

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

УДК 621.315.592.2; 534.27; 537; 679.826.

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЧИННИК АКУСТИЧНОЇ ДІЇ НА СТРУКТУРУ ДЕФЕКТНИХ КОМПЛЕКСІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

Я. М. Оліх¹⁾, О. Я. Оліх²⁾

¹⁾Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

²⁾Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЧИННИК АКУСТИЧНОЇ ДІЇ НА СТРУКТУРУ ДЕФЕКТНИХ КОМПЛЕКСІВ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

Я. М. Оліх¹⁾, О. Я. Оліх²⁾

Анотація. За характером дії акустичної хвилі (АХ) та за функціональними можливостями застосування відомі акустостимульовані (АС) ефекти в напівпровідникових кристалах розділено на три класи: а) динамічні, які спостерігаються в процесі акустичного навантаження зразка і є результатом генерації та переорієнтації дефектів кристалу деформаційним полем АХ; б) залишкові АС ефекти, які досягаються тривалою (10^2 – 10^4 с) акустичною обробкою зразка і є наслідком АС дифузії точкових дефектів; в) інформаційні, які виникають при одночасній з АХ дії на зразок іншого високоенергетичного агента; роль АХ зводиться до інформаційної модуляції процесів релаксації нерівноважної структури дефектів. З позицій синергетики дисипативних структур розглянуто характерні прикмети та умови реалізації інформаційного чинника дії АХ на структуру дефектів кристала.

Ключові слова: акустичні хвилі, акустостимульовані ефекти, напівпровідник, синергетика

INFORMATION FACTOR OF ACOUSTIC INFLUENCE ON STRUCTURE OF IMPERFECT COMPLEXES IN SEMICONDUCTORS

Ya. M. Olikh¹⁾, O. Ya. Olikh²⁾

Abstract. The known acoustostimulated (AS) effects in semiconductor crystals are divided into three classes for the nature of the acoustic wave (AW) action and for the functionality: a) the dynamic, they observed under sample acoustic loading condition and are result of the generation and reorientation of crystal defects under AW deformation field influence; b) the residual AS effects, they reached by a long (10^2 – 10^4 s) acoustic treatment of the sample and are the consequence of AS diffusion of point defects; c) the informational, that arise under condition of the simultaneous action of AW and other high-energy agent; the AW role is the information modulation of the relaxation of a defects nonequilibrium structure. The characteristic signs and conditions of the AW action infor-

mation factor implementation are considered on base of dissipative structures synergetics point of view.

Keywords: acoustic waves, acoustostimulated effects, semiconductor, synergetics

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ФАКТОР АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ ДЕФЕКТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Я. М. Олих¹⁾, О. Я. Олих²⁾

Аннотация. По характеру действия акустической волны (АВ) и по функциональным возможностям применения известные акустостимулированные (АС) эффекты в полупроводниковых кристаллах разделено на три класса: а) динамические, которые наблюдаются в процессе акустической нагрузки образца и являются результатом генерации и переориентации дефектов кристалла под действием деформационного поля АВ; б) остаточные АС эффекты, которые достигаются длительной (10^2 – 10^4 с) акустической обработкой образца и являются следствием АС диффузии точечных дефектов; в) информационные, которые возникают при одновременном с АВ действии иного высокоэнергетического агента; роль АВ сводится к информационной модуляции процессов релаксации неравновесной структуры дефектов. Из позиций синергетики диссипативных структур рассмотрены характерные приметы и условия реализации информационного фактора действия АВ на структуру дефектов кристалла.

Ключевые слова: акустические волны, акустостимулированные эффекты, полупроводник, синергетика

1. Вступ

Універсальним агентом енергетичного та, як буде показано нижче, інформаційного впливу на речовину в будь-якому її фазовому стані можуть бути акустичні хвилі (АХ). Дійсно, завдяки великій різноманітності мод, широкому частотному діапазону і всепроникаючому характеру їх поширення [1], надзвичайно значному обсягу можливого інформаційного насичення, АХ є універсальним засобом керування електронними процесами в напівпровідниках [2–3]. В оглядовій статті [3] нами було розглянуто ряд можливих застосувань акустостимульованих (АС) ефектів в сенсорній електроніці: покращення вихідного матеріалу сенсора, збільшення стабільності та довговічності робочих характеристик, розширення діапазону їх функціональних можливостей. Вважається, що основний механізм дії АХ на властивості напівпровідникового кристала зводиться до додаткового енергетичного впливу через теплові (зменшення енергетичних бар'єрів і збільшення рухливості окремих точкових дефектів) та деформаційні (механічне упорядкування дефектних диполів в полі АХ і зростання взаємодії між ними) механізми і відмінність акустодефектної взаємодії

(АДВ) у різних експериментальних умовах визначається ефективністю поглинання відповідним об'єктом твердого тіла — точковим дефектом, кластером, дислокацією тощо, — саме енергії АХ. Проте, у багатьох випадках конструктивним і доповнюючим до відомих механізмів АДВ може стати принципово інший підхід, який розглядається у даній роботі.

Мета роботи. 1) Показати, що у багатьох практичних випадках визначальним механізмом впливу АХ на структуру домішково-дефектних комплексів кристалу стає інформаційний; 2) узагальнити характерні передумови та прикмети реалізації інформаційного чинника дії АХ для різних експериментальних ситуацій.

2. Узагальнена систематика акустостимульованих явищ

Аналізуючи весь спектр існуючих експериментальних результатів по дослідженню АС явищ у напівпровідниках [4–20] (за характером дії АХ та способом її виявлення, за функціональними можливостями застосування) їх можна розділити на три відмінні класи (Таблиця 1):

1) Динамічні, які викликаються АХ і спостерігаються лише в процесі акустичного навантаження зразка. Основний механізм впливу в цьому випадку — генерація та переорієнтація дефектів кристалу деформаційним полем АХ.

2) Залишкові або технологічні АС ефекти, які досягаються тривалою (10^2 – 10^4 с) акустичною обробкою зразка (в літературі часто вживається термін ультразвукова обробка -УЗО) і є наслідком АС дифузії точкових дефектів.

Таблиця 1

Узагальнена систематика акустостимульованих явищ у напівпровідникових кристалах

Клас явищ	Інтенсивність АХ, Вт.м ⁻²	Функціональні можливості та застосування	Головний чинник дії та мікроскопічний механізм взаємодії	Характер дії та способи її виявлення	Приклади АС ефектів	Література
Акустодинамічні (In situ)	10^2 - 10^4	Нові акустoeлектричні та акустооптичні ефекти	Деформаційне поле АХ Генерація та переорієнтація дефектів	Оборотний В процесі дії	Акустолюмінісценція	[2] [2,11] [11] [18] [19] [8]
		Методика дослідження фундаментальних параметрів			Акустохол Кінетика АП в Si	
		Керування динамічними характеристиками пристроїв			Підвищення ККД сонячних елементів	
Технологічні (Ultra-sound treatment)	10^3 - 10^5	Покращення та стабілізація параметрів матеріалу	Енергія Дифузія атомів	Залишковий Як в процесі, так і після обробки	УЗО CdHgTe УЗО ZnCdTe	[11] [4] [12]
		Відновлення характеристик радіаційно-деградованих пристроїв			Термоакустичний відпал γ -опромінених СЕ	
Інформаційні (Information Ultra-sound)	10^1 - 10^3	Упорядкування (модуляція) просторово-динамічної матриці об'єму	Інформація Просторова та спектральна структуризація	Структурна пам'ять При наступних технологічних діях	Акустоїонна імплантација Si _{0.8} Ge _{0.2} Нанокластери Cu в SiO ₂ Нанокластери Si в SiO ₂	[7,9] [15] [16] [10] [17]
		АС самоорганізація			НЧ коливання ЕЛ в GaP	
		Селективне кодування процесів релаксації			Термоакустичний відпал РД в InP	

3) Інформаційні АС ефекти, які виникають лише при умові дії на зразок одночасно з АХ також іншого, більш енергетичного агента; наприклад, при радіаційному і лазерному опроміненні, імплантації йонів тощо. Роль АХ в цих ситуаціях є особливою, інтелектуальною і зводиться до інформаційної модуляції процесів релаксації енергетично збуреної нерівноважної структури дефектів та утворення просторово-динамічної матриці об'єму, яка може запам'ятовуватися і реалізовуватися вже при наступних технологічних операціях. При-

чому, результат дії в останньому випадку мало залежить від інтенсивності АХ, а, в основному, визначається станом дефектів кристала (ДК). Ознаками того, що в структурі ДК відбувається процес організуючий (самоорганізуючий) служать: а) наявність часово-тривалих змін фізичних параметрів напівпровідника, які супроводжують як процес увімкнення акустичного навантаження, так і його вимикання; б) відмінність шляхів релаксації системи ДК при дії АХ та при її відсутності; в) відмінність проміжних стаціонарних станів у цих випадках.

3. Характерні риси синергетичності акустостимульованих явищ

Інформаційний чинник дії акустичної хвилі.

Трансформація інформації у речовину відбувається через тривале накопичення структурних змін шляхом модуляції акустичною хвилею загального просторово розподіленого деформаційного поля кристалу, створеного ґраткою та її дефектами. Роль інформаційного чинника зводиться до: а) «нав'язування» фази когерентності перебудови ДК по всьому об'єму зразка; б) обміну інформацією про стан ДК в результаті складання поля АХ з полем напружень окремих дефектів кристала. Механізм цього процесу — через генерацію акустичних імпульсів при кожному акті зміни стану дефекту та збурення при цьому фонного спектру кристала в цілому (модуляція хвильових функцій та енергетичного спектру компонент ДК).

Передумови нерівноважності ДК. Фактично АС ефекти у напівпровідниках є результатом АС релаксації термодинамічної нерівноважності ДК (далі в тексті — просто нерівноважність), яка існує в кристалі на момент дії АХ. При певних обставинах ДК в кристалі проявляє всі риси дисипативної відкритої системи [21–23]. Отже, у відповідності з загальними принципами синергетики виникають умови для реалізації в системі процесів самоорганізації [24–25]. Дійсно, при акустичному навантаженні напівпровідника здійснюється зовнішнє надходження в кристал не тільки енергії, але й інформації; самоузгодженість мікрооб'єктів системи формується динамічними зв'язками між ними, носіями яких також є АХ. Стосовно умови щодо необхідності певного порогового (критичного) рівня нерівноважності, то на практиці можуть реалізовуватися різні варіанти його досягнення (див. нижче). У відповідності з наведеною в Таблиці 1 систематикою АС явищ джерела (мотиви) нерівноважності ДК можна поділити на наступні класи:

а) «Акустодинамічна нерівноважність», що викликається дією інтенсивної АХ безпосередньо, причому не тільки в підсистемі дефектів, але, ймовірно, і у інших системах колективних енергетичних збуджень кристалу — електронів, екситонів тощо. Такими є окремі динамічні АС ефекти, що спостерігаються в процесі акустичного навантаження: акустолюмінісценція [2], осциляції струму та світіння електролюмініс-

ценції [2, 10], акустоелектрична поляризація [11] та інші.

б) «Внутрішня нерівноважність», яка виникає при попередніх технологічних операціях та існує в зразку на момент акустичної дії. У випадку подібної «замороженої нерівноважності» АХ виконує функцію «пускового гачка» релаксації. Цей випадок найбільш широко досліджений в багатьох роботах по вивченню залишкових АС змін характеристик матеріалів і готових напівпровідникових пристроїв при їх УЗ обробках та акустовідпадах [2, 4–6, 12, 17, 20] .

в) «Зовнішня нерівноважність», що вноситься в кристал завдяки надходженням енергії або речовини. Наприклад, приповерхнева область напівпровідникового зразка в процесі його високоенергетичного (не акустичного) опромінювання в умовах додаткового акустичного навантаження — акустойонна імплантація, радіація, лазерне опромінення [7, 13–16].

4. Експериментальні приклади реалізації інформаційного чинника дії АХ

У відповідності з наведеним вище аналізом можливих причин нерівноважності ДК, який цілком відповідає наведеній систематичі АС явищ у напівпровідниках, розглянемо окремі експериментальні результати.

4.1. «Зовнішня нерівноважність», викликана акустойонною імплантацією (АЙІ).

Найбільш наочно, на наш погляд, ефекти АС самоорганізації ДК демонструють ситуації, які реалізуються при дії АХ в процесі високоенергетичного опромінювання твердого тіла. Очевидно, що у всіх випадках АЙІ ми маємо справу з відкритою системою, яка обмінюється з оточенням як енергією, так і речовиною. В результаті додаткової дії зовнішньої АХ відбувається лише певне «коригування» структури ДК в цілому по зразку. Причому, дія АХ не виявляється в процесі імплантації, а є, фактично, відкладеною. Тобто, характеристики імплантованих шарів — просторові профілі домішок та дефектів, карта механічних напружень тощо - для зразків, отриманих при дії АХ та без, фактично не відрізняються (див. рис. 1–3), а всі відмінності проявляються тільки після відпаду. Ці приклади демонструють, в першу чергу, саме інформаційний характер дії АХ в процесі АЙІ.

АС звуження профілю імпантованого бору B^+ в Si [13]. На рис.1 наведено профілі розподілу атомів бору, імпантованого в зразки кремнію; причому, як під час дії АХ, так і за її відсутності. Видно, що наступний відпал (900°C) у зразках, що були імпантовані без АХ, призводить до зміщення хвостової частини профілю розподілу атомів бору (крива 3) в глиб зразка. В той же час, хвостова частина профілю розподілу бору в зразках, що були імпантовані при дії АХ, — залишається практично незмінною навіть при відпалі (крива 4). Правдоподібно, що в результаті акустичної дії в процесі ІІ в кристалі утворилася структура ДК дещо відмінна ніж ДК у випадку ІІ без АХ. Причому, як бачимо з рис.1, ця відмінність не стосується імпантованих атомів бору, але помічається як результат записаної таким чином інформації про дію АХ вже при наступних (через тривалий час) відпалах.

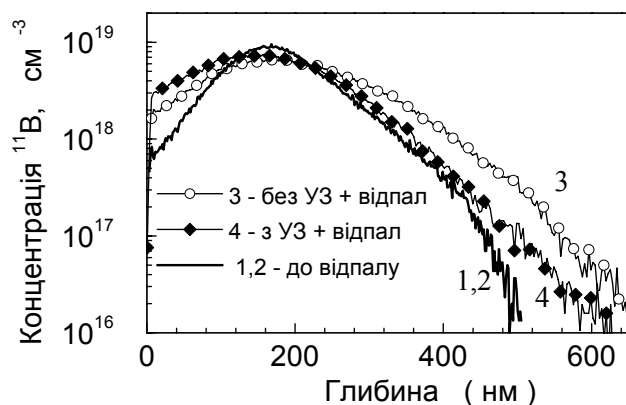


Рис. 1. ВІМС профілі розподілу домішок «В» в Si, імпантованих без дії АХ (криві 1,3) та при дії АХ (2,4). Криві 1,2 — до відпалу; 3,4 — після відпалу [13]

Прискорена релаксація механічних напруг в плівках SiGe/Si при імпантації йонів He [14]. На рис.2 наведені рентгенівські дифракційні криві відбиття для зразків епітаксійних структур $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$, в які були імпантовані йони He; причому теж одночасно як при дії АХ, так і без АХ. З порівняння кривих 2 і 3 (до відпалу) та 4 і 5 (після відпалу при 750°C) видно, що дія АХ стимулює ефективну релаксацію механічних напруг — зсув кривих вправо. Якщо для невідпалених зразків напруги на межі епітаксійних шарів не відрізняються, то вже після відпалу ця відмінність (зменшення напруги для акусто-йонно імпантованих зразків) стає досить-таки помітною. Отже, інформація про вплив АХ при

імпантації зберігається в пам'яті структури і виявляється вже після відпалу.

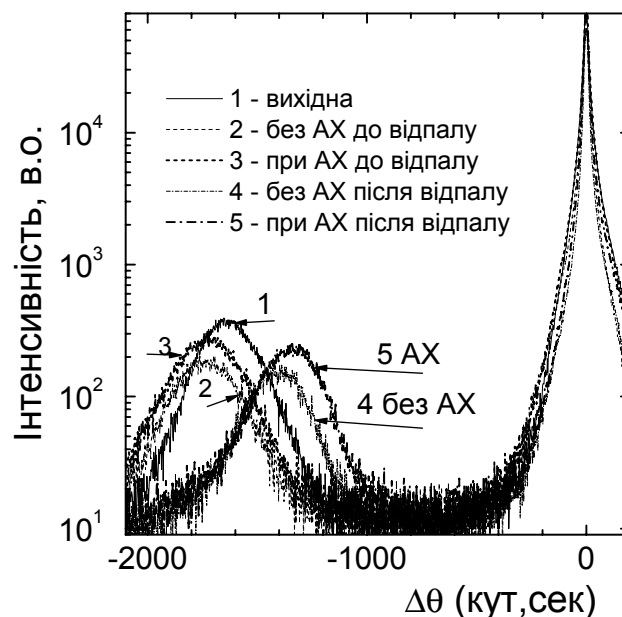


Рис. 2. Рентгенівські дифракційні криві відбиття для структур $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}/\text{Si}$. [14]

АС формування нанокластерів. Принципово важливі результати впливу АХ на формування нанокластерних (НК) структур отримані в роботах [15–16]. Результати — зменшення порогової дози для утворення НК та збільшення середнього діаметру НК, — теж спостерігаються вже після відпалу. На рис.3 наведена серія ТЕМ-мікрофотографій поперечного розподілу НК міді в SiO_2/Si . Видно, що процес формування (процес самоорганізації) НК міді в зразках SiO_2/Si , відбувається при відпалах, а інформація про дію АХ зберігається тривалий час.

4.2. Відпал радіаційних дефектів

Ситуація, що відповідає випадку «замороженої нерівноважності» реалізується при відпалах радіаційних дефектів в умовах дії АХ. Тут роль зовнішнього енергетичного збудження виконує температура відпалу, а джерелом нерівноважності є сама структура радіаційних дефектів. Приклад подібної реалізації одержано в [17], де досліджувався вплив УЗ на відпал радіаційних дефектів в зразках електронно-опроміненого InP (рис.4). Видно, що неперервна у відсутності АХ стадія відпалу ($100\text{--}300^\circ\text{C}$) в умовах дії АХ розщеплюється на дві підстадії: ($100\text{--}140^\circ\text{C}$) та ($160\text{--}220^\circ\text{C}$), відповідно, і спостерігається зсув кривої відпалу в бік нижчих температур. Харак-

терним проявом АС самоорганізації структури ДК є відмінність як шляхів релаксації системи (відпал при дії АХ — крива 2, і без дії — крива 1, відповідно), так і кінцевих стаціонарних станів.

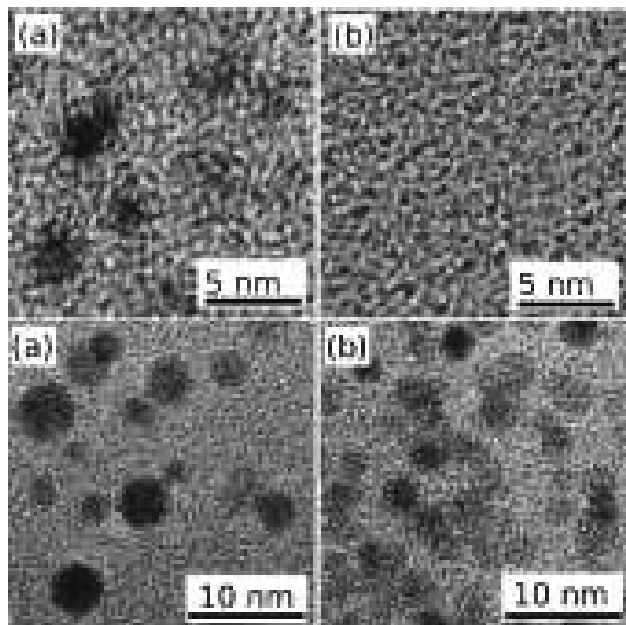


Рис. 3. ТЕМ Cu-імплантованих (50 keV) зразків SiO_2/Si (товщина 100nm) після відпалу (700°C , 20 хв). Зразки (a) — імплантовані зі АХ (9 МГц), зразки (b) — без АХ. Верхні фото — доза $1 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-2}$, нижні — $5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-2}$. [15]

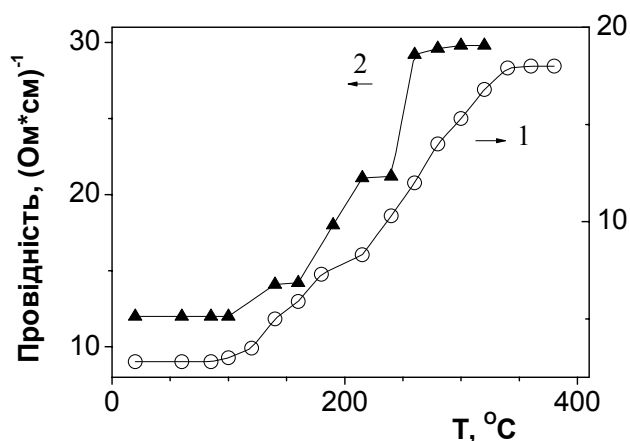


Рис. 4. Залежність величини електроопору від температури відпалу зразків InP (після опромінювання електронами 1MeV, доза 10^{18}cm^{-2}). Крива 1 отримана при відпалі зразка без АХ, крива 2 — в умовах акустичного навантаження (5 МГц, 10^3Вт/м^2). [17]

4.3. Акустодинамічна нерівноважність

АС перебудова метастабільних дефектів. Інший приклад «наведеної акустичної пам'яті» спостерігається при температурних досліджен-

нях електрофізичних характеристик радіаційно опромінених зразків кремнію та германію [18, 19]. Визначальними для концентрації вільних носіїв у цих зразках є глибокі рівні, утворені радіаційними дефектами. За певних умов окремі ДК проявляють метастабільний характер і стають чутливими до дії АХ. Ми вважаємо, що АС ефекти колективної перебудови метастабільних компонент ДК умовно теж можна визначити як ефекти самоорганізації. На користь таких міркувань вказують довготривалість процесів релаксації та пам'ять структури дефектів зразка про попередні етапи його УЗ обробки, що проявляється, наприклад, через температурний гістерезис холлівських електрофізичних характеристик.

НЧ коливання електролюмінесценції в світлодіодах GaP. Одним з виявів синергетичності системи ДК, як відомо, є поява коливань фізичних характеристик в процесі релаксації [21, 23]. Подібні коливання струму на ВАХ та відповідні осциляції інтенсивності світіння електролюмінесценції (рис.5) спостерігалися в процесі довготривалих акустичних навантажень світлодіодів GaP [10]. Виникнення таких НЧ автоколивань пояснюється в рамках екситонного механізму. В результаті дії АХ екситони стають рухливими і можуть захоплюватися у локалізовані екситонні стани з більш низькою енергією, при цьому зростає тривала компонента релаксації. Існування складного дефекту структури утвореної близько розташованими дискретними рівнями створює передумови виникнення автоколивального процесу. Подібні коливання можна тлумачити як прояв синергізму, що має часово-просторовий характер.

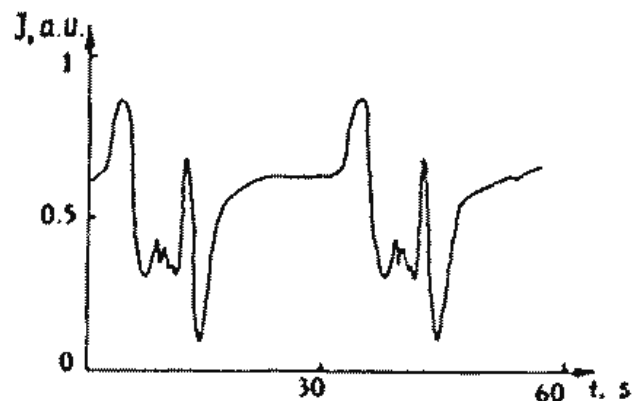


Рис. 5. НЧ коливання інтенсивності світіння електролюмінесценції світлодіодів GaP при 77K в залежності від тривалості акустичної дії. [10]

5. Висновки

Для когерентної поведінки нерівноважної системи ДК кристалу крім привнесення ззовні певної енергії для ініціації початку перебудови і утворення специфічних динамічних зв'язків всередині системи необхідне також введення в систему інформації, що організовує цю перебудову. АХ сприяють реалізації цих всіх трьох необхідних чинників: 1) забезпечують енергетичний внесок і знижують поріг; 2) служать носієм внутрішніх, у тому числі і зворотних, зв'язків між елементами системи; 3) виконують роль синхронізуючого чинника, що сприяє когерентній поведінки елементів ДК.

Виявляється, що для досягнення позитивного результату (тут перебудови ДК) абсолютно не обов'язково діяти на кожен окремо взятий атом або вузол ґратки; необхідно вибрати відповідний найбільш ефективний фізичний агент дії — інформаційний посередник. Наприклад, на стадії збурення привнесена акустична інформація трансформується в певне упорядкування (механічне, статистичне, електричне, спінове і т. д.) будь-якої системи колективних енергетичних збуджень кристалу, що енергетично «під силу» слабкій зовнішній дії і система запам'ятовує цю інформацію. На стадії релаксації ДК відбувається передача результатів отриманої та переробленої інформації вже безпосередньо до точкових дефектів та їх комплексів, «записана» інформація вичитується і використовується для коригування самого процесу релаксації. Поясненням АХ дії в цьому випадку може бути механізм акустичного впорядкування на резонансній частоті однієї з мод власних коливань або обертань структурних утворень середовища; АХ виконує роль просторово-динамічної матриці, що організовує синхронні рухи структурних утворень (молекул, кластерів, ґратки) середовища.

Отже, закодувавши певну інформацію, можна здійснювати дію на різні процеси в твердому тілі селективним чином. В такому значенні дія АХ має інформаційно-технологічний характер і використання цього чинника надає додаткової можливості для керування процесами релаксації та самоорганізації ДК, як, наприклад, і світловим полем [24]. Важливо відзначити, що в результаті тривалої дії АХ відбувається не тільки накопичення в системі зовнішньої інформації, але і зростання ефективності погли-

нання енергії зовнішнього поля внаслідок просторової самоорганізації системи, викликаної тим же полем.

Робота виконана за часткової підтримки Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали», проект № 3.5.1.30.

Список літератури

1. Ультразвук. Маленькая энциклоп. Под. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. Энциклоп., 1979.
2. Островский И. В. Акустолуминисценция и дефекты кристаллов. — К.: Вища школа, 1993. — 223с.
3. Olikh Ja. M., Olikh O. Ya.. Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics // Сенсорна Електроніка і Мікросистемні Технології. — 2004, № 1, С. 19–29
4. Бабенцов Б. Н., Горбань С. И., Городецкий И. Я., Корсунская Н. Е., Раренко И. М., Шейкман М. К. Влияние УЗ обработки на экситонную и примесную люминесценцию CdTe// ФТП. — 1991. — Т.25, № 7. — С.1243–1245.
5. Баранский П. И., Беляев А. Е., Комиренко С. М., Шевченко Н. В. Механизм изменения подвижности носителей заряда при ультразвуковой обработке полупроводниковых твердых растворов // ФТТ. — 1990. — Т. 32, — № 7. — С. 2159–2161.
6. Ostapenko S., Bell R. US stimulated dissociation of Fe-B pair in silicon // J. Appl. Phys. — 1995. — Vol. 77, N10. — P. 5458–5460.
7. Мачулін В. Ф. Акустoeлектронні та акустoйонні технології/ В. Ф. Мачулін, Я. І Лепіх, Я. М. Оліх., Б. М. Романюк //Ж. Вісник НАН України. — 2007. — № 5. — С.3–8.
8. Олих О. Я. Изменение активности рекомбинационных центров в кремниевых р-п-структурах в условиях акустического нагружения// ФТП. 2009, 43, 774–780.
9. Оліх Я. М. Вплив ультразвуку на формування домішково-дефектної структури кремнію в процесі йонно-променевої імплантації //Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. — 2010. — № 1 (27). — С.124–130.
10. Гонтарук О. М., Мачулін В. Ф., Оліх Я. М., Корбутяк Д. В., Корбут Е. В., Тартачник В. П.. Деградиационно-релаксационные явления в светолучающих р-п структурах на основе фосфида галлия, стимулированные УЗ// Письма в ЖТФ, 1998, — Т. 24, № 15, — С.64–68.
11. Любченко А. В., Олих Я. М.. Электрические эффекты, стимулированные колебательной деформацией, в $Cd_xHg_{1-x}Te$. //Физика твердого тела. — 1985. Т.27, в.8, стр. 2505–2506.

12. Оліх О. Я. Особливості впливу нейтронного опромінення на динамічну акустодефектну взаємодію у кремнієвих сонячних елементах // *Ukrainian Journal of Physics*. — 2010, Vol.55, N 7, p.769–775.
13. Krüger D., Romanyuk B., Melnik V., Olikh Ja., and Kurps R. Influence of in-situ ultrasound treatment during ion implantation on amorphization and junction formation in silicon. // *J. Vac.Sci.Technol.* — 2002. V B20, N 4, p.1–4.
14. Romanyuk B., V. Kladko, Ya.Olikh, et al. Enhanced relaxation of SiGe layers by He implantation supported by in situ us treatments// *Mater. Sci. in Semicond. Processing*, - 2005, 8 (4), pp.171–175.
15. Romanyuk A., Oelhafen P., Kurps R., Melnik V. Use of ultrasound for metal cluster engineering in ion implanted silicon oxide // *Appl. Phys. Lett.* — 2007, v.90, pp. 013118.
16. Light emission from nanocrystalline silicon clusters embedded in silicon dioxide: Role of the suboxide states/ Romanyuk A., Melnik V., Olikh Ya., et.al. // *Journal of Luminescence*. — 2010. — V.130. — № 1. — P.87–91.
17. Olikh Ya.M., Tartachnik V. P., Tichyna I. I., Vernidub R. M. Thermoacoustic annealing of radiation-induced defects in indium-phosphide crystals // *The proceeding of 5th conference «Acoustoelectronics' 91»*. — Varna (Bulgaria). — 1991. — P. 95–96.
18. Оліх Я. М., Савкіна Р. К. Акустостимульований зсув температури інверсії знака коефіцієнта Холла у радіаційно-легованих кристалах германію // *Український фізичний журнал*. — 1997. — Т.42, № 11–12. — С.1385–1389.
19. Олих Я. М., Н. Д. Тимочко. Прямое наблюдение релаксации проводимости в гамма-облученном кремнии под влиянием импульсов ультразвука // *Письма в Журнал техническ. физики*. — 2011. — Т.37. — В. 1. — С. 78–84.
20. Венгер Е. Ф., Ермолович И. Б., Миленин В. В., Конакова Р. В., Чайка Г. Е. Влияние внешних радиационных, СВЧ- и механических возбуждений на образование дефектов в неметаллических кристаллах // *Вопросы атомной науки и техники*. — 1999. — В. 3 № 75. — С. 60–72.
21. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — Москва: Мир, 1979.
22. Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л., Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // *УФН*. — 1999. — Т.169. — В. 1. — С.7–38.
23. Сугаков В. Й. Основы синергетики. — Київ: Обереги, 2001.
24. Слабко В. В., Хачатрян Г. Г., Александровский А. С. Управляемая внешним световым полем самоорганизованная агрегация малых металлических частиц // *Письма в ЖЭТФ*. — 2006. — Т.84. — В.6. — С.360–364.
25. Бушуева Г. В., Зиненкова Г. М., Тяпунина Н. А., Дегтярев В. Т., Лосев А. Ю., Плотников Ф. А. Самоорганизация дислокаций в ультразвуковом поле // *Кристаллография*. — 2008. — Т.53. — В.3. — С.507–511.