

**О.І. Власенко, М.П. Киселюк, В.П. Велешук, З.К. Власенко,
І.О. Ляшенко¹, О.В. Ляшенко¹**

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ ТА ДІОДНИХ СТРУКТУР (ОГЛЯД)

Узагальнено матеріал з дослідження явища акустичної емісії у напівпровідниках та діелектриках при дії зовнішніх полів різної фізичної природи. Особливу увагу приділено вивченню процесів дефектоутворення та акустичної емісії у напівпровідникових приладах та світловипромінюючих структурах на основі сполук A_3B_5 , створенню акустоемісійного експрес-методу контролю процесів деградації та релаксації у світловипромінюючих структурах у режимі реального часу.

Ключові слова: акустична емісія, напівпровідник, дефектоутворення.

1. ВСТУП. АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ, ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сучасні акустичні методи займають особливе місце серед неруйнівних методів дослідження і контролю стану твердого тіла. За їх допомогою вивчають фізичні властивості твердих тіл у широкому діапазоні частот пружних коливань. Розширення діапазону частот, удосконалення техніки експерименту разом з розвитком теоретичних уявлень про механізми поширення пружних коливань у кристалах привели до того, що ультразвукові методи стали корисними додатковими, а іноді й унікальними в дослідженнях фізики твердого тіла. За допомогою акустичних методів можуть бути одержані додаткові відомості про природу фазових переходів, зокрема динаміку та кінетику, ангармонізм міжатомних сил взаємодії, магنون-фононні, електрон-фононні і фонон-фононні взаємодії, а особливо, про структуру та властивості дефектів. Одночасно майже всі акустичні методи, на відміну від, наприклад, рентгенівських, є безпечними для життєдіяльності людини.

Особливості поширення пружних хвиль у твердих тілах визначаються (окрім їх геометрії) залежністю швидкості і загасання ультразвуку як від фундаментальних параметрів матеріалу, так і від інших змінних факторів, що представляють інтерес для дослідника. Такі вимірювання дозволяють вивчати зв'язок між параметрами ультразвукової хвилі та властивостями і станами твердого тіла. Наприклад, на характеристики поширення пружної хвилі істотно впливає зміна типу або густини дефектів ґратки, зокрема дислокацій.

При фазових перетвореннях у середовищі відбуваються локальні зміни, що впливають на поширення акустичних хвиль. Це підтверджено дослідженнями, зокрема, в сегнетоелектриках, напівпровідниках, інтеркальованих графітах з використанням об'ємних і поверхневих хвиль, а також хвиль у пластинах. Останні чутливі до параметрів самих пластин в областях сильної дисперсії фазової швидкості, тобто поблизу частот виникнення резонансних мод. Чутливість акустичних методів дозволяє досить точно визначити температуру фазового переходу.

Особливе місце серед усіх акустичних методів займає метод, що базується на явищі акустичної емісії (АЕ), та оснований на реєстрації, обробці та аналізі параметрів хвиль механічних напружень, які виникають у результаті формування, локальних змін і руйнування структури матеріалу [1-14]. На відміну від інших неруйнівних ультразвукових методів, цей метод не потребує додаткового джерела акустичних хвиль або коливань – джерелом хвиль і є локальні області досліджуваних об'єктів, в яких відбуваються динамічні зміни структури, зокрема дефекти, що утворюються і розвиваються. Саме завдяки цьому цей метод суттєво відрізняється від інших, які використовують або інтегральну зміну параметрів об'єкта, або є руйнівними для об'єкта дослідження.

У даний час АЕ метод є ефективним, неруйнівним, пасивним ультразвуковим експрес-методом, який дозволяє в режимі реального часу спостерігати у матеріалах, структурах і приладах початок та динаміку швидких процесів деградації та релаксації,

вивчати процеси і стадії розвитку дефектної структури під дією зовнішніх полів різної природи [1-13].

Цей метод широко застосовується у сучасних наукових дослідженнях для неруйнівної експрес-реєстрації (в режимі реального часу) фактів зміни локальної структури матеріалів, на практиці – для створення систем безперервного моніторингу відповідальних об'єктів промисловості, контролю якості та надійності промислових конструкцій, таких як мости, емності високого тиску, корпуси літаків, атомних реакторів та інших об'єктів високої вартості і стратегічного значення тощо [1, 2].

Метод АЕ може бути застосований для практично всіх твердих типів матеріалів, що використовуються в сучасній техніці та промисловості. На сьогодні проблема ідентифікації джерел АЕ (мікрооб'ємів, в яких відбувається динамічна локальна структурна перебудова), при дії зовнішніх полів різної фізичної природи частково розв'язана для композиційних матеріалів [4, 13, 15, 16], для таких твердих тіл, як п'єзокераміка [6, 17, 18], скло [19, 20], метали [3, 21-28] та сплави на їх основі [26-29] та навіть для діелектриків [8, 30-36] і напівпровідників [5, 7, 10, 11, 30, 37-52].

Значною відмінністю АЕ методу від інших широковідомих акустичних та інших фізичних методів є невідтворюваність, спонтанність і хаотичність сигналів АЕ, які виникають при суттєво різних фізичних процесах локальної перебудови структури твердих тіл та поширюються практично завжди в обмежених твердих тілах.

Зазначені вище матеріали піддаються найрізноманітнішим видам впливу, який може виникнути в умовах їх обробки та експлуатації за реальних обставин, а саме: статичне [3, 19, 21-23, 26-28], циклічне [4, 13, 15] і динамічне [8, 16, 20, 31-35] механічні навантаження; зміна температури в околі фазового переходу [6, 17, 53-55] та мартенситних [29] і поліморфних [56] перетворень; склування [57], електричний струм [5, 10, 11, 16, 37-41, 43-48], електричні [18] та магнітні [47, 58, 59] поля; перемагнічування та переполаризація [16, 18]; різноманітні види опромінення (електромагнітне, у тому числі радіаційне, лазерне, корпускулярне та ін.) [42].

АЕ – це явище індукованого хаотичного спонтанного випромінювання акустичних хвиль (подібного до шуму) при локальній перебудові структури твердого тіла, що супроводжується утворенням, зривом та релаксацією механічних напружень у локальних об'ємах під дією зовнішніх полів різної фізичної природи [9, 16, 30].

Типовими механізмами АЕ твердих тіл є такі: утворення мікротріщин [3, 60-66], пластична деформація [3, 21-28, 60-65, 67, 68], фазові структурні перетворення [24, 25, 36, 42-44, 46, 68] тощо. У більшості випадків механізм АЕ, який спричинює збудження акустичних хвиль, є певною сукупністю пов'язаних фізичних та, додатково, хімічних процесів, що відбуваються в локальному об'ємі матеріалу – джерелі АЕ. Ці процеси супроводжуються короткочасним виділенням надлишкової енергії, пружна складова якої і є зовнішнім проявом АЕ [14].

Узагальнена залежність між механічними напруженнями T та деформацією S для реальних кристалів є доволі складною [34]:

$$T_{ij}(S_{kl}) = T_{ij}(0) + \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}} \Big|_{S_{kl} \rightarrow 0} S_{kl} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial S_{kl} \partial S_{pq}} \Big|_{S_{kl} \rightarrow 0, S_{pq} \rightarrow 0} S_{kl} S_{pq} + \dots \quad (1),$$

де коефіцієнти $\partial T_{ij} / \partial S_{kl}$ та $\partial^2 T_{ij} / \partial S_{kl} \partial S_{pq}$ – модулі пружності 2-го і 3-го порядків відповідно, а $T_{ij}(0)$ – залишкові (пружні і непружні) механічні напруження, пов'язані з поточною конфігурацією структури дефектів твердого тіла. Цей вираз при $S < 10^{-3}$ (у лінійному наближенні) та за відсутності залишкових механічних напружень та деформацій, тобто коли $T_{ij}(0)$ і $\partial^2 T_{ij} / \partial S_{kl} \partial S_{pq} \cdot S_{kl} \cdot S_{pq} \rightarrow 0$, трансформується у звичайний лінійний закон Гука у тензорній формі. Перший доданок у (1) – це залишкові механічні напруження у матеріалі при нульових деформаціях, спричинених попереднім зовнішнім впливом. $T_{ij}(0) \rightarrow 0$ тільки для ідеальних

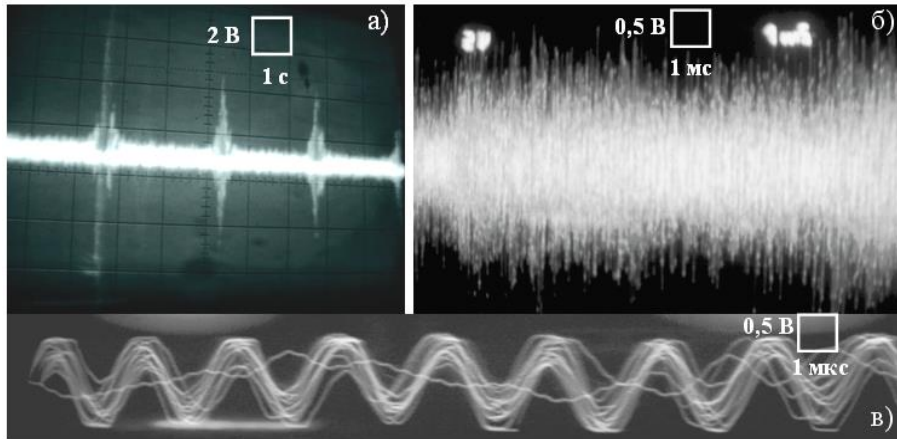


Рис. 1. Види АЕ в лужно-галоїдних монокристалах при ультразвуковому навантаженні: дискретна АЕ (а), неперервна АЕ (б, в).

кристалів, оскільки завжди є залишкові деформації або напруження, тому нульові значення компонентів тензорів механічних напружень та тензора деформацій неможливо ні реально визначити, ні досягти.

Сам процес достатньо швидкої зміни $T_{ij}(0)$ – зміни локальних механічних напружень – проявляється як АЕ матеріалів. Відмінність від нуля третього доданка в (1) означає наявність нелінійних пружних та відповідно нелінійних акустичних явищ.

На рис. 1 зображено осцилограми типових сигналів АЕ для лужно-галоїдних кристалів.

Варто відмітити існування двох типових видів АЕ – низькоенергетичної неперервної АЕ та високоенергетичної дискретної АЕ [69].

Дискретна АЕ – це випадкова послідовність імпульсів (сигналів АЕ), в якій інтервал часу між будь-якими двома послідовними імпульсами більший за час загасання попереднього з них (рис. 1, а).

Неперервна АЕ – випадкова послідовність імпульсів АЕ, інтервал часу між якими менший або дорівнює часу згасання попереднього імпульсу (рис. 1, б та в). За ДСТУ [14] це АЕ, механічні сигнали якої реєструються як неперервний сигнал у заданому інтервалі часу. При цьому механічні сигнали АЕ звичайно коротші (часто суттєво), ніж відповідні зареєстровані електричні сигнали АЕ, за рахунок розмиття хвильового пакета внаслідок дисперсійних ефектів.

На сьогодні їх існуванню немає загальноприйнятого пояснення [1-3, 9, 12, 16, 30, 70-83]. Здебільшого неперервну АЕ пов'язують з несинхронним рухом (утворенням) низькорозмірних дефектів, зокрема дислокацій [1, 3, 12, 83], а дискретну АЕ – зі зміною стану (утворенням) тривимірних дефектів – тріщин [1, 3, 12, 82], синхронним рухом (утворенням) комплексів дислокацій [82, 83], зривом внутрішніх залишкових механічних та локальних динамічних термомеханічних напружень, зокрема, у низькорозмірних та нановимірних структурах твердотільних напівпровідникових приладів [7, 84, 85].

Таким чином, джерело АЕ – локальний об'єм об'єкта, де відбувається перетворення будь-якого виду енергії у механічну енергію АЕ [14].

Акустична емісія є рекомендованим та зафіксованим у стандартах промислово розвинутих країн [14, 69] неруйнівним методом для вивчення динамічної локальної перебудови різноманітних матеріалів. При цьому сам АЕ метод ґрунтується на реєстрації та обробці хвиль напружень, які виникають внаслідок процесів формування, зміни стану (зриву механічних напружень) та руйнування локальних областей об'єкта.

Варто зауважити, що оскільки АЕ є спонтанним та хаотичним процесом, не кожна реакція об'єкта на зовнішній вплив у вигляді акустичного випромінювання є АЕ матеріалу. У технічних стандартах багатьох країн розрізняють АЕ матеріалу та акустичне випромінювання, яке за формою та типом сигналів є на неї схожим – так звану АЕ виток [1, 14], яка пов'язана із гідродинамічними та (або) аеродинамічними явищами при протіканні рідин та газів, їх нестационарною фільтрацією через наскрізне порушення твердих тіл, а також АЕ тертя, яка виникає внаслідок тертя суміжних поверхонь елементів конструкцій. У той же час АЕ тертя, зумовлена тертям на границях зерен твердих тіл, безумовно належить до АЕ матеріалів, оскільки супроводжується зміною властивостей цього матеріалу, зокрема локальною структурою.

2. ОСОБЛИВОСТІ АЕ МІКРО- ТА НАНООБ'ЄКТІВ

Вивчення методами АЕ властивостей мікро- і нанорозмірних гомо- та гетероструктур є важливим як з наукової точки зору, оскільки гомо- та гетероструктури містять велику сукупність дефектів і відповідно є зручними модельними мікро- та нанооб'єктами, так і з практичної точки зору, адже на їх основі виготовляють більшість елементів і пристроїв сучасної електронної техніки [86-92, 100].

Проте через мікро- та нанорозміри об'єктів досліджень і відповідно високу складність експериментів з реєстрації АЕ в літературних джерелах інформація щодо процесів АЕ та ідентифікації джерел АЕ напівпровідників та складних напівпровідникових структур на сьогодні обмежена і стосується досліджень лише кількох наукових груп за останні 20-30 років [5, 7, 9-11, 16, 30, 37-41, 43-51].

Розглянемо деякі важливі особливості АЕ матеріалу. Детермінований зовнішній вплив приводить до такої ж детермінованої реакції лінійної системи [103]. Здебільшого фізичні процеси у твердих тілах є детермінованими, тобто в рамках тієї або іншої системи рівнянь вони можуть бути описані (передбачені), виходячи із заздалегідь заданих початкових умов [103]. Однак для нелінійних систем, зокрема для пружно-нелінійних гетероструктур, характерна висока чутливість до початкових умов (для гетероструктур – початковий стан та передісторія дефектної системи), які можуть приводити до хаотичної поведінки в часі їх параметрів та характеристик [103, 104]. Відповідно нерегулярний або хаотичний рух, породжений у нелінійних системах, є проявом певних динамічних закономірностей, які на перший погляд „однозначно” повинні були б визначати наперед еволюцію в часі стану системи при відомій її передісторії [103].

Традиційні підходи [1, 3, 12] до явища АЕ визначають її лише як нелінійний, або як абсолютно-хаотичний процес, що зумовлено складністю точного формулювання задачі АЕ [1, 73, 76] – задачі про спонтанне хаотичне випромінювання акустичних хвиль шумового характеру рухомими структурними дефектами при релаксації надлишкових механічних та локальних динамічних термомеханічних напружень, викликаних зовнішнім впливом [83, 104]. Умовою, що зазвичай дозволяє проводити аналіз процесу АЕ, є припущення про незалежність джерел АЕ, яке справедливе тільки на початкових стадіях навантаження та виникнення АЕ, далеких від руйнування зразка.

Ця стадія ще відповідає виконанню закону Кайзера, згідно з яким АЕ виникає в досліджуваному зразку лише при перевищенні в наступному циклі навантаження величини зовнішнього впливу, при якому АЕ загасла у попередньому циклі [1, 3, 7, 12, 83, 104]. У гетероструктурах через наявність (навіть у початковому стані) одночасно кількох типів дефектів [7, 85, 106-111], кожен з яких може бути (самостійно або в складі комплексів) джерелом АЕ [7, 85, 106], прогнозоване виконання закону Кайзера не очевидне.

Обмеженням для виявлення сигналу низької енергії (неперервна АЕ) є технічна складність забезпечення низького рівня шумів, приведенного до входу апаратури реєстрації

(менше 1 мкВ у смузі мінімум 0,1-1 МГц при динамічному діапазоні сигналів 70-80 дБ), та необхідність використання чутливих резонансних (а неочевидних – широкосмугових, але низькочутливих) приймачів.

Незважаючи на вказані технічні складнощі, експериментальному вивченню динаміки дислокаційних процесів, що приводять до АЕ пружних середовищ з внутрішніми та зовнішніми границями, а також їх теоретичному аналізу присвячено роботи [70-79, 112-114]. Досліджено АЕ при русі скупчення дислокацій двійникування поблизу поверхні в кристалах кальциту [70-72]. Виявлено область виникнення випромінювання АЕ, розміри якої відповідають теоретичним розрахункам. Досліджено дискретність сигналу неперервної АЕ на фоні активного випромінювання від скупчення дислокацій, виділено окремі імпульси, які виникають при виході на одну з поверхонь окремих дислокацій [115].

Звичайно, сигнал АЕ є змінна стохастична фізична величина, що несе інформацію про АЕ [14]. Ця інформація про АЕ є прогнозовано неповною. Однак встановлено, наприклад, що при домінуванні дислокаційних механізмів АЕ величина сигналів АЕ пропорційна середнім швидкостям дислокацій [70-72]. Провівши аналогію між електродинамікою та теорією пружності (точніше, континуальною теорією дислокацій), розроблено теоретичну модель просторово-часової еволюції звукового поля випромінювання мікротріщини та дислокацій [73-77], сформульовано авторами [78] основну задачу АЕ твердих тіл, яка враховує дисперсію та затухання (у межах дислокаційних механізмів АЕ). Експериментально звукове випромінювання при виході дислокацій на поверхню спостерігалось також у [114] та при їх анігіляції у [72].

Іншим важливим аспектом є зміна інтенсивності АЕ з часом – динаміка АЕ. Характерною ознакою АЕ, відміченою у багатьох роботах, є наявність певного часу затримки від початку проведення досліду (досягнення порогового рівня збудження АЕ) до появи та досягнення максимальної інтенсивності АЕ.

Оскільки локальні об'єми реальних об'єктів дослідження у фізиці твердого тіла (джерела АЕ) становлять приблизно 1–100 мкм³, постає питання про складність реєстрації та обробки сигналів АЕ (для прикладу об'єм “наношару” – активної області у InGaN гетероструктурі індикаторного світлодіода (СД) – приблизно дорівнює 260×260×0,05 мкм, або ~3400 мкм³).

Додатковими особливостями, що можуть суттєво впливати на динаміку АЕ гетероструктур, можна вважати утворення локально-неоднорідних динамічних термомеханічних напружень під дією різноманітних зовнішніх впливів, зокрема протіканні струму. Їх просторовий розподіл корелює із шаруватістю структури внаслідок епітаксійних технологій. При струмовому навантаженні одним із них є „current crowding” [88-90], у результаті чого виникає неоднорідний розподіл густини струму J_i крізь площу гетеропереходу (перпендикулярних до площини активного шару трубок струму) і як наслідок – наявність додаткових градієнтів термонапружень. Фактично, при протіканні струму ці два „просторово-ортогональні” динамічні розподіли механічних напружень формують „замкнені” локальні області неоднорідних механічних напружень уздовж трубки струму, які є потенційними джерелами дискретної високоенергетичної АЕ.

Дослідження такого роду “динамічних дефектів” іншими відомими методами ускладнено, тим більш у режимі реального часу. Вказані ж особливості методу АЕ дозволяють використовувати цей метод не тільки для вирішення технічних питань контролю якості, але й для спостереження тонких процесів, визначення та вивчення процесів утворення дефектів та динамічної перебудови структури твердих тіл.

Як показали дослідження [3, 4, 5, 6, 9-11, 13, 15-20, 31-59, 84], зокрема наші [7, 8, 50, 84, 85, 106, 117], АЕ проявляється не тільки у тілах макроскопічних розмірів, тому метод АЕ може бути використаний для дослідження низькорозмірних [13, 16, 39-42, 106, 115] (тобто таких, що мають розміри одиниці нанометра, проте в них не спостерігаються

квантоворозмірні ефекти) та нановимірних (квантоворозмірний ефект присутній) [7, 11, 39-42] структур та СД.

3. АКУСТИЧНИЙ ВІДГУК ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ОПРОМІНЕННІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Можливість використання методу АЕ для реєстрації тонких релаксаційних процесів [1-70], зокрема, для визначення порога процесів, які відбуваються при взаємодії імпульсного лазерного опромінення (ІЛО) з речовиною, не викликає сумнівів [36, 42, 117-120].

Неоднорідний термічний імпульсний вплив на поверхню твердих тіл, зокрема ІЛО, приводить до непрогнозованих зривів неоднорідних термомеханічних напружень, які створюються локально-перегрітими областями [42, 121-123]. При значній інтенсивності лазерного опромінення I можливе випаровування та розплавлення частини приповерхневого локального об'єму твердих тіл. Причому, за деяких умов опромінення є багатократними, послідовними в часі, а в різних локальних об'ємах відбуваються прямі та зворотні фазові переходи тверде тіло – рідина та тверде тіло – газ [124].

Через значну пружну енергію, яка виділяється внаслідок дії ІЛО на об'єкт, що досліджується, реєструється не тільки сигнал АЕ, але й більш складний сигнал – акустичний відгук, який має достатньо складну структуру, сформований за рахунок кількох [117] суттєво різних механізмів: різке розширення – звуження речовини, тиск нерівноважної пари над поверхнею розплаву та світлодетонаційний тиск плазми [125].

У даний час запатентовано деякі АЕ та акустичні способи контролю, фактично наявні лише одиничні публікації з АЕ при ІЛО в режимі *in situ* [36, 42, 117-120], тому активно проводяться дослідження в області цілеспрямованого контрольованого управління ІЛО електрофізичними параметрами складних напівпровідникових сполук і структур [100, 101] та пошук можливостей практичного використання методу АЕ для дослідження монокристалів при ІЛО [117, 118-120, 126].

У першу чергу, це пов'язано із складністю виділення та аналізу низькоенергетичного, малопотужного сигналу акустичного відгуку на фоні електромагнітних перешкод, створених потужним ІЛО.

Важливими задачами контролю лазерно-індукованих процесів є точне визначення порога плавлення напівпровідникових кристалів CdTe і GaAs [117, 121, 127] та порога максимально допустимих режимів лазерної обробки для цілеспрямованого контрольованого впливу на електрофізичні параметри, а також контроль переміщення границі *p-n* переходу у прямозонних GaAsP структурах [100] для оптимального управління електрофізичними властивостями. Простіше ці задачі можуть бути розв'язані саме за допомогою названих методів [36, 117, 118].

Створений ІЛО неоднорідний коротко-часний локальний нагрів поверхні приводить до виникнення неоднорідних термомеханічних напружень, розплавлення поверхні, проплавлення поверхні зразка вглиб з утворенням шахти, викидом на поверхню розплаву, утворення кратера та „корони” (рис. 2) [82]. Як показано у

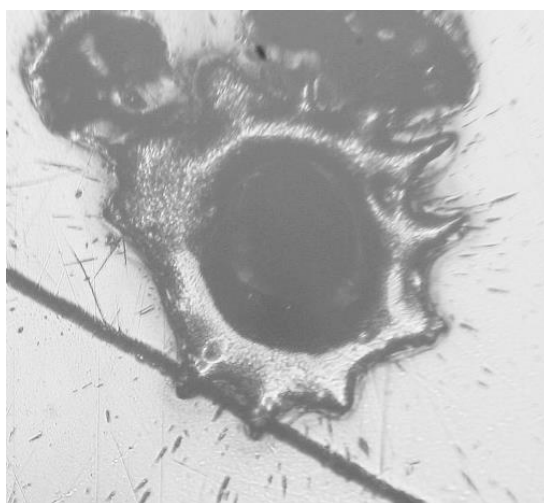


Рис. 2. Кратер та викид розплаву на поверхню при імпульсному лазерному опроміненні [118].

[117, 118], реєстрація індукованого акустичного відгуку стандартними АЕ приладами (типу АФ-15) є стабільною, можливий також часовий аналіз “структури” цього відгуку.

Індукований ІЛО акустичний відгук дещо відрізняється для оптично-прозорих та оптично-непрозорих матеріалів та залежить від величини інтенсивності ІЛО [118]. Так, для „допорогових” (до виникнення АЕ) потужностей акустичний відгук приблизно пропорційний потужності ІЛО та є відносно „коротким”, хоча і має значно більшу тривалість, ніж тривалість імпульсу ІЛО (15-20 нс). Для „надпорогових” потужностей відбувалася [118] зміна як форми, так і тривалості індукованого відгуку (рис. 3), зміна лінійної залежності $A(I)$ на нелінійну (рис. 4) [117, 118]. Ці зміни залежності $A(I)$ на нелінійну (криві 1 для CdTe, 2 для GaAs та 3 для Si відповідно у точках А, В, С) є свідченням плавлення кристалів і, таким чином, визначають лазерно-індукований поріг плавлення та поріг максимально допустимих режимів ІЛО.

Зважаючи на природну різноманітність сигналів АЕ, пов’язану з різними механізмами дефектоутворення, у більшості робіт також приділяється значна увага характеристикам акустичних сигналів.

Так, у [36], де методом АЕ досліджено різні стадії руйнування кристалів LiF та ZnS під дією неперервного лазерного випромінювання ($\lambda = 10,6$ мкм), на фоні сигналів АЕ тривалістю 2...4 мкс, які виникають внаслідок розвитку мікротріщин, було виявлено сигнали тривалістю 0,2 мкс, які, на думку авторів [36], є свідченням зародження та руху дислокацій (скоріше, синхронного руху набору незв’язаних пар дислокаційних сегментів у кількості $N \sim 10^3$). У [42] при опроміненні Si ($\tau = 4$ мс, $\lambda = 1,06$ мкм) з інтенсивністю, вищою за поріг плавлення приповерхневих шарів $E > 90$ Дж/см², виявлено АЕ, яка виникає при утворенні мікротріщин на поверхні внаслідок кристалізації (крихке руйнування) під дією поля термопружних напружень, із затримкою в часі відносно фототермоакустичної частини загального акустичного відгуку. Отримане значення величини затримки вказано в роботах [117, 118] та має аналогічне значення.

При лазерному опроміненні матеріалу може відбуватися зародження та розвиток мікрооб’ємів, які і є джерелами АЕ. Поріг руйнування такого матеріалу визначають за наявністю сигналів АЕ [36, 42, 117-120, 126].

У цілому, вірогідним є така послідовність у часі (та набір) фізичних процесів в околі шахти проплавлення при ІЛО і відповідних сигналів АЕ при “надпороговій” (АЕ при плавленні поверхні) інтенсивності наносекундного ІЛО: АЕ при розплавленні поверхні зразка (АЕ при фазовому переході тверда – рідка фаза), АЕ при застиганні розплаву (АЕ при фазовому переході рідка – тверда фаза), АЕ при подальшому тріщиноутворенні та АЕ при русі дислокацій в околі та з околу шахти розплаву. При “допороговій” (до плавлення

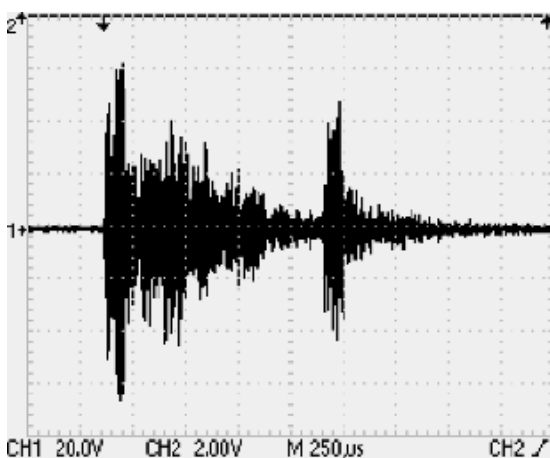


Рис. 3. Акустичний відгук при імпульсному лазерному опроміненні напівпровідника.

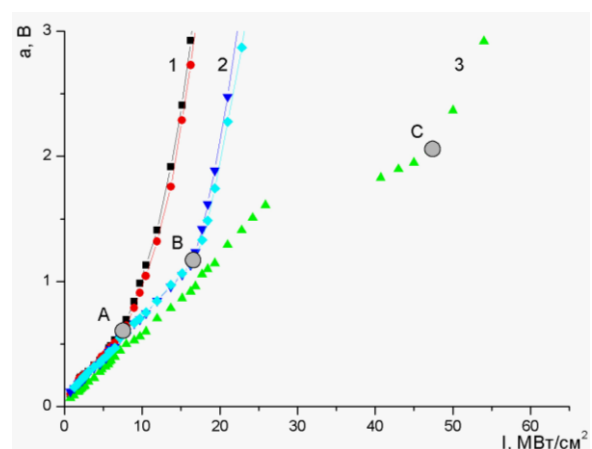


Рис. 4. Залежність амплітуди акустичного відгуку від потужності імпульсного лазерного опромінення у зразках: 1 – CdTe, 2 – GaAs, 3 – Si [117, 118].

поверхні) інтенсивності ІЛО: АЕ при тріщиноутворенні та АЕ при русі дислокацій в околі та з околу локальної опроміненої області, де створено тимчасові динамічні термомеханічні та залишкові механічні напруження.

Швидкоплинними процесами ($\tau \ll 10^{-9}$ с) при фазових переходах тверда фаза – газ та газ – тверда фаза (характерних для фемтосекундного ІЛО [124]) через відносно „довгий” (наносекундний) імпульс лазера можна знехтувати. Варто зауважити, що АЕ при фемтосекундних впливах, зокрема фемтосекундному ІЛО, на сьогодні взагалі не досліджена.

Відмітимо, що незважаючи на відсутність на сьогодні достатнього теоретико-експериментального обґрунтування моделей АЕ при ІЛО, для твердих прозорих лінійних та нелінійних матеріалів, напівпровідникових кристалів для лазерних систем, лінз, елементів оптично активних модуляторів [119, 120] та рідких розчинів, у тому числі із вмістом наночастинок [120], на основі методу АЕ відомі способи контролю порога оптичного пробою та якості твердих прозорих матеріалів [119] і порогів дефектоутворення при неперервному [120] та імпульсному або частотному режимі.

4. АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ ТА ДІОДНИХ СТРУКТУР, ЗУМОВЛЕНА ЕКСТРЕМАЛЬНИМ СТРУМОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Використання явища АЕ для аналізу динаміки процесів дефектоутворення при протіканні струму у напівпровідникових матеріалах, зокрема композиційних [128], і пристроях на їх основі не тільки підтвердили тезу про складність реєстрації та обробки сигналів АЕ, але й дозволили отримати вперше в реальному часі інформацію про динаміку процесів, яка досі не могла бути отримана при використанні більшості інших методів [5, 10, 11, 30, 37-49].

Зауважимо, що ефективність, інформативність та складність АЕ досліджень привели на сьогодні до розділення таких понять, як АЕ апаратура, під якою розуміють тільки обладнання, що забезпечує прийом, обробку та реєстрацію акустичних та електричних сигналів АЕ, та АЕ система, яка містить АЕ апаратуру, поєднану із засобами статистичної, математичної обробки та аналізу параметрів електричних сигналів АЕ з використанням обчислювальної техніки [14].

У деяких перших роботах з АЕ напівпровідників [5, 37] було показано, що АЕ монокристалів Si та CdS при протіканні електричного струму може виникати в умовах саморозігріву при електричному полі $\sim 50\text{...}80$ та $\sim 600\text{...}700$ В/см відповідно. АЕ, за припущенням авторів [5, 37], була зумовлена зривом та рухом заряджених дислокацій під дією електричного поля та динамічних термопружних напружень, що виникають у процесі мікропластичної деформації. Виявлено затухаючу з часом остаточну АЕ після зникнення поля. Доведено, що на процеси випромінювання АЕ впливають як нагрівання кристала, так і наявність електричного поля (протікання струму), але сценарії розвитку процесу АЕ суттєво розрізняються. Виявлено ефект, подібний ефекту Кайзера при механічних зовнішніх впливах, – відсутність АЕ, поки не перевищено рівень попереднього навантаження (напруженість електричного поля або величина струму) [14].

Для монокристалів CdS виявлено зниження порога виникнення АЕ при повторному навантаженні, що суперечить закону Кайзера, але свідчить про зареєстрований методом АЕ процес розмноження дислокацій та (або) суттєву зміну дислокаційної структури.

У роботах [5, 10, 38] досліджували АЕ кремнієвих діодів при протіканні струму. В умовах зародження або в момент електричного пробою в результаті різкого збільшення струму відбувається нагрівання напівпровідникового приладу, яке є неоднорідним, зокрема, через неоднорідність структури, що приводить до неоднорідного розподілу густини струму крізь площу (об'єм) *p-n* або гетеропереходу. Наявність цих локальних неоднорідностей

викликає локальне перегрівання, утворення складних просторових градієнтів динамічних термомеханічних напружень та появу термопластичних джерел АЕ.

У роботі [5] встановлено, що при пропусканні струму крізь германієві діоди (Д302) величина прямого струму, при якій з'являються сигнали АЕ, майже у два рази нижча, ніж величина зворотного струму, при якій електричний пробій переходить у тепловий і діод виходить з ладу. Цей результат [5] є додатковим свідченням того, що при формуванні зривів механічних напружень (причин виникнення АЕ) у локальних областях (джерелах АЕ) напівпровідникових приладів із штучно створеною неоднорідністю (*p-n* або гетеропереходом) механізм утворення неоднорідних локальних динамічних термомеханічних напружень та відповідних просторових градієнтів при протіканні електричного струму є більш ефективним (для виникнення АЕ), ніж рух дислокацій (заряджених) в електричному полі, який обмежений наявністю надпотужного стопора – *p-n* або гетеропереходу. Навпаки, у діелектричних кристалах, у яких було зареєстровано АЕ під впливом електричного поля [5, 129], рух заряджених дислокацій можна вважати основним механізмом АЕ.

Зауважимо, що до АЕ можуть бути помилково віднесені прояви недостатньо вивчених механізмів перетворення енергії зовнішніх впливів (зокрема електричного поля або струму) в енергію АЕ.

Так, у роботі [130] у режимі імпульсного струму виявлено та досліджено періодичне імпульсне акустичне випромінювання в кремнієвих транзисторах (КТ 801А), проте зроблено помилковий (вірогідно) висновок про його АЕ природу, оскільки відсутні скорельовані у часі часова затримка та зменшення інтенсивності зареєстрованої АЕ з імпульсами електричного струму. Більш вірогідною причиною цього явища є електроакустичне перетворення, можливість спостереження якого у напівпровідникових структурах була відмічена у [115], а саме перетворення є результатом одночасної дії кількох фізичних механізмів, зокрема, це періодичне (з періодом імпульсного струму) локально-неоднорідне пружне термічне розширення кристалів зі зривом пружних локальних динамічних термомеханічних напружень (відсутні необоротні зміни – відсутня деградація випромінювання).

5. АКУСТИКО-ЕМІСІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТЛОДІОДІВ

Акустико-емісійні дослідження світловипромінюючих структур (СВС), наприклад, у випадку встановлення їх максимально допустимих та критичних навантажень, відбуваються на межі чутливості сучасної апаратури. З іншого боку, АЕ дослідження дозволили показати [7], що діючі у напівпровідникових технологіях критерії якості не завжди вірні.

На сьогодні залишаються малодослідженими процеси старіння без дії очевидних зовнішніх впливів, тобто процеси суто природного старіння, що, очевидно, пов'язано з необхідністю вимірювань протягом тривалого часу, який повинен бути співрозмірним з характерним часом довготривалих релаксаційних процесів.

Імовірність суттєвого впливу природного старіння на експлуатацію світлодіодів (СД) у реальних умовах низька через малі часові проміжки між змінами технологій виготовлення СД, які менші, ніж час експлуатації, гарантований виробником.

Саме дослідження природного старіння може надавати максимально точну інформацію про релаксаційні процеси, що відбуваються у гетероструктурах та приладах, які, як відомо, після закінчення процесу епітаксії перебувають у складному метастабільному стані, що пов'язано зі значними внутрішніми механічними напруженнями, неоднорідними по об'єму напівпровідника [50, 108, 109]. Вагома частина дислокацій залишається нерівноважною, закріпленою на стопорах, більшість з яких слабкі.

Варто відмітити відносно великий час (дві-три доби) твердіння корпусу із поліметилметакрилату, релаксаційні процеси в якому сильно впливають на можливості

використання СВС та надійність контактів, підведених до неї. Для скорочення терміну полімеризації при формуванні СД прозорий корпус піддають короткочасній термообробці при 120 °С, оскільки збільшення тривалості витримки приводить до знебарвлення та втрати ним прозорості. Для виготовлення високоякісних СД процес термообробки замінюють опроміненням полімеру ВЧ або УФ випромінюванням [88, 105].

У випадку використання епоксидних складів експлуатація СД завжди починається набагато раніше, ніж закінчуються процеси затвердіння полімеру, який, пройшовши стадії рідина – гель та гель – тверде тіло, набуває максимальної твердості впродовж одного місяця. Слід окремо виділити такий вид штучного старіння, як термічний відпал, який використовується на виробництві з метою стабілізації електричних та оптичних параметрів готового виробу, що суттєво впливає на динаміку сигналів АЕ від дислокацій у Si ($N_{\text{дисл}} < 10^2 \text{ см}^{-2}$) та CdS ($N_{\text{дисл}} = 10^6 \text{ см}^{-2}$) при тепловому та струмовому навантаженні [5, 37].

Оскільки виробник не завжди вірно визначає експлуатаційні характеристики СД, зокрема максимально допустимий струм експлуатації, виявилось необхідним дослідити зістарені (час старіння $\tau \sim 10^8 \text{ с}$) у природній спосіб GaP/GaP:N індикаторні СД. Проведена серія експериментів [7, 50, 84, 85, 106] дозволила констатувати факт значного збільшення порога (за величиною прямого постійного струму) виникнення АЕ, отриманого при значеннях 5...30 мА у 80-х роках [39] та при значеннях 50...80 мА у 90-х роках [38] і підтвердженого для свіжовиготовлених ($\tau \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ с}$) за тією ж технологією зразків.

Це свідчить про значне збільшення максимально допустимих та критичних струмів, а також допустимої температури експлуатації. Значення, отримані за допомогою методики [39] для зістарених зразків, мали чітко виражений рівномірний розподіл та у 16 разів перевищували в середньому ті ж величини, визначені для нових зразків, що свідчить про можливість збільшення струмів живлення, підвищення надійності та стійкості до екстремальних умов, навантажень, агресивних середовищ.

Явище старіння твердотільних напівпровідникових елементів та структур в умовах їх експлуатації під дією полів різної фізичної природи на сьогодні відоме та досліджене, зокрема при пропусканні струму [110, 111]. Це явище полягає у поступовій зміні електричних, люмінесцентних та фотоелектричних характеристик з часом за рахунок різноманітних релаксаційних процесів, зокрема процесів дефектоутворення.

У [49] висловлено припущення, що кореляція між АЕ та зміною квантового виходу СД структур на основі GaP пов'язана з появою та розмноженням дислокацій в околі *p-n* переходу. На рис. 5 помітні ямки травлення до (а) та після (б) деградації СВС на основі GaP, крізь яку проходив постійний прямий струм 20 А/см^2 (125 мА), а температура не перевищувала 150 °С. Знято шар товщиною 2 мкм у площині *p-n* переходу з боку *p* шару. Зроблено висновок, що перегрів активної області гетеропереходу приводить до значного збільшення густини дислокацій від $N_{\text{дисл}} = 10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$ до $N_{\text{дисл}} > 10^7 \text{ см}^{-2}$ (подекуди 10^8 см^{-2}) [49].

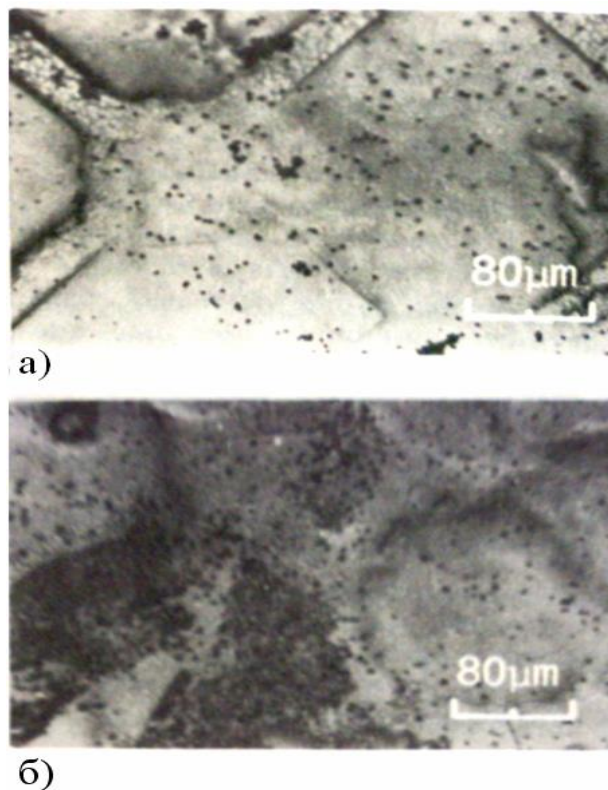


Рис. 5. Ямки травлення світловопромінюючої структури GaP до (а) та після (б) виникнення АЕ [49].

У роботах [11, 43-47] також було досліджено АЕ при струмовому навантаженні монокристалів кремнію та CdS. Виявлено, що в діапазоні 300...450 К під впливом постійного електричного струму інтенсивність сигналів АЕ зростає при збільшенні густини дислокацій. У роботах [11, 43-47] показано, що АЕ відгук дислокаційних зразків Si під впливом електричного струму виникає у випадку руху дислокацій, які переходять (фрагментами) в сусіднє метастабільне положення. При цьому відбувається дифузійне захоплення атомів домішки та її зміщення в нове положення [44].

6. ВИСНОВКИ

Показано, що метод акустичної емісії набув широкого застосування для неруйнівної діагностики та контролю процесів деградації, трансформації протяжних дефектів та релаксації напівпровідників і діодних структур при дії зовнішніх полів різної фізичної природи в режимі реального часу.

**A.I. Vlasenko, M.P. Kiselyuk, V.P. Veleschuk, Z.K. Vlasenko,
I.O. Lyashenko, O.V. Lyashenko
ACOUSTIC EMISSION OF SEMICONDUCTORS AND DIODE STRUCTURES
(REVIEW)**

Material on research of the acoustic emission phenomenon in semiconductors and dielectrics under the action of the external fields of different physical nature has been generalized. Particular attention has been given to the investigation of processes of defect formation and acoustic emission in semiconductor devices and light-emitting structures based on the A_3B_5 compounds, creation of acoustic emission express-method to control degradation and relaxation processes in the light-emitting structures in real time.

Keywords: acoustic emission, semiconductors, defect formation.

1. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий – М.: Изд. Стантартов, 1976.
2. *Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В.И. Артюхов, К.Б. Вакар, В.И. Макаров и др.; Под ред. К.Б. Вакара – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.*
3. *Гусев О.В.* Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. – М.: Наука, 1982.
4. *Калитенко В.А., Ляшенко О.В., Перга В.М.* Определение источников акустической эмиссии в композитном материале Си-ЭД-14 // *Механика композитных материалов (АН Латв. ССР).* – 1983. – № 4. – С. 751-753.
5. *Калитенко В.А., Кучеров И.Я., Перга В.М.* Акустическая эмиссия полупроводниковых приборов при протекании через них тока // *Изв. ВУЗ. Радиоэлектр.* – 1984. – 27, № 10. – С. 91-92.
6. *Калитенко В.А., Перга В.М., Саливонов И.Н.* Определение температур фазовых переходов титанатов бария и стронция методом акустической эмиссии // *ФТТ.* – 1980. – 22, № 6. – С. 1838-1840.
7. *Ляшенко О.В., Велещук В.П.* Акустична емісія світловипромінювальних структур на основі сполук A_3B_5 обумовлена постійним прямим струмом // *УФЖ.* – 2003. – 48, № 9. – С. 981-985.
8. *Kravtsov M.V., Lyashenko O.V., Onanko A.P.* Relaxation of defect structure in ultrasonic wave field and acoustic emission in LiF single crystals // *Functional materials.* – 2004. – 11, №2. – P. 353-355.
9. *Перга В.М.* Нові методи дослідження фізичних властивостей твердих тіл. Акустична емісія. Частина 1 та 2. – Київ: УМК ВО, 1991.
10. *Исследование акустической эмиссии полупроводниковых диодов / Д.А. Андрусенко, Г.И. Булах, Р.М. Бурбело и др. // Тез. докл. XV Всес. конф. Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела, ч. II. – Ленинград, 4-8 июня 1991. – С. 72-73.*
11. *Орлов А.М., Скворцов А.А., Фролов В.А.* Акустическая эмиссия в дислокационном кремнии при токовых и тепловых воздействиях // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – 25, № 3. – С. 28-32.
12. *Lord A.E., Mason W.* Acoustic Emission // *Physical Acoustics, New York.* – 1975. – XI. – P. 289-353.
13. *Акустическая эмиссия в наполненных полимерных композициях / Ю.С. Липатов, Т.Т. Тодосийчук, С.П. Чередниченко и др. // Докл. АН СССР.* – 1988. – 299, №6. – С. 1420-1423.
14. *ДСТУ 2374-94.* Розрахунки на міцність та випробування технічних виробів. Акустична емісія. – Київ. Держстандарт України, 1994. – С. 16.
15. *Otsuka H., Scarton H.A.* Variation in acoustic emission between graphite- and glass-epoxy composites // *J. Compos. Mater.* – 1981. – 15, № 5. – P. 591-597.

16. Ляшенко О.В. Акустоэлектрическое преобразование и акустическая эмиссия в композиционных и полупроводниковых структурах: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – Киев, 1997. – 139 с.
17. Акустоэмиссионный и акустоэлектронный контроль фазовых переходов в сегнетокерамике / В.А. Калитенко, В.Н. Лысенко, О.В. Ляшенко и др. // Электронная техника, сер. Материалы. – 1985. – № 7. – С. 44-46.
18. *Aparna D., Mallikarjun R.S.P.* Pattern Recognition of Acoustic Emission Signals from PZT ceramics [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – 7, № 9.
19. Виноградов А.И., Михайлов В.А., Хоник В.А. Акустическая эмиссия при гетерогенном и гомогенном пластическом течении металлического стекла // ФТТ. – 1997. – 39, № 5. – С. 885-888.
20. Олих Я.М. Акустическая эмиссия в халькогенидном стекле $Ge_{0.18}As_{0.28}Se_{0.54}$ // ФТТ. – 1998. – 40, № 9. – С. 1623-1626.
21. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. Акустическая эмиссия при деформации пористого железа // Письма в ЖТФ. – 2001. – 27, № 22. – С. 14-18.
22. Стоев П.И., Папиров И.И., Мощенок В.И. Акустическая эмиссия титана // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – № 1. – С. 15-22.
23. Лесковский А.М., Азимов Ш.Ш. Идентификация процессов трещинообразования и пластического деформирования в поликристаллическом цинке по удельной мощности сигналов акустической эмиссии // Письма в ЖТФ. – 1997. – 10, № 5. – С. 307-309.
24. Плотников В.А. Акустическая эмиссия при нагреве деформированного алюминия // Письма в ЖТФ. – 2001. – 27, № 15. – С. 27-32.
25. Деформация серебра в Bi-2223/Ag лентах по данным акустической эмиссии / Е.А. Дулькин, В. Бейлин, Е. Ячин и др. // Письма в ЖТФ. – 2002. – 28, № 12. – С. 1-4.
26. Тихонов Л.В., Прокопенко Г.И. Дислокационные механизмы деформации, разрушения и акустической эмиссии в алюминии и его сплавах // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 8. – С. 73-76.
27. Тихонов Л.В., Прокопенко Г.И., Ганопольский Ю.В. Влияние структурного состояния на акустическую эмиссию в алюминии и сплаве АМг6 // Металлофизика. – 1986. – 8, № 6. – С. 102-104.
28. Исследование процесса отжига сплава АМг6 с помощью акустической эмиссии / А.В. Козлов, Г.И. Прокопенко, В.А. Глыва и др. // Металлофизика. – 1991. – 13, № 8. – С. 101-104.
29. Плотников В.А. Акустическая эмиссия и динамическая релаксация нехимической энергии при мартенситных превращениях // Письма в ЖТФ. – 1999. – 25, № 13. – С. 15-22.
30. Перга В.М. Акустическая эмиссия и ее связь с электрическими шумами в полупроводниках и диэлектриках: дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.10. – Киев, 1987. – 303 с.
31. Акустическая эмиссия в монокристаллах при динамическом нагружении / В.А. Калитенко, И.Я. Кучеров, В.М. Перга и др. // ФТТ. – 1987. – 29, № 8. – С. 2499-2501.
32. Акустическая эмиссия, индуцированная ультразвуком в монокристаллах / В.А. Калитенко, О.А. Коротченков, И.Я. Кучеров и др. // УФЖ. – 1985. – 30, № 9. – С. 1358-1359.
33. Надточій А.Б., Ляшенко О.В., Островський І.В. Генерація акустичної емісії в монокристалах КСІ при дії деформації ультразвукової хвилі // Вісник Київського університету, сер. фіз.-мат. науки. – 1998. – № 4. – С. 343-348.
34. *Kravtsov M.V., Lyashenko O.V.* Acoustic emission caused by mechanical stress relaxation at oscillations of piezodielectric plates // Functional materials. – 2005. – 12, № 1. – P. 133-135.
35. Ляшенко О.В., Кравцов М.В. Акустична емісія, що супроводжує релаксацію механічних напруг при власних коливаннях пластин з $LiNbO_3$ // Структурна релаксація в твердих тілах. Зб. наук. пр. – Вінниця: ТОВ фірма “Планер”. – 2003. – С. 170-172.
36. Акустическая эмиссия на различных стадиях разрушения монокристаллических диэлектриков / В.А. Калитенко, И.Я. Кучеров, В.М. Перга и др. // ФТТ. – 1988. – 30, № 12. – С. 3677-3682.
37. Акустоэмиссия полупроводников при протекании электрического тока / В.А. Калитенко, И.Я. Кучеров, В.М. Перга // ФТП. – 1988. – 22, № 4. – С. 578-581.
38. *Lyashenko O.V., Perga V.M.* Acoustic emission for the diagnostic of semiconductor structures // Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials: MRS Proceeding II. – Boston, 1996. – 406. – P. 449-456.
39. Ляшенко О.В., Перга В.М., Тхорик В.А. Исследование корреляционных зависимостей акустической эмиссии, токовых и “оптических” шумов в светоизлучающих структурах на основе GaP // Сб. матер. XIV Всес. конф. по акусто-электронике и физической акустике твердого тела, ч. II. – Кишинев, 12-15 июня 1989. – С. 164-165.
40. Ляшенко О.В., Перга В.М., Тхорик В.А. Связь электрических шумов с акустической эмиссией в элементах оптоэлектроники // Тез. Докл. Координ. Совещ. Соц. стран по физ. пробл. оптоэлектроники. – Баку. – 1989. – С. 89.
41. Ляшенко О.В. Acoustic emission of semiconductor structures and devices // Вісник Київського університету, сер. фіз.-мат. науки. – 1998. – № 4. – С. 325-332.
42. Блонский И.В., Тхорик В.А., Цицилиано А.Д. Акустическая эмиссия в процессе лазерного отжига монокристаллов кремния // ФТП. – 1997. – 39, № 3. – С. 505-509.

43. Орлов А.М., Скворцов А.А., Фролов В.А. Изменение спектра акустической эмиссии дислокационного кремния при токовых и тепловых воздействиях // Письма в ЖТФ. – 1999. – **25**, № 21. – С. 51-58.
44. Орлов А.М., Скворцов А.А., Соловьев А.А. Акустоэмиссионное зондирование линейных дефектов в кремнии // ФТТ. – 2001. – **43**, №4. – С. 616-618.
45. Электростимулированное движение краевых дислокаций в кремнии при комнатных температурах / А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов и др. // ФТТ. – 2000. – **42**, № 11. – С. 1998-2003.
46. Акустическая эмиссия в сульфиде кадмия при токовых и тепловых воздействиях / А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.С. Насибов и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – **26**, № 22. – С. 36-43.
47. Влияние магнитного поля на акустическую эмиссию в дислокационном кремнии при токовых воздействиях / А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов и др. // ФТТ. – 2000. – **42**, № 10. – С. 1814-1817.
48. Скворцов А.А., Литвиненко О.В. Звуковое излучение, вызванное срывом и остановкой краевых дислокаций в изотропной среде // ФТТ. – 2002. – **44**, № 7. – С. 1236-1242.
49. Ikota T., Ogura M., Adachi Y. Acoustic-emission study of defects in GaP light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 1978. – **33**, № 5. – P. 414-415.
50. Велецук В.П. Акустична емісія в світловипромінюючих структурах на основі GaP, GaAs та GaN: дисс. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07. – Київ, 2008.
51. Ikota T., Ogura M., Adachi Y. Acoustic emission from single crystals of gallium arsenide // Proceeding Third Acoustic Emission Symposium, Tokyo. – 1976. – P. 329-341.
52. Ogura M., Adachi Y., Ikota T. Acoustic emission from gallium arsenide single crystals during deformation // J. Appl. Phys. – 1979. – **50**, № 11 (part 1). – P. 6745-6749.
53. Андреев В.Н., Пикулин В.А., Фролов Д.И. Акустическая эмиссия при фазовом переходе в монокристаллах полутораоксида ванадия // ФТТ. – 2000. – **42**, № 2. – С. 322-325.
54. Дулькин Е.А., Гавриляченко В.Г., Фесенко О.Е. Исследование фазовых переходов в антисегнетоэлектрических кристаллах $PbZrO_3$ и $PbHfO_3$ методом акустической эмиссии // ФТТ. – 1997. – **39**, № 4. – С. 740-741.
55. Саліонов І.М. Акустична емісія при фазових перетвореннях в надпровідних та сегнетоелектричних кераміках: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.07. – Київський університет. – Київ, 1996. – 19 с.
56. Акустическая эмиссия при полиморфных превращениях в теллуриде германия / О.Ш. Горишвили, С.П. Лалыкин, Н.С. Редька и др. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1981. – **17**, № 10. – С. 1756.
57. Steinberg J., Lord A.E. Acoustic emission generated at the glass transition in silicate glasses // J. Amer. Ceram. Soc. – 1980. – **63**, № 2. – P. 234-236.
58. Guyot M., Cagan V. The acoustic emission along the hysteresis loop of various ferro and ferrimagnets // J. Magn. Magn. Mater. – 1991. – **101**, № 1. – P. 256-262.
59. Орлов А.М., Скворцов А.А., Гончар Л.И. Магнитоимпульсное изменение подвижности дислокаций в пластически деформированном кремнии n-типа // ФТТ. – 2001. – **43**, № 7. – С. 1207-1210.
60. Влияние структурных границ раздела на статистику коррозионных микротрещин / В.И. Веттерген, А.Я. Башкарев, Г.И. Морозов и др. // ФТТ. – 2005. – **47**, № 10. – С. 1796-1798.
61. Vallen H. Vallen-Systeme GmbH. AE testing fundamentals, equipment, application [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
62. Uddin F., Ohtsu M. Application of AE to fracture toughness and crack analysis by BEM in concrete [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
63. Schubert F., Schechinger B. Numerical modeling of acoustic emission sources and wave propagation in concrete [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
64. Integrated interpretation and visualization of pull-out test using finite element modelling and quantitative acoustic emission analysis / F. Finck, C.U. Grosse, H.W. Reinhardt etc. // [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
65. Ohtsu M., Shigeishi M. Three-dimensional visualization of moment tensor analysis by SIGMA-AE [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
66. Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets / C.U. Grosse, H.W. Reinhardt, M. Motz, B.H. Kruplin // [Электронный ресурс]: NDT.net. Nondestructive testing – September 2002. – **7**, № 9.
67. Исследование физико-механических характеристик Al с помощью ультразвуковой ударной обработки / Г.И. Прокопенко, Т.В. Голуб, О.Н. Кашевская и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2006. – **28**, № 2. – С. 151-162.
68. Дулькин Е.А., Раевский И.П., Емельянов С.М. Акустическая эмиссия и тепловое расширение кристаллов $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ и $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3$ // ФТТ. – 2003. – **45**, № 1. – С. 151-155.
69. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
70. Бойко В.С., Кивишук В.Ф., Кривенко Л.Ф. Распределение дислокаций в движущемся скоплении и генерируемая им акустическая эмиссия // ФТТ. – 1984. – **26**, № 6. – С. 1625-1629.
71. Бойко В.С., Кивишук В.Ф., Кривенко Л.Ф. Условия регистрации импульсов акустической эмиссии, генерируемых при выходе на поверхность отдельных дислокаций // ЖЭТФ. – 1982. – **82**, № 2. – С. 504-508.

72. Бойко В.С., Кивишк В.Ф., Кривенко Л.Ф. Экспериментальное исследование звукового излучения при аннигиляции дислокаций в кристалле // ЖЭТФ. – 1980. – **78**, № 2. – С. 797-801.
73. Нацик В.Д., Чишко К.А. Звуковое излучение дислокаций, движущихся у поверхности кристалла // ФТТ. – 1978. – **20**, № 2. – С. 457-465.
74. Чишко К.А. Звуковое излучение при образовании трещины в неограниченной упругой среде и на поверхности упругого полупространства // ФТТ. – 1989. – **31**, №3. – С. 226-233.
75. Чишко К.А. Звуковое излучение при развитии сквозной трещины в пластине // ФТТ. – 1994. – **36**, № 8. – С. 2145-2153.
76. Чишко К.А. Дислокационный механизм излучения звука при развитии трещины в кристалле // ФТТ. – 1992. – **34**, № 3. – С. 864-869.
77. Чишко К.А. Акустическое излучение протяженных динамических источников внутренних напряжений, действующих у поверхности полубесконечной изотропной среды // Акустический журнал. – 1999. – **45**, № 4. – С. 553-561.
78. Нацик В.Д., Чишко К.А. Формулировка основной задачи теории акустической эмиссии для твердых тел с дисперсией и затуханием // Акустический журнал. – 1992. – **38**, № 3. – С. 511-519.
79. Чишко К.А. Теория акустической эмиссии дислокаций и трещин в кристаллах с внутренними и внешними границами: дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.07. – Харьков, 1994. – 302 с.
80. Lord A.E. Acoustic emission – an update // Phys. Acoust.: Princ and Meth., New York. – 1981. – **15**. – P. 295-360.
81. Тхорик В.А. Акустическая эмиссия в твердых телах, стимулированная динамическим нагружением и лазерным воздействием: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Киевский университет. – Киев, 1990. – 16 с.
82. Ляшенко О.В. Акустична емісія матеріалів зі складною структурою дефектів як детермінований хаотичний релаксаційний процес // Зб. наук. праць “Структурна релаксація в твердих тілах”. – 2006. – Вінниця: ТОВ “Планер”. – С. 29-31.
83. Ляшенко О.В. Моделювання динаміки акустичної емісії матеріалів // Вісник Київського університету, серія фіз.-мат. науки. – 2004. – № 3. – С. 20-23.
84. Акустична емісія при релаксації локальних термомеханічних напруг в процесі деградації світловопромінюючих гетероструктур на основі InGaN та GaAsP / В.П. Велешук, О.І. Власенко, О.В. Ляшенко, та ін. // УФЖ. – 2008. – **53**, № 3 – С. 240-246.
85. Еволюція спектрів електролюмінесценції і акустическая эмиссия эпитаксиальных структур GaAsP / В.П. Велешук, О.В. Ляшенко, Ю.О. Мягченко и др. // ЖПС. – 2004. – **71**, № 4. – С. 508-511.
86. Degradation of blue LEDs related to structural disorder / A.V. Kamanin, A.G. Kolmakov, P.S. Kor'ev etc. // physica status solidi (c). – 2006. – **3**, № 6. – P. 2129-2132.
87. Yanagisawa T., Kojima T. Degradation of InGaN blue light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations // Microelectronics Reliability. – 2003. – **43**, № 6. – P. 977-980.
88. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: Физмалит, 2008.
89. Guo X., Schubert E.F. Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates // J. Appl. Phys. – 2001. – **90**, № 8. – P. 4191-4195.
90. Guo X., Schubert E.F. Current crowding and optical saturation effects in GaInN/GaN light-emitting diodes grown on insulating substrates // J. Appl. Phys. Lett. – 2001. – **78**, № 21. – P. 3337-3339.
91. Кинетика и неоднородная инжекция носителей в нанослоях InGaN / Д.С. Сизов, В.С. Сизов, Е.Е. Заварин и др. // ФТП. – 2005. – **39**, № 2. – С. 264-268.
92. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // ФТП. – 2006. – **40**, № 1. – С. 122-127.
93. Влияние джоулевого разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов и др. // ФТП. – 2006. – **40**, №5. – С. 621-627.
94. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов и др. // ФТП. – 1999. – **33**, № 2. – С. 224-232.
95. Вплив нейтронного опромінення на характеристики світлодіодів $Al_xGa_{1-x}As$ / Ф.Ф. Сизов, Ю.Г. Гришин, С.І. Круковський та ін. // Доповіді НАН України. – 2009, № 5. – С. 87-93.
96. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN-светодиодов / Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов и др. // ФТП. – 2005. – **39**, № 7. – С. 829-833.
97. Туннельно-рекомбинационные токи и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN светодиодов / Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов и др. // ФТП. – 2005. – **39**, № 5. – С. 627-632.
98. Властивості подвійних гетеропереходів $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$, отриманих за різних технологічних режимів / С.І. Круковський, А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін та ін. // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка. – 2011. – Вып. 46. – С. 71-77.
99. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения будущего // Светотехника. – 2003. – № 3. – С. 2-7.

100. Сукач Г.А. Лазерно-стимулированное перемещение границы р-п перехода в прямозонных GaAsP структурах // ФТП. – 1997. – **31**, № 6. – С. 753-756.
101. Defect formation in CdTe during laser-induced doping and application to the manufacturing nuclear radiation detectors / V.A. Gnatyuk, T. Aoki, Y. Hatanaka etc. // phys. status solidi (c). – 2006. – **3**, № 4. – P. 1221-1224.
102. Влияние джоулевого разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов и др. // ФТП. – 2006. – **40**, № 5. – С. 621-627.
103. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение. – М.: Мир, 1988.
104. Ляшенко О.В. Акустична емісія матеріалів зі складною структурою дефектів як детермінований хаотичний релаксаційний процес // Зб. наук. праць “Структурна релаксація в твердих тілах”. – Вінниця: ТОВ “Планер”. – 2006. – С. 29-31.
105. Светодиоды и их применение для освещения. Под общ. ред. акад. АЭН РФ Ю.Б. Айзенберга – М.: Знак, 2012.
106. Acoustic-emission method of control of defects-formation process in light-emitting structures / O.V. Lyashenko, A.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, M.P. Kisseluk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2010. – Vol. 13, N 3. – P. 310-314.
107. Василенко Н.Д., Горбатюк А.Я. Образование микровключений матричного металла 3 группы в монокристаллах соединений A^3B^5 // УФЖ. – 1989. – **34**, № 4. – С. 618-623.
108. Процессы дефектообразования и их влияние на механические напряжения в структурах фосфида галлия зеленого свечения / Н.Д. Василенко, В.А. Краснов, А.Н. Крыжановский и др. // Изв. вузов. Физика. – 1991. – **34**, № 1. – С. 23-27.
109. Василенко Н.Д. Внутренние механические напряжения в эпитаксиальных структурах фосфида галлия // Изв. вузов. Физика. – 1983. – **26**, №1. – С. 122-124.
110. Берг А.А., Дин П.Д. Светодиоды. – М.: Мир, 1979.
111. Птащенко А.А. Деградація світлоізлучаючих діодів. Обзор // ЖПС. – 1980. – **33**, № 5. – С. 781-803.
112. Бойко В.С., Кривенко Л.Ф. Исследование акустической эмиссии, сопровождающей элементарные акты пластической деформации и разрушения твердых тел // ФТТ. – 1988. – **30**, № 3. – С. 716-723.
113. Синхронная регистрация перемещения дислокаций и генерируемого ими звукового излучения / В.С. Бойко, Р.И. Гарбер, В.Ф. Кившик и др. // ФТТ. – 1975. – **17**, № 5. – С. 1541-1543.
114. Экспериментальное исследование переходного излучения звука дислокациями при их выходе на поверхность / В.С. Бойко, Р.И. Гарбер, В.Ф. Кившик и др. // ЖЭТФ. – 1976. – **71**, № 2(8). – С. 708-713.
115. Кучеров И.Я., Ляшенко О.В., Перга В.М. Нелинейное преобразование акустических и электрических колебаний в р-п-переходах // УФЖ. – 1989. – **34**. – С. 222-224.
116. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – №4. – С. 6-10.
117. Влияние процесса плавления на акустический отклик соединений CdTe и GaAs при импульсном лазерном облучении / А. Байдуллаева, В.П. Велешук, А.И. Власенко и др. // ФТП. – 2008. – **42**, № 3. – С. 286-290.
118. Акустична емісія при неоднорідному термічному імпульсному впливі з утворенням рідкої фази / О.В. Ляшенко, В.П. Велешук, О.І. Власенко та ін. // СЕМСТ. – № 1. – 2009. – С. 36-41.
119. Способ контроля порога оптического пробоя твердых прозрачных материалов: А.с. 1503494 СССР, МКИ G01 №17/00 / В.А. Калитенко, В.К. Комарь, И.Я. Кучеров и др. (СССР). – № 4241362; Заявлено 26.03.87.
120. Acoustic monitoring method and system in laser-induced optical breakdown (LIOB). Авторы: М. O'Donnell, J.Y. Ye, T.V. Norris etc. Патент № 7367948 США. August 19, 2003.
121. Comparative study of evolution of laser damage in HgCdTe, CdTe, and CdZnTe with nanosecond 1.06- μ m wavelength multiple pulses / G. Amit, K. Avinashi, T.N. Kailash etc. // Proc. SPIE. – 2004. – **5273**. – P. 122-128.
122. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Механическое разрушение прозрачных твердых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника – 2002. – **32**, № 4. – С. 335-340.
123. Володин Б.Л., Емельянов В.И., Шлыков Ю.Г. Взрывное накопление точечных дефектов как механизм многоимпульсного разрушения поглощающих сред // Квантовая электроника. – 1993. – **20**, № 1. – С. 57-61.
124. Динаміка локально-фазових переходів, зумовлених інтенсивним лазерним випромінюванням // Л.В. Шмельова, С.М. Єжов, А.Д. Супрун та ін. // УФЖ. – 2006. – **51**, № 8. – С. 788-794.
125. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989.
126. Влияние УФ-облучения на температурную зависимость и фотоакустический отклик пористого кремния / Н.С. Башенко, И.В. Блонский, М.С. Бродин и др. // ЖТФ. – 2001. – **71**, № 1. – С. 66-70.
127. Динаміка розвитку поверхневих структур в кристалах р-CdTe при облучении імпульсним лазерним излучением / А. Байдуллаева, М.Б. Булах, А.И. Власенко и др. // ФТП – 2004. – **38**, № 1. – С. 26-29.
128. Hartan G. Semiconductor measurement technology: nondestructive tests used to insure the integrity of semiconductor devices with emphasis on acoustic emission techniques // International Advances in Nondestructive Testing. – New York, 1981. – **7**. – P. 105-179.

129. *Калитенко В.А., Кучеров И.Я., Перга В.М.* Акустическая эмиссия в NaCl под действием постоянного электрического поля // Тез. докл. XIII Всесоюз. конф. по акустоэл. и квант. акустике, ч. II. – Черновцы. – 1986. – С. 128-129.
130. *Акустическая эмиссия биполярных транзисторов в импульсном режиме / В.А. Бродовой, А.М. Воскобойников, А.Е. Лисенко и др.* // ФТП. – 1991. – **25**, № 4. – С. 624-627.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
41, проспект Науки, Київ, 03028 Україна

Отримано 23.04.2014

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
4, проспект Глушкова, Київ, 03680 Україна
E-mail: vvvit@ukr.net