

УДК 539.12.04; 621.378.325; 628.979

**Ю. Нікіфоров, канд. техн. наук;
Б. Ковалюк, канд. фіз.-мат. наук; О. Ржешевська; О. Маньовська**

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ЛАЗЕРНА УДАРНО-ХВИЛЬОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ: ФІЗИЧНІ АСПЕКТИ ТА ВИМОГИ ДО ВІДПОВІДНИХ СВІЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК

У роботі розглянуто фізичні процеси генерації лазерних ударних хвиль. Представлено формули для розрахунків критерію виникнення, глибини утворення та амплітуди імпульсу тиску лазерної ударної хвилі в залежності від густини потоку енергії лазерного імпульсу, акустичних імпедансів опромінюваних матеріалів та оптичних параметрів матеріалу й установки. Запропоновано класифікувати фізико-технічні вимоги до світлотехнічних установок для лазерної ударно-хвильової обробки на загальні та спеціальні.

Розглянуто принцип реалізації лазерної ударно-хвильової обробки. Отримано залежність тиску лазерної ударної хвилі від товщини шару прозорого конденсованого середовища та розфокусування фокусуючої системи. Оцінено вплив зміни розфокусування на значення тиску, що особливо проявляється при проведенні експериментів у лабораторних умовах.

Наведено основні елементи конструкції лабораторного лазерного комплексу для ударно-хвильової обробки та вимоги до відповідного світлотехнічного устаткування.

Yu. Nikiforov, B. Kovalyuk, O. Rzheshavska, O. Manyovska

LASER SHOCK WAVES MATERIAL PROCESSING: PHYSICAL ASPECTS AND DEMANDS TO THE CORRESPONDING LIGHTING TECHNICAL EQUIPMENT

The physical processes of laser shock waves generation have been considered in the paper. Formulas for the calculations of appearance criterion, creation depth, and amplitude pulse pressure of laser shock waves depending on the density of flux energy of laser pulse, acoustic impedances of the illuminated materials and optical parameters of the material and the facilities, have been presented. It has been proposed to classify physical - technical requirements to the lighting technology for laser shock peening into general and special.

The principles of realization of laser shock wave peening have been considered. Dependence of laser shock wave pressure on the transparent condensed environment thickness and defocusing of focusing system is received. The effect of defocusing alteration on the value of amplitude pressure, which is of importance while the conducting of experiments in laboratory environments has been estimated.

Special on main elements of laser shock wave construction system and demands to the corresponding lighting technical equipment have been presented.

Вступ. Дана робота присвячена аналізу особливостей лазерної ударно-хвильової обробки як одного з видів перспективних сучасних технологій, інтерес до якої помітно зростає, наприклад, як до одного з альтернативних методів покращення поверхневих та об'ємних властивостей матеріалів. За кордоном лазерна ударно-хвильова обробка, як свідчить аналіз зарубіжних літературних джерел, стає останнім часом все більш комерційно привабливим видом обробки. Вона призводить до зміни напружень у матеріалі та їх перерозподілу, що, в свою чергу, викликає підвищення циклічного втомлення матеріалу, збільшення мікротвердості, а також покращення трибологічних властивостей поверхні матеріалів, таких як: алюміній, титан, деякі сталі [1 - 3]. Так, в роботах [1, 2] повідомляється про зменшення коефіцієнта тертя сталі та алюмінієвих сплавів на 10-15%, підвищення втомлення на 20% для алюмінієвих сплавів та збільшення мікротвердості їх поверхні після лазерної ударно-хвильової обробки до

50%. Лазерна ударно-хвильова обробка знаходить застосування в аерокосмічній промисловості, енергетиці, а останнім часом в мікроелектроніці. Метою роботи є ознайомлення спеціалістів-світлотехніків з лазерною ударно-хвильовою обробкою як перспективним методом високих технологій та особливостями експериментальних досліджень в цій області.

Проблема лазерної ударно-хвильової обробки матеріалів за різних умов. Під лазерною ударною хвилею розуміють різке, стрибкоподібне збільшення тиску в опромінюваному матеріалі, що поширюється в ньому із надзвуковою швидкістю, стійке по відношенню до малих збурень свого профілю. Утворення ударних хвиль при дії лазерного моноімпульсу розглядається в [4], де формулюється критерій можливості утворення ударних хвиль в тих чи інших умовах лазерного випромінювання у вигляді двох необхідних умов:

- 1) глибина утворення ударних хвиль (x) повинна знаходитися в межах області одномірного руху суцільного середовища. (Така область може бути прийнята у вигляді півсфери з радіусом, що рівний радіусу фокальної плями);
- 2) достатня товщина опромінюваного тіла.

Об'єднуючи ці дві умови, для моноімпульсу трикутної форми, критерій можливості утворення ударних хвиль можна записати у вигляді:

$$Y = \frac{L^2}{c_e^2} \left| \frac{d^2U}{dt^2} \right|_{\max} \approx \frac{L^2}{c_e^4} \cdot \frac{\Delta U \cdot \kappa_q}{\tau_q^2}, \quad (1)$$

де L – критичний розмір;

c_e – поздовжня швидкість звуку;

ΔU – зміна енергії парів на одиницю ваги;

κ_q – коефіцієнт спотворення фронту;

τ_q – тривалість імпульсу.

Глибина утворення ударних хвиль при такому імпульсі може бути оцінена за формулою:

$$x \geq \frac{2c_e^2}{(\gamma_c + 1)\xi} \sqrt{\frac{2\rho\tau_q}{(\gamma - 1)\kappa_q Q\beta A_\lambda}}, \quad (2)$$

де $\gamma_c = \Gamma + 1$, $\gamma = 5/3$;

Γ – коефіцієнт Грюнайзена;

ρ – густина речовини;

β – показник поглинання;

A_λ – поглинальна здатність речовини;

ξ – коефіцієнт, що характеризує прискорення шару;

Q – густина енергії імпульсу.

Лазерні ударні хвилі виникають при густинах потужності лазерного випромінювання, що перевищують 5×10^7 Вт/см², при умові, що розширення плазми, яка виникає на поверхні матеріалу, обмежується прозорим конденсованим середовищем. При цьому тиск, що створюється плазмою, визначається формулою, в яку входять енергетичні параметри лазерного випромінювання та акустичні й теплофізичні характеристики матеріалу, що опромінюється. Формула для розрахунку амплітуди тиску при опроміненні зразків у достатньо товстому шарі прозорого конденсованого середовища має вигляд:

$$p = \sqrt{q \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\rho_1 D_1 \cdot \rho_2 D_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2}}, \quad (3)$$

де q – густина потоку поглинутої енергії;

ρ_1, ρ_2 – густини незбуджених середовищ 1 і 2;

D_1, D_2 – швидкості розповсюдження переднього фронту хвилі стиску;

γ – показник адіабати, який рівний для одноатомного газу $5/3$,

двохатомного – 7/5, трьохатомного і більше – 9/7.

Як показали експерименти, формула з високою точністю дозволяє визначити тиск на поверхні мішені при її опроміненні в умовах обмеження розширення плазми прозорим конденсованим середовищем.

До основних параметрів, які характеризують процес лазерної ударно-хвильової обробки, належать: густина потоку лазерного випромінювання, довжина хвилі випромінювання, тривалість імпульсу, амплітуда тиску, частота слідування імпульсів, умови генерації ударних хвиль (повітря, конденсоване середовище).

Наявність прозорого конденсованого середовища при лазерній ударно-хвильовій обробці призводить до підвищення тиску ударної хвилі. На рис. 1 представлена загальна схема опромінення матеріалу в прозорому конденсованому середовищі.

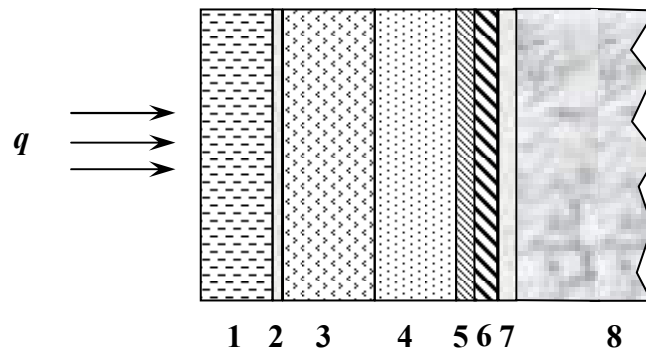


Рисунок 1 – Загальна схема опромінення матеріалу в прозорому конденсованому середовищі:

- 1 та 8 – області незбуреного рідкого середовища та твердого тіла;
- 2 та 7 – фронт ударної хвилі в рідині та твердому тілі;
- 3 – шар рідини, що знаходиться у збуреному рідкому або пароподібному стані;
- 4 – шар пари (або плазми), що утворився в процесі випаровування твердого тіла;
- 5 – сильно поглинаючий шар; 6 – збурена область твердого тіла

Умови вибору прозорого конденсованого середовища диктуються властивостями матеріалу, що піддається лазерній ударно-хвильовій обробці та виходячи із технологічних міркувань. Так, при обробці матеріалів з метою підвищення міцності, корозійної стійкості в якості прозорого конденсованого середовища застосовуються вода, масло, силікатне скло, а при обробці напівпровідникових матеріалів, наприклад, з метою керування розподілом домішок в їх об'ємі та, відповідно, зміни електрофізичних властивостей використовують спирт, епоксидну смолу, прозорі органічні плівки. Експерименти показують, що глибина області впливу лазерних ударних хвиль на метали може досягати декількох міліметрів без видимих змін поверхні, що на три порядки більше глибини області термічного впливу наносекундного лазерного імпульсу [5].

На даний час, незважаючи на те, що ще не виявлені повністю фізико-хімічні процеси, які протікають при ударно-хвильовій лазерній дії в матеріалі, практичне застосування лазерних ударних хвиль включає доволі широкий спектр задач, починаючи від модифікації властивостей матеріалів та оцінки їх стійкості до руйнування при високошвидкісних навантаженнях і закінчуючи пошуками можливості прикладних застосувань наноматеріалів на основі вуглецевих нанотрубок як індикаторів або датчиків параметрів ударно-хвильового впливу [6 - 11].

Природно, що розв'язання таких різнопланових задач вимагає створення установок, які відмінні між собою за габаритами, енергетичними та іншими параметрами. На основі аналізу літератури та власного досвіду роботи пропонуємо класифікувати фізико-технічні вимоги до світлотехнічних установок для лазерної ударно-хвильової обробки, поділивши їх на загальні і спеціальні.

Загальні - впливають із умови генерації лазерних ударних хвиль, яка залежить від густини енергії випромінювання, тривалості імпульсу, довжини хвилі,

теплофізичних та акустичних властивостей матеріалу, що обробляється в режимі генерації ударних хвиль.

Спеціальні - пов'язані із специфікою поставлених технічних задач. Наприклад, існує помітна різниця при виборі режиму обробки напівпровідників при створенні р-n переходу та конструкційної сталі при підвищенні її корозійної стійкості. Зрозуміло, що медичні ударно-хвильові лазерні установки, які все ширше застосовуються в закордонних клініках, повинні, в свою чергу, помітно відрізнитись від технологічних. Об'єднуючим фактором і є вказані вище загальні вимоги.

Принципи реалізації лазерної ударно-хвильової обробки матеріалів. Для практичного застосування ряд відзначених вище фізичних залежностей необхідно було трансформувати до більш зручного вигляду. Однією із них, що визначає тиск при лазерній ударно-хвильовій обробці в прозорому конденсованому середовищі, є отримана нами на основі законів геометричної оптики залежність, представлена у вигляді:

$$p = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{E}{\pi \tau_i} \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\rho_1 D_1 \cdot \rho_2 D_2}{\rho_1 D_1 + \rho_2 D_2}} \left[\frac{\Delta F}{2F} + H \left(\frac{1}{2F} - \frac{1}{\sqrt{n^2(4F^2 + d^2)} - d^2} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

де E – поглинута енергія;

F - фокусна відстань;

ΔF – розфокусування (відстань від фокуса лінзи до поверхні металу);

d – діаметр світлового пучка, що падає на лінзу;

n – показник заломлення прозорого конденсованого середовища;

H – товщина шару прозорого конденсованого середовища.

Як бачимо із формули, при всіх інших постійних значеннях параметрів, що визначають ефективність лазерної ударно-хвильової обробки, особливо важливим є товщина шару прозорого конденсованого середовища, яка впливає на час затримки плазми біля поверхні, а значить, час дії і форму заднього фронту імпульсу тиску ($H = ct$, де t - час дії тиску, c - швидкість звуку). При зміні товщини шару прозорого конденсованого середовища на 100 мкм (при початковій товщині 200 мкм) тиск може змінитись на 20-25%. Так само дуже важливим є розфокусування. Воно також пов'язане із товщиною шару прозорого конденсованого середовища і фокусною відстанню фокусувальної системи. При використанні у якості прозорого конденсованого середовища епоксидної смоли з показником заломлення $n = 1,9$, лінзи діаметром $d = 0,045$ м з фокусною відстанню $F = 12,5$ см і зміні товщини шару прозорого конденсованого середовища від 100 мкм до 500 мкм із отриманої нами формули видно, що доданок $\Delta F/2F$ (половина відносного фокусування) від множника

$$\left[\frac{\Delta F}{2F} + H \left(\frac{1}{2F} - \frac{1}{\sqrt{n^2(4F^2 + d^2)} - d^2} \right) \right]$$

становить 70-75%. На практиці в лабораторних умовах ΔF точно не вимірюється, а приблизно дорівнює 5-10% від фокусної відстані F . При сталій фокусній відстані F зміна розфокусування ΔF сильно впливає на значення тиску. Так, при збільшенні розфокусування у 2 рази тиск зменшується на порядок.

На рис. 2 представлено трьохвимірний графік залежності тиску при зміні товщини шару прозорого конденсованого середовища і розфокусування для вказаних вище умов.

Як видно з рис. 2, тиск спадає із збільшенням значень розфокусування та товщини шару прозорого конденсованого середовища. Так, при $\Delta F = 7,5$ мм і $H = 1$ мм, $P = 8,2 \times 10^9$ Па, а при $\Delta F = 12,5$ мм і $H = 3$ мм, $P = 4 \times 10^9$ Па.

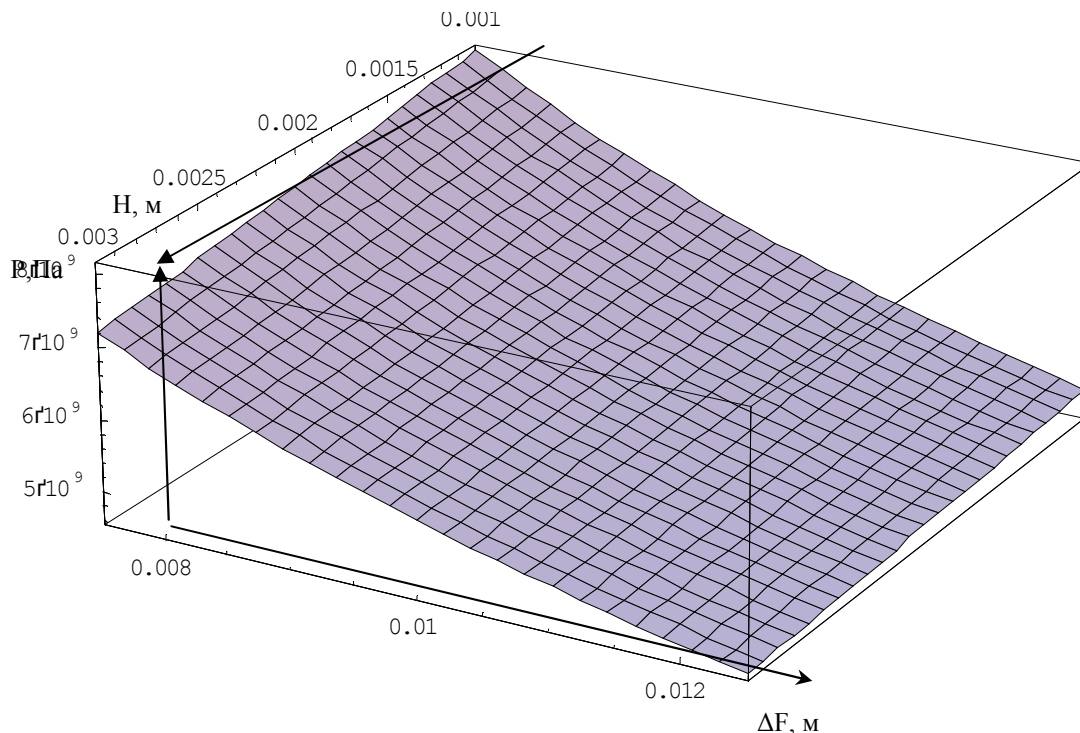


Рисунок 2 – Графік залежності тиску від товщини шару прозорого конденсованого середовища та розфокусування лазерного пучка

Слід пам'ятати, що ці величини взаємопов'язані і їх підбір та оптимізацію необхідно спочатку оцінити, а потім обов'язково перевірити експериментально.

Розглянемо основні блоки, що повинні входити до складу типових світлотехнічних установок, призначених для лазерної ударно-хвильової обробки, на прикладі лазерного комплексу лабораторного типу, що створений нами на базі лазера ГОС-1001. Основні блоки комплексу та схема опромінення, контролю параметрів лазерного імпульсу і реєстрації сигналів з досліджуваних об'єктів представлені на рис. 3. До складу комплексу повинні входити блоки або самостійні складові частини, що забезпечують контроль лазерного променя в просторі та часі. Найперше – це блок індикації параметрів лазерного імпульсу (1), регулятор енергії світлового потоку (2), оптична система для візуального контролю та керування лазерним пучком (3), що спрямований на об'єкт обробки (4) та юстуючий пристрій (5).

При розробці та виготовленні світлотехнічних систем, необхідних для широкого використання лазерної ударно-хвильової обробки як прогресивного методу модифікації матеріалів, в конкретних технологічних процесах необхідно брати до уваги як технічні, так і економічні чинники. Найперше – це вимоги, що стосуються не тільки ціни таких систем, але і їх ефективності та надійності в процесі експлуатації, сервісно-гарантійному обслуговуванні та ремонті. Тобто необхідно прагнути досягти унікального співвідношення ціни та якості лазерної установки для ударно-хвильової обробки різнотипних матеріалів, а також тих можливостей, які вона надає при цьому.

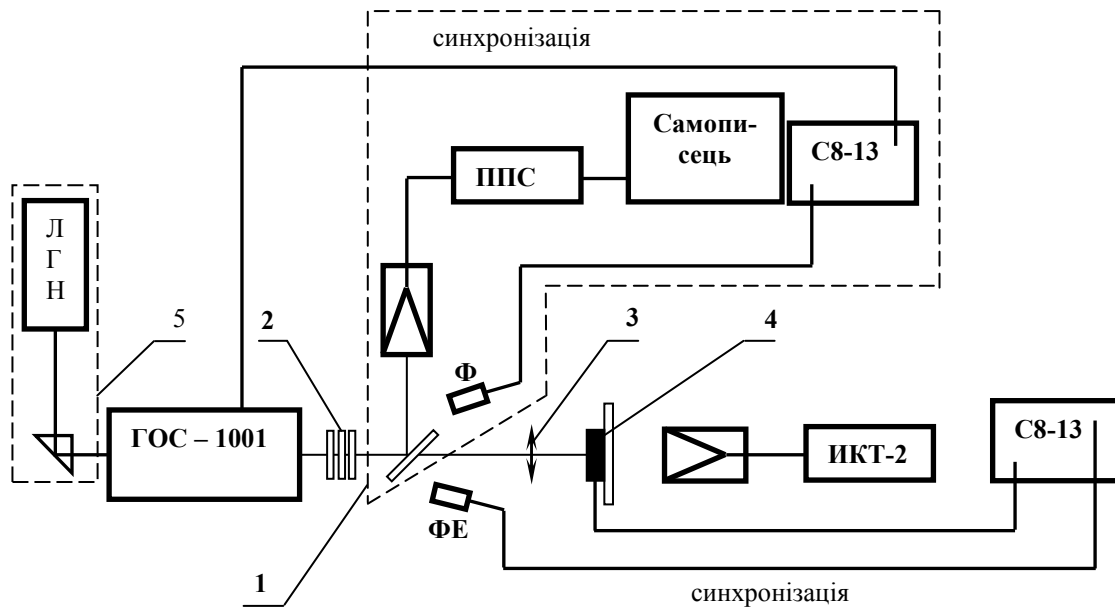


Рисунок 3 - Основні блоки комплексу та схема опромінення, контролю параметрів лазерного імпульсу і реєстрації сигналів з досліджуваних об'єктів:
 1 – блок індикації параметрів лазерного імпульсу; 2 – регулятор енергії світлового потоку;
 3 – оптична система для візуального контролю та керування лазерним пучком;
 4 – об'єкт обробки; 5 – іюстуючий пристрій

Відмінною особливістю запропонованого комплексу є наявність двох оптичних випромінювачів з різними активними елементами і спільними блоками: живлення, керування енергією накачки, індикації параметрів лазерного імпульсу. В установці вмонтовані пасивні модулятори добротності та передбачена можливість використання модуляторів інших типів. В якості активних елементів використовуються неодимовий та рубіновий стержні різних геометричних розмірів.

Використання системи із двома випромінювачами дозволяє:

- розширити діапазон регулювання густини потоку енергії при різних площах поверхонь опромінюваних об'єктів;
- здійснювати ефективну модифікацію механічних властивостей об'єктів завдяки застосуванню випромінювання різних довжин хвиль та тривалостей;
- змінювати умови опромінення в більш широкому діапазоні фокусування випромінювання та регулювати рівномірність поглинання енергії по об'єму;
- одержувати ширший спектр тривалостей ударно-хвильових імпульсів завдяки різним модуляторам добротності (відповідно до довжини хвилі випромінювання).

Глибоке знання фізики процесів, що протікають при лазерній ударно-хвильовій обробці, сприяють оптимізації прийнятих рішень. Наприклад, як впливає із наведених вище формул, не завжди є потреба та необхідність підвищувати енергію лазерної установки для отримання того самого значення тиску, а достатньо вибрати оптимальне прозоре конденсоване середовище. Важливим може виявитись, як показали наші недавні експерименти щодо генерації тиску ударної хвилі, модовий характер випромінювання в умовах наявності прозорого конденсованого середовища і вплив останнього на фокусування потоку енергії, що падає на опромінюваний об'єкт.

Висновок. Незважаючи на те, що можливості лазерної ударно-хвильової обробки, особливо в області ударних хвиль малої амплітуди, вивчені недостатньо повно, настала необхідність, паралельно із дослідженнями фізичних процесів при лазерній ударно-хвильовій дії, не тільки інформувати спеціалістів, але і вести розробки світлотехнічних установок для здійснення такого типу обробки з метою використання потенціалу наших науковців і спеціалістів в області світлотехніки.

1. Patrice Peyre, Christelle Carboni, Arnaud Sollier, Laurent Berthe, Caroline Richard, E.de Los Rios, and Remy Fabbro New trends in laser shock waves physics and applications//Proceedings of SPIE Vol. 4760, 2002. - P. 654 – 666.
2. Gnatyuk V.A, Aoki T., Hatanaka Y. Laser-induced shock wave stimulated doping of CdTe crystals //Appl. Phys. Lett. 88, 242111 (2006).
3. Fan Y., Wang Y., Vukelic S., and Yao Y.L. Wave-solid interaction in laser-shock-induced deformation processes// Journal of Applied Physics 98, 104904, 2005.
4. Янушкевич В.А. Критерий возможности образования ударных волн при воздействии лазерного излучения на поверхности поглощающих конденсированных сред // ФХОМ. – 1975. – №5. – С. 9-11.
5. Нищенко М.М., Ковалюк Б.П., Никифоров Ю.Н. Влияние ударных волн, генерируемых при воздействии наносекундных лазерных импульсов на фазовые превращения в стали X18H10T // Металлофиз. новейшие технол. –2004. – Т.26, № 9. – С. 1227-1240.
6. Модификация материалов лазерными и ионными пучками. /Под ред. проф. Чэнь Чао. – Минск: Унитех, 1998. – 144 с.
7. Канель Г.И., Фортов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН.- 2007. –Т.177, № 8.- С. 809-830.
8. Заспа Ю.П., Шалапко Ю.И. Модификация поверхности псевдо-сплава титана излучением лазера на неодимовом стекле в режиме генерации гигантских импульсов // Металлофиз и новейшие технол. 2003 т.25, №1. - С.81-88.
9. Байдуллаева А., Булах М.Б., Власенко А.И., Ломовцев А.В., Мозоль П.Е. Динамика развития поверхностных структур в кристалла р-CdTe при облучении импульсным лазерным излучением // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып 1. – С. 26-29.
10. Никифоров Ю.Н., Ковалюк Б.П., Гладь В.Б., Марущак П.О., Мочарский В.С. Влияние наносекундного лазерного облучения, сопровождающегося генерацией ударных волн на сталь 15X13МФ // Материалы 7-й международной конференции “Взаимодействие излучений с твердым телом”, (26-28 сентября 2007 г. Минск, Беларусь). - С. 211-213.
11. Нанорозмірні системи. Будова – властивості – технології. Тези конференції НАНСИС 2007 (21 – 23 листопада 2007, Київ, Україна). – 628 с.

Одержано 24.09.2008 р.