

АКУСТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

ACOUSTOELECTRONIC SENSORS

УДК 534.222.2

PACS: 43.25.DC, 61.80.BA

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ НЕОДНОРІДНОМУ ТЕРМІЧНОМУ ІМПУЛЬСНОМУ ВПЛИВІ З УТВОРЕННЯМ РІДКОЇ ФАЗИ

*О. В. Ляшенко¹, В. П. Велешчук², О. І. Власенко²,
А. П. Онанко¹, І. О. Ляшенко¹, Ю.А. Онанко¹*

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
03680, м. Київ, пр. Глушкова, 2/1

²Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ,
03028, м. Київ, пр. Науки, 45
E-mail: lyashenk@mail.univ.kiev.ua

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ НЕОДНОРІДНОМУ ТЕРМІЧНОМУ ІМПУЛЬСНОМУ ВПЛИВІ З УТВОРЕННЯМ РІДКОЇ ФАЗИ

О. В. Ляшенко, В. П. Велешчук, О. І. Власенко, А. П. Онанко, І. О. Ляшенко, Ю.А. Онанко

Анотація. Розглянуто питання про релаксацію поверхневих механічних напруг після імпульсного лазерного опромінення складних напівпровідникових сполук, що супроводжується формуванням складного акустичного відгуку. В роботі показано, що поріг лазерно-індукованого плавлення моно- та полікристалів можна встановити по залежності амплітуди та (або) енергії акустичного відгуку від інтенсивності лазерного імпульсу, зокрема даним методом встановлено пороги плавлення монокристалів *GaAs*, *CdTe* та *Si* при імпульсному наносекундному опроміненні рубіновим та неодимовим лазером. Встановлено, що при імпульсному наносекундному лазерному опроміненні можлива реєстрація тільки дискретної високоенергетичної акустичної емісії за рахунок швидкої релаксації створених пружних та термопружних напруг.

Ключові слова: акустична емісія, лазерне опромінення, термонапруги.

ACOUSTIC EMISSION AT NONUNIFORM THERMAL PULSE INFLUENCE WITH A LIQUID PHASE FORMATION

O. V. Lyashenko, V. P. Veleshchuk, O. I. Vlasenko, A. P. Onanko, I. O. Lyashenko, Ju. A. Onanko

Abstract. The question of a relaxation of superficial mechanical pressure after a pulse laser irradiation in complex semiconductor compounds which is accompanied by formation of the difficult acoustic response is considered. In work it is shown, that the laser-induced melting threshold of single and poly- crystals can be established on dependence of amplitude and (or) energy of the acoustic response — the laser pulse intensity, in particular by the given method establishes melting thresholds of single crystals *GaAs*, *CdTe* and *Si* at nanoseconds pulse irradiation of ruby and neodymium laser.

© О. В. Ляшенко, В. П. Велешчук, О. І. Власенко, А. П. Онанко,
І. О. Ляшенко, Ю.А. Онанко, 2009

It is established, that at nanoseconds laser pulse irradiation is possible registration only discrete high-energy acoustic emission due to a fast relaxation created elastic and thermoelastic pressure.

Keywords: acoustic emission, laser irradiation, thermopressures.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ИМПУЛЬСНОМ ВЛИЯНИИ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

О. В. Ляшенко, В. П. Велещук, А. И. Власенко, А. П. Онанко, И. О. Ляшенко, Ю. А. Онанко

Аннотация. Рассмотрен вопрос о релаксации поверхностных механических напряжений после импульсного лазерного облучения сложных полупроводниковых соединений, которое сопровождается формированием сложного акустического отклика. В работе показано, что порог лазерноиндуцированного плавления моно- и поликристаллов можно установить по зависимости амплитуды и (или) энергии акустического отклика от интенсивности лазерного импульса, в частности данным методом установлены пороги плавления монокристаллов *GaAs*, *CdTe* и *Si* при импульсном наносекундном облучении рубиновым и неодимовым лазером. Установлено, что при импульсном наносекундном лазерном облучении возможная регистрация только дискретной высокоэнергетической акустической эмиссии за счет быстрой релаксации созданных упругих и термоупругих напряжений.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, лазерное облучение, термонапряжения.

Вступ

Питання про релаксацію поверхневих механічних напруг після імпульсного лазерного опромінення складних напівпровідникових сполук для оптимального керування їх електрофізичними властивостями постійно залишається актуальним, оскільки активно ведуться дослідження у області цілеспрямованого контрольованого управління параметрами складних напівпровідникових сполук, зокрема для оптимального управління електрофізичними властивостями сполук *CdTe* і *GaAs* – це точне визначення їх лазерноіндукованого порогу плавлення [1-3].

В той же час, подібний неоднорідний термічний імпульсний вплив на поверхню твердих тіл призводить до непрогнозованих зривів неоднорідних термомеханічних напруг, що створюються локально-перегрітими областями [3-6]. При значних інтенсивностях лазерного опромінення I можливі випаровування та розплави частини приповерхневого локального об'єму твердих тіл, причому, за деяких умов опромінення – багатократні, послідовні в часі, але в різних локальних об'ємах прямі та зворотні фазові переходи тверде тіло-рідина та тверде тіло – газ [7]. Це, а також недосконалість будови твердих тіл та різка зміна локальних механічних напруг, зокрема зміна кристалічної будови означає, що, за певних умов, можливе

виникнення акустичної емісії (АЕ) – спонтанного хаотичного випромінювання імпульсних пружних хвиль, що супроводжує ці зриви [4, 8-10]. Однак індукований акустичний відгук при імпульсному лазерному опроміненні має достатньо складну структуру, пов'язану ще з кількома [1] суттєво різними механізмами його формування: різке розширення – стискання речовини, тиск нерівноважної пари над поверхнею розплаву та світлодетонаційний тиск плазми [11].

Тому викликає інтерес співставлення індукованого акустичного відгуку $A(I)$ при імпульсному лазерному опроміненні достатньо однорідних оптично прозорих та непрозорих, з структурно-довершеною (однорідною) дефектною структурою кристалів (як в [1, 4]) та невпорядкованих дисперсних полікристалічних сильно-анізотропних твердих тіл з високою концентрацією різноманітних структурних дефектів, з суттєво різними розмірами дисперсних частинок (зерен), що складаються з оптично-прозорої (SiO_2) та оптично-непрозорої (амфіболіт) для лазерного випромінювання фаз (як в [10]).

Дана робота присвячена дослідженню динаміки акустичної емісії при неоднорідному термічному впливі на монокристали типових напівпровідників *CdTe* (A^2B^6), *GaAs* (A^3B^5) і *Si* та плагіогранітів інгулецького комплексу, ство-

рену потужними рубіновим ($\lambda = 0,694$ мкм, $\tau = 20$ нс), та неодимовим ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 15$ нс) лазерами, що працювали у режимі модульованої добротності в області фундаментального поглинання світла та області прозорості зразків.

1. Експеримент

Зразками були монокристали *CdTe* орієнтації (111), пластини *GaAs* орієнтації (111) та *Si* (111). Зразки досліджуваних плагіогранітів відповідають різним стадіям гранітизації гнейсо-амфіболітового субстрату та характеризуються відмінностями як мінералогічного складу, будови так і фізичними характеристиками, зумовленими різними термобаричними і геодинамічними умовами формування. Зокрема, певними особливостями структури зразків плагіогранітів з різних глибин є суттєво різний розмір дисперсних частинок (зерен) [10].

Морфологія поверхні кристалів до і після опромінювання досліджувалась на оптичному мікроскопі МІ-9. Полірована поверхня дисперсних зразків (гранітів) була сильно неоднорідна як по коефіцієнту поглинання для заданої λ випромінювання лазера, так і по морфології. На поверхні зразків були відмічені різноманітні вкраплення з показником заломлення, відмінним від основних фаз поверхні. Площа опромінення на поверхні зразку була меншою 1×1 мм², при цьому площа лазерної плями була звичайно менше площі зерен обох основних фаз у крупнозернистих зразках та, відповідно, більше або порядку площі зерен у дрібнозернистих зразках.

Індукований при імпульсному лазерному опроміненні акустичний відгук, а також сигнали акустичної емісії, як складові цього відгуку, реєструвався резонансним п'єзодатчиком, при цьому загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустоемісійного приладу АФ-15 в діапазоні реєструємих п'єзодатчиком частот (200-500 кГц) було 60...72 дБ.

2. Основний матеріал та результати

Створений неоднорідний короткочасний термічний вплив зі створенням неоднорідних термомеханічних напруг та з розплавом поверхні призводив до проплаву поверхні зразка

вглиб, з утворенням шахти, викидом на поверхню розплаву та утворенню кратера та "корони" (рис.1 та 2).

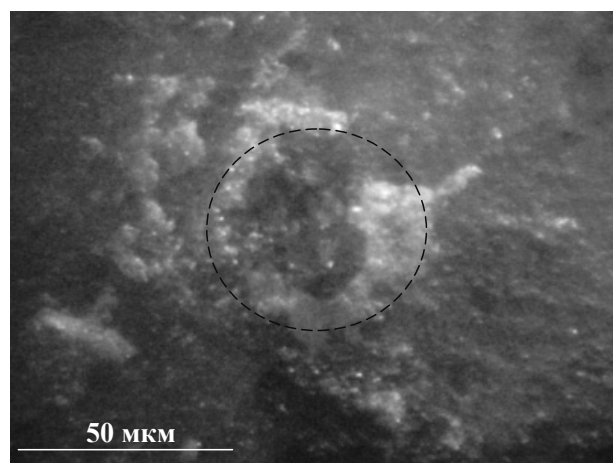
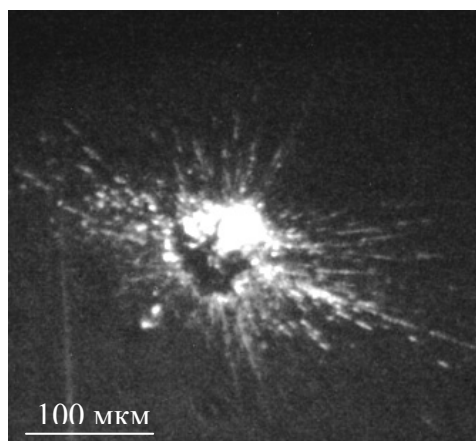
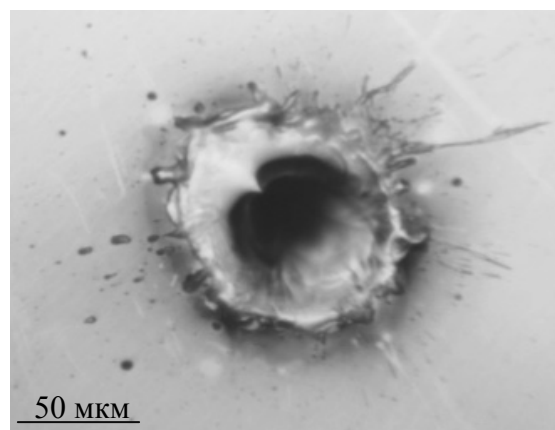


Рис. 1. Поверхня амфіболіту після опромінення рубіновим лазером.



(а)



(б)

Рис. 2. Поверхня кремнію після опромінення рубіновим (а) та неодимовим (б) лазером, $I \approx 1$ ГВт/см².

Індукований акустичний відгук дещо різнився для експериментів з різними матеріалами та інтенсивностями лазерного опромінення.

Для “допорогових” (до виникнення акустичної емісії) акустичний відгук був приблизно пропорційний потужності лазерного опромінення та був відносно “коротким”, хоча і мав значно більшу довжину ніж 15-20 нс. Для “надпорогових” відбувалася зміна як форми та довжини індукованого відгуку (рис.3), так і зміна лінійної залежності $A(I)$ на нелінійну (рис.4) [1].

На рис. 3 спостерігаються “накладені” імпульси високоенергетичної дискретної АЕ з великим часом загасання (до десятків мілісекунд), сформовані в суттєво різні моменти часу після опромінення (від різних джерел та груп джерел АЕ). Неперервною АЕ (пов’язаною з хаотичним рухом дислокацій) доводиться нехтувати через значно менший (до $10^3 - 10^4$ разів) рівень цих сигналів, ніж сигналів високоенергетичної дискретної АЕ (зокрема – при тріщиноутворенні) [8, 9].

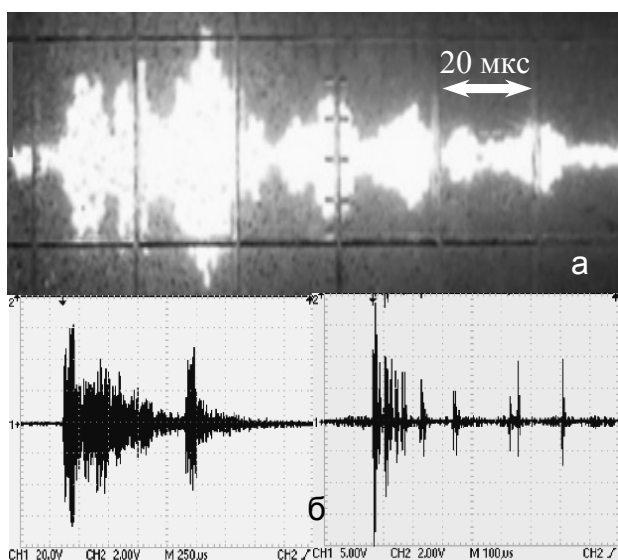


Рис. 3. Сигнали акустичної емісії при імпульсному лазерному збудженні граніту (а) та напівпровідника (б).

Залежності $A(I)$ після лінійної ділянки (рис.4) мають в цілому нелінійний, але близький до експоненційного, характер залежності амплітуди сумарного індукованого акустичного відгуку від інтенсивності лазерного імпульсу при опроміненні $CdTe$, $GaAs$ та Si .

При цьому поріг плавлення $CdTe$ ($8 \pm 0,4$ МВт/см² при $\lambda = 0,694$ мкм, та 170 ± 5 МВт/см² при $\lambda = 1,06$ мкм), $GaAs$ ($18 \pm 0,4$ МВт/см² та 310 ± 5 МВт/см² відповідно) та Si ($50 \pm 0,4$ МВт/см² та 70 ± 5 МВт/см² відповідно) при імпульсному лазерному опроміненні було визначено

по початку прояву нелінійності (що перевищувала похибку відносних вимірів) на цих залежностях.

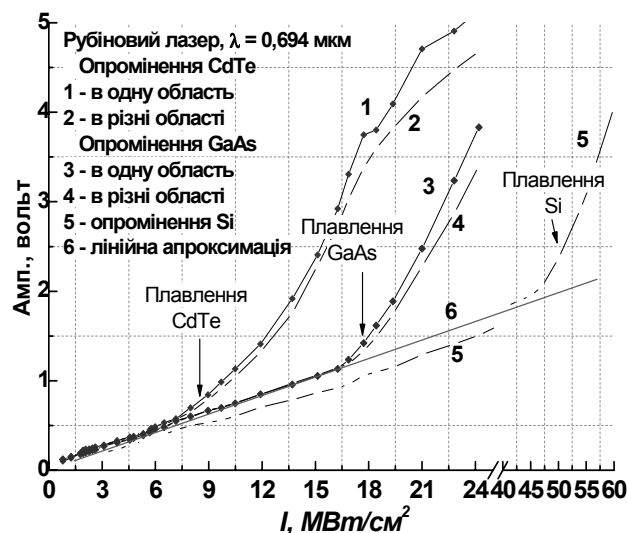
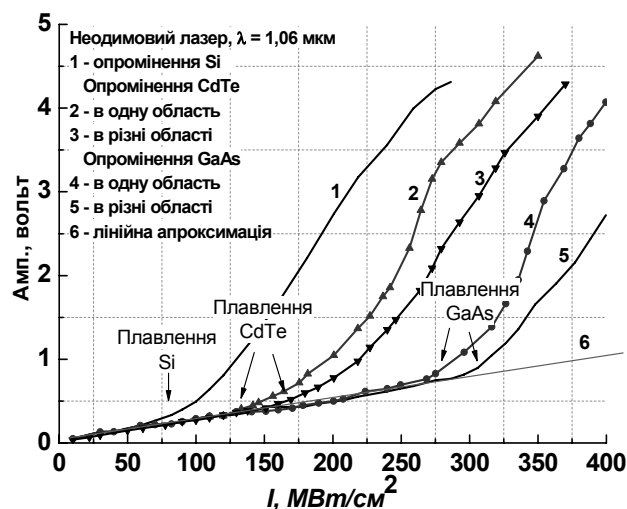


Рис. 4. Залежність амплітуди індукованого акустичного відгуку від інтенсивності лазерного імпульсу для телуриду кадмію та арсеніду галію.

Зауважимо, що при опромінюванні кристалів рубіновим лазером поглинання відбувається в тонкому приповерхневому шарі товщиною $d \sim \alpha^{-1} \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ см (коефіцієнт поглинання $\alpha_{0,694} = 6 \cdot 10^4$ см⁻¹ для $CdTe$, $\alpha_{0,694} = 2,8 \cdot 10^4$ см⁻¹ для $GaAs$ [1-3]). Поглинання оптичного випромінювання неодимового лазера відбувається в об’ємі: $\alpha_{1,06} \sim (1-3)$ см⁻¹ для $CdTe$ [1,3] та $\alpha_{1,06} \sim 10$ см⁻¹ для $GaAs$. При цьому α визначається, як відомо [3, 5, 6], в значній мірі концентрацією вільних електронів і наявністю структурних дефектів різної природи в об’ємі кристалу. Для кремнію $\alpha_{0,694} = 2,38 \cdot 10^3$ см⁻¹ та $\alpha_{1,06} = 100$ см⁻¹.

Обговорення

Фактично при лазерному опроміненні у локальному об'ємі (шахті), “затиснутому” “холодним” твердим тілом відбувалося: спочатку – послідовний розплав з послідовним витисненням на поверхню надлишкового (через розширення) об'єму розплаву, далі, після припинення дії термічного впливу (лазерного випромінення) – затвердіння поверхні та утворення значних градієнтів стискаючих та розтягуючих механічних напруг вздовж радіусу та вісі шахти, наприкінці – нижня частина шахти створює значні стискаючі механічні напруги, зокрема по вісі шахти, що нерівномірно “втягують” центральну частину поверхні шахти вглибину зразка (рис.2). Надлишок витиснутого під час дії лазерного випромінення об'єму утворює “корону” над поверхнею твердого тіла навколо кратера.

Глибина шахти проплаву очевидно лімітована (при сталій потужності, кількості імпульсів та довжині імпульсу лазера) в першу чергу теплопровідністю та встановленням “тимчасово-рівноважного” розподілу градієнтів температур перпендикулярних до вісі кратеру та вздовж неї, що і визначає, вірогідно, індивідуальні величини та форму залишкових кратерів та корон. Варто відзначити, що поріг лазерноіндукованого плавлення поверхні кристалу в основному визначається температурою плавлення матеріалу, теплоємністю, теплопровідністю, глибиною дифузії тепла $l = \sqrt{\chi\tau}$ та глибиною поглинання світла d [1]. Зокрема, для $\lambda = 0,694$ мкм глибина дифузії тепла становить для $GaAs - l_{GaAs} = 0,787$ мкм, для $CdTe - l_{CdTe} = 0,377$ мкм, для $Si - l_{Si} = 1,265$ мкм. Одночасно $d_{GaAs} = 0,5$ мкм, $d_{CdTe} = 0,34$ мкм, $d_{Si} = 4,2$ мкм; а для $\lambda = 1,06$ мкм $CdTe$, $GaAs$ та SiO_2 оптично прозорі.

Варто відзначити, що поверхня плагіогранітогнейса після лазерного опромінення сильно різниться в сенсі тріщиноутворення від інтенсивності прикладених динамотермальних напруг σ_r . При інтенсивності лазерного опромінення $I \approx 1500$ МВт/см² з $\lambda = 0,694$ мкм відбувається інтенсивне тріщиноутворення смугового напрямку, при інтенсивності лазерного опромінення $I \approx 300$ МВт/см² утворюється лише слабка система тріщин, локалізована в межах окремого мінерального зерна..

Співставлення акустичних відгуків (рис.3)

з часом дії імпульсу лазера та розмірами зразка вказують на імовірне формування “максимумів” (накладених в часі імпульсів) через механізм АЕ, оскільки часові затримки їх появи та довжина кінцевого сформованого акустичного імпульсу набагато перевищують довжину імпульсу лазера і тому не можуть бути пояснені в рамках фото-термопружного механізму [12], що відповідає лінійній області залежності $A(I)$ на рис.4. [12]

Складна форма індукованого акустичного відгуку (рис.3) вказує на кілька діючих одночасно, або по чергово в часі механізмів трансформації неоднорідного термічного впливу в механічні хвилі напруг (сформовані акустичні хвилі), однак генерація хвиль з затримкою у кілька мілісекунд відносно наносекундного збуджуючого імпульсу безумовно вказує на переважаючий механізм – акустичну емісію.

Вірогідним на нашу думку є наступна послідовність в часі фізичних процесів в околі шахти та відповідних сигналів АЕ (утворених через відомі механізми АЕ) – акустична емісія при розплаві 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. Процесами при фазових переходах тверда фаза-газ та газ-тверда фаза [7] через відносно “довгий” (наносекундний) імпульс лазера можна знехтувати (до речі, АЕ при цих процесах на сьогодні невідома).

Оскільки за вибраних умов експерименту фазові переходи відбуваються достатньо швидко (за час, що може бути порівняний з часом лазерного впливу, рис.3), вірогідно, що формування “акустоемісійної частини” акустичного відгуку в гранітах пов'язано саме із тріщиноутворенням за рахунок зняття пружних напруг при застиганні.

Варто зауважити, що традиційний підхід до АЕ як до емісії двох типів – неперервної (звичайно низькоенергетичної) при русі дислокацій та дискретної (високоенергетичної) при розвитку тріщин нівелюється для випадків, коли часові довжини окремих актів АЕ перевищують час проходження хвилі по зразку, а лінійні довжини цугів цих хвиль АЕ відповідають лінійним розмірам зразка. Крім того, одночасний (“скорельований”) рух дислокацій при тріщиноутворенні також призводить до дискретної високоенергетичної АЕ [8].

Відмінність залежностей (рис.4) при опроміненні в одну або в різні області пояснюється тим, що при опромінюванні кристала в багатократному режимі як з області фундаментального поглинання світла, так і з області прозорості, по досягненню порогу плавлення $I \geq I_{th}$ амплітуда реестрованого акустичного сигналу залежить від дефектного стану приповерхневого шару *CdTe* і *GaAs* після попереднього опромінювання [1].

Висновки

Таким чином релаксація поверхневих механічних напруг після імпульсного наносекундного лазерного опромінення складних напівпровідникових сполук супроводжується формуванням складного акустичного відгуку, переважаючим механізмом в формуванні якого є дискретна високоенергетична акустична емісія, що виникає при плавленні-застиганні поверхні, а також за рахунок швидкої релаксації створених пружних та термопружних напруг, на протязі часу, який значно перевищує час опромінення.

Показано, що поріг лазерноіндукованого плавлення моно- та полікристалів можна встановити по залежності амплітуди та енергії акустичного відгуку від інтенсивності лазерного імпульсу.

Список літератури

1. Байдулаева А., Велешук В.П., Власенко А.И., Даулетмуратов Б.К., Ляшенко О.В., Мозоль П.Е. Влияние процесса плавления на акустический отклик соединений *CdTe* и *GaAs* при импульсном лазерном облучении // ФТП. — 2008. — Т.42, №3. — С. 286–290.
2. Байдулаева А., Булах М.Б., Власенко А.И., Ломовцев А.В., Мозоль П.Е. Динамика развития поверхностных структур в кристаллах *p-CdTe* при облучении импульсным лазерным излучением // ФТП — 2004. — Т.38, №1. — С. 26-29.
3. Amit G., Avinashi K., Kailash T.N., Surendera B.K. Comparative study of evolution of laser damage in *HgCdTe*, *CdTe*, and *CdZnTe* with nanosecond 1,06- μ m wavelength multiple pulses // Proceedings of the SPIE. — 2004. — Vol.5273. — P. 122-128.
4. Блонский И.В., Тхорик В.А., Цицилиано А.Д. Акустическая эмиссия в процессе лазерного отжига монокристаллов кремния // ФТП — 1997. — Т.39, №3. — С. 505–509.
5. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Механическое разрушение прозрачных твердых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника — 2002. — Т.32, №4. — С. 335–340.
6. Володин Б.Л., Емельянов В.И., Шлыков Ю.Г. Взрывное накопление точечных дефектов как механизм многоимпульсного разрушения поглощающих сред // Квантовая электроника — 1993. — Т.20, №1. — С. 57–61.
7. Шмельова Л.В., Єжов С.М., Супрун А.Д., Шевченко С.Я. Динаміка локально-фазових переходів, зумовлених інтенсивним лазерним випромінюванням // Український фізичний журнал, 2006. — Т.51, №8. — С. 788 — 794.
8. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля (Книга 2). — М.: Высш. школа, 1991. — 283 с.
9. Ляшенко О.В. Моделювання динаміки акустичної емісії матеріалів // Вісник Київського університету, серія: фіз. — мат. науки. — 2004. — №3. — С. 20-23.
10. Безродний Д.А., Шабатура О.В., Ляшенко О.В., Велешук В.П., Байдулаева А., Онанко А.П., Онанко Ю.А. Акустична емісія в гетерозернистіх плагіогранітах при неоднорідному термічному впливі // Вісник Київського університету, серія: геологія. — 2007. — № 41-42. — С. 37 — 39.
11. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. — М.: Наука, 1989. — 280 с.
12. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. — М.: Наука, 1991. — 304 с.