

Я.М. Оліх

ПРО АКУСТОСТИМУЛЬОВАНУ САМООРГАНІЗАЦІЮ ДЕФЕКТНО-ДОМІШКОВИХ СТРУКТУР НАПІВПРОВІДНИКА В ПРОЦЕСІ ЙОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

Коротко проаналізовано основні механізми дії акустичної хвилі (АХ) при іонній імплантації на перерозподіл домішок і дефектну структуру напівпровідникового кристала. На експериментальних прикладах показано, що здебільшого дія АХ не виявляється в процесі імплантації, а є відкладеною. Роль АХ в окремих експериментальних умовах є особливою, інтелектуальною, і зводиться до інформаційної модуляції процесів релаксації енергетично збудженої нерівноважної структури дефектів та утворення просторово-динамічної матриці об'єму, яка може запам'ятовуватися. Запропоновано доповнити традиційні механізми дії АХ на процеси релаксації структури дефектів кристала інформаційним з урахуванням реалізації дисипативного резонансу в системі домішково-дефектної структури, механізм якого забезпечує не тільки накопичення зовнішнього акустичного збурення з часом, а й стимулює просторову самоорганізацію точкових дефектів напівпровідникового кристала.

Ключові слова: ультразвук, напівпровідник, іонна імплантація, самоорганізація точкових дефектів.

ВСТУП

З метою подальшого вдосконалення технології мікро- і наноелектроніки продовжується пошук нових підходів та прийомів. Одним з невід'ємних сучасних елементів таких розробок є використання колективних (групових) методів одночасної обробки всієї системи створюваних елементів на принципах їх самоорганізації і самокорекції [1]. Дійсно, технологічні операції, в процесі яких використовується високоенергетичні сторонні впливи, а саме вирощування кристалів, відпал, легування, формування $p-n$ -переходу тощо, власне і визначають властивості напівпровідникових пристроїв. Успішному вдосконаленню традиційних технологічних процесів сприяють: 1) збуджений стан домішково-дефектної структури (ДДС) кристала під час таких операцій; 2) залежність результату релаксації ДДС від зовнішніх умов — температури, електричних та магнітних полів, а також від акустичного поля.

Унаслідок великої різноманітності мод акустичних хвиль (АХ), широкого частотного діапазону і всепроникного характеру їх поширення, надзвичайно великого обсягу можливого інформаційного насичення, АХ — універсальний засіб керування параметрами кристалів [2, 3]. Вважається, що головний механізм впливу АХ на властивості напівпровідникового кристала зводиться до додаткового енергетичного впливу через теплові та деформаційні механізми і відмінність акустодфектної взаємодії (АДВ) у різних експериментальних умовах визначається ефективністю поглинання відповідним об'єктом твердого тіла — точковим дефектом, кластером, дислокацією тощо — саме енергії АХ. Водночас можливості акустичного, відносно слабкого, впливу на енергетично збурену ДДС кристала, що знаходиться в термодинамічно-нерівноважному стані, який виникає, наприклад, при радіаційному і лазерному опроміненні, залишаються маловивченими. Важливими для розуміння таких механізмів дефектоутворення в кристалах є дослідження результатів іонно-променевої імплантації при одночасній дії інтенсивних АХ [4]. Проте, незважаючи на широкий перелік виявлених

© Я.М. Оліх, 2013

акустостимульованих (АС) ефектів та отриманих практичних результатів [5–8], акустоіонна імплантація (АЙІ) залишається «екзотичним» технологічним методом. Поряд з певними методичними труднощами, головною причиною невикористання АЙІ є відсутність загального теоретичного опису процесів АДВ. Основні результати досліджень АЙІ узагальнено в оглядових працях [4, 5]. Детальніший аналіз можливих механізмів наведено у [6, 7], але низка проблемних питань ще потребує додаткового вивчення.

Мета цієї праці — подальший аналіз основних механізмів АС-явищ та обґрунтування необхідності нового підходу до АС-явищ при АЙІ — врахування впливу АХ з погляду дисипативного резонансу, механізм якого забезпечує не тільки накопичення зовнішнього акустичного збурення з часом, а і стимулює просторову самоорганізацію системи точкових дефектів напівпровідникового кристала [1]. У таблиці наведено основні експериментальні результати впливу АХ [4–8].

1. АКУСТОДИНАМІЧНІ ЕФЕКТИ ПРИ АЙІ

1.1. АС звуження профілю імплантованого в силіцій. Встановлено, що відпал силіцієвої структури, імплантованої без акустичного навантаження, призводить до розширення профілю розподілу бору в глибину зразка. Водночас профіль при дії АХ залишається незмінним навіть після відпалу. Запропоновано загальну модель, згідно з якою під впливом АХ відбувається АС видалення з області імплантації міжвузлових атомів Si, які утворюються при іонній імплантації. Як наслідок, у приповерхневій області накопичуються вакансійні дефекти і відбувається частковий відпал радіаційних дефектів та активація імплантованих атомів бору уже в процесі їхньої імплантації.

1.2. Застосування АХ при імплантації в Si атомів Ar зумовило збільшення (в ~1,3 раза) товщини аморфізованого шару. При цьому АХ спричинює рух внутрішньої межі поділу аморфної та кристалічної фаз до поверхні, тому аморфний шар за рахунок приповерхневого накопичення вакансій виникає вже безпосередньо в приповерхневій області пластини.

1.3. Використання АХ при іонній імплантації He⁺ в епітаксійні структури зумовило додаткове (на 5–6 %) зменшення ступеня механічних напружень у структурі Si_xGe_{1-x}/Si, що дало змогу отримувати малодфектні структури з більшою товщиною SiGe-плівки та вмістом Ge. Механізм прискореної АС релаксації механічних напружень — це АС впорядкування дислокаційної сітки та зростання імовірності анігіляції проникних дислокацій.

1.4. АС поліпшення ВАХ надмілких p⁺–n- і n⁺–p-переходів та підвищення однорідності розподілу електрофізичних характеристик по площі пластини для МОН-транзисторів. Досягнуті зростання (в ~1,6 раза) напруги пробою і зменшення струму витоку при зворотному зміщенні засвідчили перспективність АЙІ у виробництві приладів.

1.5. АС прискорене формування нанокластерів Si/SiO₂ у процесі імплантації іонів Si⁺ у SiO₂ з наступним відпалом при 1050 °С. Встановлено, що при зростанні інтенсивності АХ спостерігається послаблення ФЛ та зміна складу рекомбінаційних Рb-центрів, які розташовані на межі поділу НК-Si/SiO₂. Показано, що застосовуючи АХ *in situ*, можна варіювати деякі характеристики нанокластерів Si та їхні ФЛ-властивості.

Аналіз механізмів АДВ у кожному випадку потребував дещо окремого пояснення; але загальним для усіх експериментів було те, що результат впливу АХ було виявлено, фактично, не зразу після імплантації, а пізніше на зразках, що пройшли наступний етап технологічних відпалів.

Основні наслідки впливу АХ при імплантації іонів у пластини сміліцію (частота 2–10 МГц, інтенсивність $0,2\text{--}1,0 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$)

Акустично стимульовані ефекти	Об'єкт	Тип іонів	Параметри пучка (енергія, доза)	Відпал в Аг (температура, час)	Методи
Звуження профілю імплантованих атомів в Si	Si	B ⁺	50–150 кеВ, 10^{15} см^{-2}	900 °С, 30 с	ВІМС, ПЕМ, КР
Збільшення чутливості сенсорів в УФ-області спектра	Si	КЕФ-30	30 кеВ	1000 °С, 10 с	ЗРР ОС
		КДБ-40	60 кеВ	900 °С, 30 с	
Збільшення товщини аморфного шару Si	Si	Ag ⁺	150 кеВ	—	КР, ЗРР РД, СЕМ
	КДБ-10	B ⁺	50	900 °С, 30 с	
Прискорена релаксація механічних напружень в SiGe/Si:He	Si _{0,8} Ge _{0,2} Si	He ⁺	50 кеВ, 10^{16} см^{-2}	650–850 °С, 60 с	ПЕМ, КР, СТ
Поліпшення електричних характеристик Si	Si (КЕФ-30)	B ⁺	33 кеВ, $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	450 °С	ВАХ ВЕХ
Формування прихованих шарів SiO ₂ та Si ₃ N ₄	Si:B	N ₂ ⁺	65 кеВ, $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	(900–1200) °С, 60 хв	ІЧС ВІМС
		O ₂ ⁺			
Формування нанокластерів Si в матриці SiO ₂	600 нм	Si ₂₈ ⁺	100 кеВ, $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$	1100 °С, 20 хв	РФЕС ПЕМ
	SiO ₂ /p-Si				

Методи діагностики: ВІМС — вторинна іонна мас-спектроскопія; ПЕМ (ПЕМ) — трансмісійна (просвічувальна) електронна мікроскопія; КР — комбінаційне розсіювання; ЗРР — зворотне резерфордівське розсіювання (He, 1,5 МеВ); ОС — оптична спектроскопія; РД — рентгенівська дифракція; СЕМ — спектральна еліпсометрія в діапазоні 225–1200 нм; ОМ — оптичний мікроскоп; СТ — селективне травлення; ВАХ — вольт-амперні характеристики; ВЕХ — вольт-емісійні характеристики; ІЧС — інфрачервона спектроскопія; РФЕС — рентгенівська фотоелектронна спектроскопія.

Очевидно, з одного боку, що формування залишкових структурних змін ДДС, отже, і АС вплив відбуваються безпосередньо ще в процесі імплантації, коли незалежно від умов експерименту реалізуються подібні процеси генерації і релаксації дефектів у надзвичайно нерівноважних умовах. З іншого боку, оскільки такі структурні формування на першому етапі є певним чином «прихованими», вони мають інформаційний зміст, тобто виконують роль програми подальшого формування ДДС, яке реалізується уже при відпалах [9]. Оця «прихована» інформаційна складова є спільною для різних, загалом, механізмів АДВ у різних експериментах.

2. МЕХАНІЗМИ ДІЇ АХ

2.1. Основна модель. Експериментально було показано, що розподіл дефектів у випадку імплантації без впливу АХ та у разі впливу АХ принципово різний. У першому випадку області локалізації вакансій, мізвузлових атомів та імплантованої домішки практично збігаються, а в другому — приповерхневий шар стає більше насиченим вакансіями, дещо глибше знаходиться шар з імплантованою домішкою, а ще глибше — шар з міжвузловими атомами силіцію. Не можна вважати, що додаткова дифузія атомів силіцію в глибину пластини при імплантації в акустичному полі пов'язана з градієнтом механічних напружень, викликаних АХ [7]. Дійсно, оскільки для використовуваних частот 2—7 МГц довжина АХ $\lambda_{\text{ас}} \approx 1$ мм значно перевищує товщини поверхневого шару ≈ 1 мкм, то в глибині мішені не «існує області розтягу» відносно «стиснутої поверхневої області», а при дії АХ змінюється в часі знак деформації, синфазно для всього шару. Саме по собі механічне стискування або розтяг кристала при АЙІ не повинні викликати направленої потоку легувальної домішки. Така деформація призводить лише до деякої зміни коефіцієнта дифузії.

2.2. Ефект деформаційного підсилення дифузії при АЙІ, однак, необхідно враховувати [6]. Дійсно, значний градієнт механічної напруги в приповерхневому шарі кристала існує і виникає він за рахунок неоднорідного просторового розподілу імплантованих атомів. Цей градієнт вже і викликає направлений потік атомів; має місце ефект деформаційного втягування — направлене переміщення атомів унаслідок неоднорідного механічного напруження приповерхневих шарів легуваного зразка [10]. Тобто змінюється енергетичний бар'єр W , що характеризує коефіцієнт звичайної дифузії $D = D_0 \exp(-W/kT)$. В акустичному полі відбувається модуляція деформаційної зміни W . При дії всестороннього стискування, яке виникає під час стиску АХ, висота енергетичного бар'єра для звичайної дифузії збільшиться на $W' = W + \Delta W$. І, навпаки, при від'ємній деформації, тобто розтягненні, $W'' = W - \Delta W$ — дифузія зростає. Отже, очевидним є спосіб підсилення ефекту деформаційного зростання дифузії під час імплантації або термоциклу за рахунок додаткової деформації. Спосіб постійної деформації не є зручним та ефективним, оскільки й без цієї деформації напруження в шарі кристала, що імплантується, наближаються до межі плинності (для силіцію при 40 KeV ця доза становить $\sim 2,5 \cdot 10^{14}$ іон/см²), так що постійне додаткове стиснення обов'язково спричинить деформацію зразка. Єдиним виходом є застосування змінних напружень, тобто додаткову деформацію можна реалізувати за допомогою АХ-коливачів.

2.3. Кавітація. При імплантації великих доз легувальних домішок може реалізуватися ще одна цікава і дещо незвичайна еволюція радіаційних дефектів. Як показує експеримент, у приповерхневій області на-

копичується висока концентрація дефектів вакансійного типу, а при імплантації іонів газу можуть навіть утворюватися і газові бульбашки. При АЙІ окремі мікроструктурні перетворення ДДС кристала нагадують процеси, які відбуваються при акустичній кавітації в рідині [11]. Зовнішня схожість виявлення цих процесів у твердому тілі і рідині зумовлена, в першу чергу, локальним характером механічних напружень у середовищі при поширенні інтенсивних АХ [12]. Залежно від умов опромінення кристала розглядаються два випадки: при високоенергетичній імплантації легувальних домішок — у кристалі може накопичуватися велика концентрація дефектів вакансійного типу, які утворюють вакансійні кластери; при імплантації високої дози іонів газу, які унаслідок преципітації утворюють у кристалі газові бульбашки, центрами зародження яких теж є вакансійні комплекси. Останній випадок включає і варіант радіаційної руйнації газозмісних молекул твердого середовища (SiO_2 , GeO_2 тощо), що містяться в твердому тілі. На першій стадії з'являються зародки і відбувається початкове формування «бульбашок» (для узагальнення будемо називати «бульбашками» також скупчення газових атомів і вакансійні кластери — «антибульбашки»), що абсорбують частину найближчих вакансій (або/і, в тому числі, навколишніх домішкових атомів). Переважає процес АС, подібний процесу «дозрівання Освальда», який супроводжується інтенсивним обміном компонентами між «малими» (до 5–8 нм) та «великими» (до 20 нм) «бульбашками». Унаслідок дифузійних процесів «малі бульбашки» зменшуються, а «великі» — збільшуються. Наступна стадія АС «квазікавітації» реалізується при досягненні «бульбашкою» певних розмірів, вона стає нестійкою і, попадаючи в поле підвищеного (для «антибульбашки» — розрідженого) акустичного тиску, втрачає стабільність та лускається, породжуючи в середовищі ударну хвилю (УХ) з високим тиском. У подальшому за рахунок ефекту деформаційного втягування домішкової атмосфери з оточення пульсуючого вакансійного кластера можлива АС-трансформація структури вакансійних дефектів — з вакансійного до міжвузельного типу, з утворенням при цьому в кристалі дислокаційних петель.

Зауважимо, що поблизу пульсуючих вакансійних комплексів, де виникають локально надзвичайно великі градієнти механічних напружень та в областях кристала під час проходження УХ з дуже вузьким профілем реалізується інша ситуація. Визначальними в цих умовах стають ефекти нелінійної взаємодії АХ з внутрішніми деформаційними полями, наприклад генерація ВЧ-імпульсів з частотою порядку величини оберненого часу проходження АХ через неоднорідність (близько частоти фононів) і включення фононних резонансних механізмів впливу на дифузію через підвищення заселеності домішкових квантових коливальних рівнів та відповідне зростання вірогідності міграції атома на інші рівні [13].

3. ЕФЕКТИ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПРИ АЙІ

3.1. Передумови нерівноважності ДДС. У багатьох випадках конструктивним і доповнювальним до відомих механізмів АДВ може стати принципово інший підхід, який враховує самоорганізацію ДДС при АЙІ. Нагадаємо, що ефективність АС модифікації ДДС визначається сприятливими технологічними умовами, які реалізуються не тільки при імплантації. За певних технологічних (вирощування, відпал, легування, формування $p-n$ -переходу) і експлуатаційних (радіаційне опромінення, ВЧ- та лазерна обробка тощо) умов ДДС напівпровідникового кристала перебуває в нерівноважних умовах, коли визначальними є динамічні процеси генерації, взаємодії і релаксації надзвичайно мобільних дефектів високої кон-

центрації. Степінь нерівноваженості процесу є рушійною силою переходу та впливає не тільки на швидкість релаксації та упорядкування ДДС, а й на механізм реакції. Важливою особливістю кінетики ДДС є те, що перебудова до рівноважного стану характеризується наявністю одночасно декількох можливих шляхів спонтанного розвитку, які приводять загалом до неоднозначних остаточних результатів [1]. Іншими словами, релаксація вельми чутлива до зовнішніх умов (температура, електричні та магнітні поля). З'ясувалося, що ця чутливість поширюється і на акустичні поля. Можна стверджувати, що за таких умов ДДС у кристалі виявляє всі риси дисипативної відкритої системи [1, 14, 15]. Отже, відповідно до загальних принципів синергетики виникають умови для реалізації в системі ДДС кристала процесів самоорганізації [1]. Дійсно, при акустичному навантаженні напівпровідника ззовні в кристал надходить не тільки енергія, а й інформація. Самоузгодженість мікрооб'єктів системи формується динамічними зв'язками між ними, носіями яких частково є АХ. Стосовно умови про необхідність певного порогового рівня нерівноваженості, то на практиці можуть реалізовуватися різні варіанти його досягнення [9]. Згідно з наведеною в [6,9] систематикою АС-явищ у випадку АЙІ зовнішнім джерелом нерівноваженості ДДС є високоенергетичний потік імплантованих іонів.

3.2. Інформаційний чинник дії АХ. Зупинимось дещо ширше на важливій умові реалізації процесів самоорганізації при АЙІ — на необхідності надходження в систему інформації. Загалом транспортація інформації в кристал відбувається через тривале накопичення структурних змін модуляцією акустичної хвилі загального просторового деформаційного поля кристала, створеного ґраткою та її дефектами. Роль інформаційного чинника АХ зводиться до: а) «нав'язування» фази когерентності перебудови ДДС одночасно по всьому об'єму зразка; б) обміну інформацією про стан ДДС унаслідок складання поля АХ з полем напружень окремих дефектів кристала. Механізм процесу полягає в генерації акустичних імпульсів при кожному акті зміни стану дефекту та збуренні при цьому фонованого спектра кристала в цілому.

3.3. Експериментальні приклади. Ще раз повернемося до експериментальних результатів, коли додаткова дія АХ не виявляється в процесі імплантації, а є фактично відкладеною (див. п. 1). Тобто, характеристики імплантованих шарів — просторові профілі домішок та дефектів, карта механічних напружень, розмір та концентрація нанокластерних структур тощо — для зразків, отриманих при впливі АХ та без нього, майже не розрізняються, а всі відмінності виявляються тільки після відпалу. Ці приклади підтверджують, у першу чергу, саме інформаційний характер впливу АХ у процесі АЙІ. Наприклад, на стадії імплантації привнесена акустична інформація трансформується в певне упорядкування (механічне, статистичне, електричне, спінове і т. п.) будь-якої системи колективних енергетичних збуджень кристала, що енергетично «під силу» слабкій зовнішній дії; система накопичує та запам'ятовує цю інформацію. На стадії релаксації ДДС (відпалу) відбувається адресна передача результатів отриманої та переробленої інформації безпосередньо до точкових дефектів та їх комплексів, «записана» інформація зчитується і використовується для коригування самого процесу релаксації.

Отже, закодувавши певну інформацію, можна впливати на різні процеси в твердому тілі селективним чином. У такому значенні дія АХ має інформаційно-технологічний характер, і використання цього чинника надає додаткові можливості для акустичного керування процесами релаксації та самоорганізації ДДС, наприклад, і світловим полем [14]. Важливо, що за рахунок тривалого впливу АХ не тільки накопичується зов-

нішня інформація, а й зростає ефективність поглинання енергії зовнішнього поля внаслідок просторової самоорганізації системи, зумовленої тим самим полем.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні механізми впливу АХ при іонній імплантації на перерозподіл домішок і дефектну структуру напівпровідника. На експериментальних прикладах показано, що АХ здебільшого не виявляється в процесі імплантації, а є відкладеною. Роль АХ в окремих експериментальних умовах 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. Запропоновано доповнити традиційні механізми впливу АХ на процеси релаксації структури дефектів кристала інформаційним механізмом з урахуванням реалізації дисипативного резонансу в системі ДДС, якого забезпечує не тільки накопичення зовнішнього акустичного збурення з часом, а й стимулює просторову самоорганізацію системи точкових дефектів напівпровідникового кристала.

Роботу виконано за часткової підтримки ДЦНТП «Нанотехнології та наноматеріали» (проект №3.5.1.30).

Ya. M. Olikh

ABOUT ULTRASOUND-STIMULATED A SELF-ORGANIZATION OF DEFECT STRUCTURES IN SEMICONDUCTORS DURING ION IMPLANTATION

The short analysis of basic mechanisms of acoustic wave (AW) action at ionic implantation on the redistribution of impurities and defect structure of semiconductor crystal is conducted. On experimental examples were showed that action results of AW does not appear in the process of implantation, mainly, but is delayed. The action of AW in separate experimental conditions is the special, intellectual, and take to informative modulation a relaxation processes of power disturbance non-equilibrium structure of defects and formation of spatially-dynamic matrix, which can be memorized. It is suggested to complement the traditional mechanisms of action AW on the relaxation processes of crystal defect structure the informative. Such approach take into account a new possibility a realization of dissipation resonance in the system of impurity-defect structures; the mechanism of which provides not only the accumulation of external acoustic perturbation in time out, but stimulates a spatial self-organization of point defects in semiconductor crystal.

Keywords: Ultrasound, semiconductor, ionic implantation, self-organization of point defects.

1. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
2. *Olikh Ya.M., Olikh O.Ya.* Active ultrasound effects and their future usage in sensor electronics // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2004. — N 1. — С. 19—29.
3. *Оліх Я.М.* Про можливості акустокерованої інженерії дефектів у «нерівноважних напівпровідниках» //Нові технології. Наук. вісн. КУЕІТУ. — 2008. — № 2 (20). — С. 188—193.
4. *Акустоелектронні та акустостійні технології* /В.Ф. Мачулін, Я.І. Лепіх, Я.М. Оліх, Б.М. Романюк // Вісн. НАН України. — 2007. — № 5. — С. 3—8.
5. *Оліх Я.М.* Вплив УЗ на формування дефектної структури Si в процесі іонно-променевої імплантації // Нові технології. Наук. вісн. КУЕІТУ. — 2010. — № 1 (27). — С. 124—130.
6. *Оліх Я.М.* Акустостимульовані явища у напівпровідникових реальних кристалах (A_2B_6 , A_3B_5 , Ge, Si): Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — Київ, 2011. — 33 с.

7. *Мельник В.П.* Процеси масопереносу та формування нанорозмірних фаз в твердому тілі, стимульовані іонними пучками: Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — Київ, 2012. — 35 с.
8. Pat. 6,358,823 US B1, United States. Method fabrication ion implanted doping layers in semiconductors materials / D. Kruger, V. Romanyuk, V. Melnik, Ja. Olikh. — Publ., 2002.
9. *Оліх Я.М., Оліх О.Я.* Інформаційний чинник акустичної дії на структуру дефектів у напівпровідниках // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2011. — № 2. — С. 5—12.
10. *Титов В.В.* Роль механических напряжений при легировании материалов с помощью ионных пучков. — М.: ИАЭ, 1983. — 48 с. — Препр. / ИАЭ-3774/11.
11. *Маргулис М.А.* Сонолюминесценция // УФН. — 2000. — **170**, № 3. — С. 263—287.
12. *Леніх Я.І., Оліх Я.М.* Акустостимульована «квазікавітація» вакансійних дефектів у напівпровідниках при високоенергетичному опроміненні //Тез. доп. VI Міжнар. школи-конф. «Актуальні проблеми фізики напівпровідників». — Дрогобич: ДНУ, 2008. — С. 175—176.
13. *Pavlovich V.N.* Enhanced diffusion of impurities and defect in crystal in conditions of ultra-sonic and radiative excitation of crystal lattice // Phys. Stat. Sol. (b). — 1993. — **180**, N 1. — P. 97—105.
14. *Сугаков В.И.* Самоорганизация упорядоченных дефектно-деформационных микро- и наноструктур на поверхности твердых тел под действием лазерного излучения // Квантовая электроника. — 1999. — **28**, № 1. — С. 2—18.
15. *Стохастический резонанс* / В.С. Анищенко, А.Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер // УФН. — 1999. — **169**, № 1. — С. 7—38.

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

Отримано 15.04.2013