язаних із дефектами на внутрішніх межах

епітаксійних структур. Крім того, співвідношення амплітуд пасткової та концентраційної складових ПАН, а також час її релаксації дозволяють оцінити приповерхневий вигин зон у Si [227]. Виміри акустоелектричної напруги залежно від напруги на затворі системи Al-SiO<sub>2</sub>-Si дозволяють визначити спектр інтерфейсних станів [228]. Шарувата структура може бути використана для вимірювання провідності тонких плівок за згасанням АХ [229] чи двовимірного електронного газу в системі GaAs/AlGaAs за поглинанням УЗ та зміні його швидкості в магнітному полі [230].

Наведенні дані показують, що УЗ доречно застосовувати на всіх трьох основних етапах життєвого циклу напівпровідникових структур, а саме створення — функціонування — характеристизація. Основні результати огляду, наведеного у підрозділі, представлені в роботах [14, 23, 26, 46].

## 1.2. Методологічні аспекти застосування ультразвука

Значна частина розглянутих у дисертаційній роботі результатів (розділи 2, 4, 5 та 6) пов'язана з дослідженням ефектів, які відбуваються в напівпровідникових структурах внаслідок поширення в них АХ мегагерцевого діапазону. У зв'язку з тим, що використання УЗ, на жаль, ще не є стандартним способом впливу на напівпровідникові кристали, у цьому підрозділі представлена узагальнена інформація щодо відповідних експериментальних методик та термінології. Зокрема, у літературі не має чіткого розмежування у використанні термінів ультразвукова обробка (УЗО) та ультразвукове навантаження (УЗН). У представленій роботі їхнє застосування визначається оборотністю АІ ефектів. Наприклад, у першому випадку (УЗО) внаслідок поширення пружних хвиль відбуваються необоротні (залишкові) зміни властивостей напівпровідникових структур; тоді як у другому випадку (УЗН) ефекти є оборотними (динамічними), зміни електрофізичних параметрів спостерігаються лише під час поширення АХ; після припинення дії УЗ параметри поступово (протягом десятків хвилин) повертаються до своїх вихідних (до початку УЗН) значень.