

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА  
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА”



МІНІСТЕРСТВО  
ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ



United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization

**М.А.Н.**

• Мала академія наук  
• України під егідою  
• ЮНЕСКО

# ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ XVII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ “АКАДЕМІЧНА Й УНІВЕРСИТЕТСЬКА НАУКА: РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ”



**12-13 ГРУДНЯ 2024 РОКУ**

УДК 539.2:621.315.548.0: 612.029.62, 621.315.592

ОСОБЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ ТА ПОШИРЕННЯ УДАРНОЇ ХВИЛІ В  
НАПІВПРОВІДНИКАХ ПРИ НАНОСЕКУНДНОМУ ЛАЗЕРНОМУ  
ОПРОМІНЕННІ

**С.М. Левицький**

*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ*

*[levytskyi@ua.fm](mailto:levytskyi@ua.fm)*

**Шефер О.В.**

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

*[itm.ovshefer@nipp.edu.ua](mailto:itm.ovshefer@nipp.edu.ua)*

При потужному наносекундному лазерному опроміненні структур метал(In)/p-CdTe (CdMeTe) в напівпровіднику відбувається утворення інверсійного приповерхневого шару, тобто шару *n*- типу провідності (відносно *p*- типу провідності) за рахунок процесів дифузії (масопереносу) атомів індію (In), які виступають в ролі донорів. При наносекундному опроміненні масоперенос – за означенням це швидка дифузія, оскільки цей процес триває десятки-сотні наносекунд – відбувається за рахунок механізмів різної фізичної природи. Зокрема, це такий механізм як виникнення та поширення УХ, що призводить до генерації, зміни та перерозподілу системи точкових і протяжних дефектів [1]. А також механізм генерації та релаксації різких просторових градієнтів та швидкостей наростання температури та відповідно термонапруг (тиску) ( $dT/dx$ ,  $dP/dx$ ,  $dT/dt$ ,  $dP/dt$ ), оскільки при лазерному опроміненні з наносекундною тривалістю імпульсу швидкість надходження тепла в приповерхневий шар (тобто на глибину оптичного скін-шару та на глибину  $\sqrt{\chi\tau}$ ) є дуже значною по відношенню до швидкості поширення тепла в об'єм за рахунок тепло- та температуро- провідності. Процес генерації термонапруг (які є причиною бародифузії) та їх поширення є суттєво нелінійним та нестационарним процесом, який згодом при еволюції (поширенні імпульсу тиску) призводить до виникнення ударної хвилі. Останнім часом широко застосовується метод лазерно-індукованого легування приповерхневого шару кристалів CdTe та TR на його основі, попередньо покритих плівкою In, при

створенні бар'єрних структур для детекторів іонізуючого випромінювання. Тому актуальним є розрахунок глибини утворення УХ для контролю процесу дифузії, а також з'ясування особливостей виникнення та поширення ударної хвилі в напівпровідниках та структурах при імпульсному лазерному опроміненні.

Ударна хвиля - поверхня розриву, при перетині якої тиск, густина і температура різко зростають, а швидкість поширення збурення у середовищі різко зменшується. Ударна хвиля є прикладом нормального гідродинамічного розриву, і через неї тече потік речовини (на відміну від тангенціального розриву, через який речовина не тече). З макроскопічної точки зору ударна хвиля являє собою уявну поверхню, на якій термодинамічні величини середовища (які, як правило, змінюються у просторі неперервно) мають скінченні стрибки. При переході через фронт ударної хвилі змінюється тиск, температура, густина речовини, ентропія середовища, а також швидкість її руху (коливальна швидкість) щодо фронту ударної хвилі. Тут під ударною хвилею будемо розуміти хвилю з "перекинутим" профілем (фронтом) згідно [2], що є рухомою в речовині поверхнею розриву неперервності термодинамічних величин. Ударні хвилі не мають властивості адитивності у тому розумінні, що термодинамічний стан середовища, що виникає після проходження однієї ударної хвилі, не можна одержати послідовним пропусканням двох ударних хвиль меншої інтенсивності. Акустичні хвилі являють собою коливання густини середовища, що поширюються у просторі. Рівняння стану звичайних середовищ таке, що в області підвищеного тиску швидкість акустичних коливань (тобто швидкість поширення збурень) зростає (фактично акустична хвиля є нелінійною хвилею). При поширенні ця нелінійність неминуче призводить математично до "перекидання розв'язків", які і породжують ударні хвилі. В силу цього механізму, ударна хвиля у звичайному середовищі - це завжди хвиля стиску. Однак у тих системах, у яких швидкість поширення збурень зменшується з ростом густини, буде спостерігатися ударна хвиля розрідження. Для швидкого

перетворення коливання густини в ударну хвилю потрібні сильні початкові відхилення від рівноваги. Цього можна домогтися створенням акустичної хвилі дуже великої інтенсивності при імпульсному лазерному опроміненні (ІЛО).

Довжина фронту УХ у напівпровіднику порядку міжатомних відстаней. Характерною відмінністю УХ від хвилі напруг полягає в тому, що передача імпульсу від стиснутої ударною хвилею речовини до не збудженої частини має характер не колективного руху атомів, а індивідуальних зіткнень.

Акустичний імпульс у твердому тілі за рахунок фізичної нелінійності є нелінійною хвилею [3]. Під фізичною нелінійністю будемо мати на увазі різницю (неперервну зміну) модулів пружних постійних  $C_{ijkl}$  і густини по координаті в напрямку поширення хвиль у кожній крапці імпульсу. Інакше кажучи, це залежність  $C_{ijkl}$  та  $\rho$  від деформації, відхилення від закону Гука. Швидкість звуку

у твердому тілі  $v = \sqrt{\frac{C_{ijkl}}{\rho}}$ , відповідно, збільшення швидкості за рахунок зміни

пружності та густини  $dv = \sqrt{\left(\frac{dC_{ijkl}}{d\rho}\right)}$  (рис.1). Тому більш "швидкі" компоненти

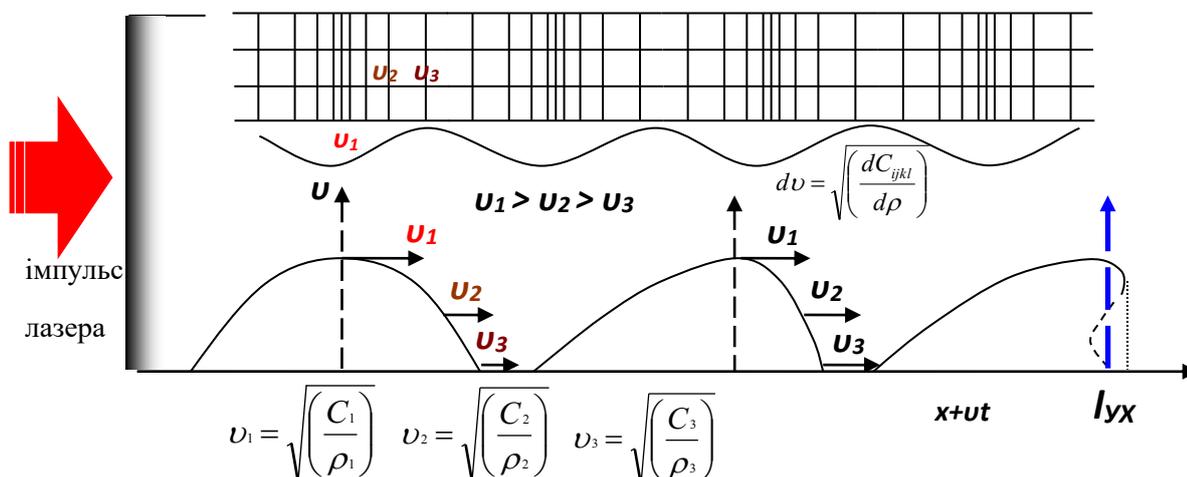
(гармоніки) імпульсу будуть наздоганяти більш "повільні". Це відповідає перекачуванню енергії від низькочастотних (НЧ) гармонік до більш високочастотних (ВЧ) - відповідно профіль імпульсу буде спотворюватися, укручуватись. Укручення профілю звукової хвилі призводить до декількох ефектів. По-перше, до утворення розривів, так що по протіканню часу синусоїдальна спочатку хвиля перетвориться у пилкоподібну хвилю. Крім того, укручення профілю, залишаючи рух у хвилі періодичним, суттєво змінює спектральний склад хвилі. У початковій монохроматичній хвилі із частотою  $\omega$  у міру поширення нарастають високочастотні гармоніки. Причому високі обертони  $n\omega$  з більшим  $n$  досягають максимуму в місці найбільшої крутості. При цьому відбувається неперервне перекачування енергії з основної гармоніки у високі обертони. Оскільки загасання звуку пропорційно приблизно квадрату

частоти, це призводить до більш сильного загасання хвилі, тобто зростання амплітуди ВЧ веде до збільшення затухання, коефіцієнт затухання  $\alpha_{\text{акуст}} \sim f^n$ ,  $f$  – частота,  $n = 2 \dots 3$ , відповідно енергія буде більш розсіюватись. Укручення фронту хвилі буде відбуватися доти, поки не стабілізується дисипативними процесами. Таким чином, профіль хвилі залежить від співвідношення нелінійних і дисипативних ефектів і її інтенсивності. Якщо амплітуда хвилі досить велика, то домінують нелінійні ефекти і профіль хвилі зрештою "перекинесться" і утвориться ударна хвиля. У іншому випадку хвиля за рахунок дисипації встигає загаснути раніше, ніж у ній накопичуються нелінійні ефекти [2].

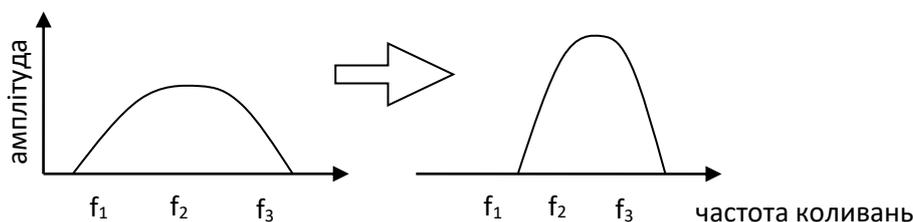
Слід зазначити, що для твердого тіла повне рівняння стану відсутнє, що утруднює теоретичний опис виникнення та поширення УХ. Тому частіше використовують модель газу, для якого це рівняння відоме. При цьому у твердому тілі аналогом показника адіабати є показник ізентропи [4].

В однорідному ізотропному газі з рівноважними значеннями  $P_0$ , густини  $\rho_0$ , у нелінійній хвилі малі збурювання тиску  $P'$ , густини  $\rho'$ , дадуть до швидкості поширення  $a_0$  добавку  $u$  ( $u \ll a_0$ ),  $\bar{u} = 0$ . Швидкість звуку рівна  $a = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_s}$ . У лінійному, акустичному наближенні  $u = 0$  і всі точки профілю звукової хвилі поширюються з однаковою швидкістю  $a_0$ . У наступному, першому наближенні для швидкості  $v$  переміщення точок профілю звукової хвилі в ідеальному газі  $v = a_0 + \frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_0)\rho' = a_0 + \frac{\gamma + 1}{2}u$ ,  $\gamma$  - показник адіабати. Тому з плином часу буде відбуватися перекручування профілю біжучої хвилі і утворення розриву, перекидання (без врахування дисипації). У випадку еволюції плоскої гармонійної звукової хвилі, збуджуваної в ідеальному газі площиною при  $x = 0$ , тобто  $u = u_0 \sin \omega t$  при  $x = 0$  розв'язок для часу та координати утворення розриву, або перекидання профілю буде  $t_s = \frac{\lambda}{u_0} \frac{1}{\pi(\gamma + 1)}$ ,  $x_s = \frac{a_0}{u_0} \frac{\lambda}{\pi(\gamma + 1)}$ , де  $\lambda = 2\pi a_0 / \omega$ . [5].

Більш повні, але дуже складні, вирази для часу та координати утворення УХ у твердому тілі наведені у [6].



**Рисунок 1 - Схема утворення ударної хвилі при імпульсному лазерному опроміненні твердого тіла.**



**Рисунок 2 - Схема перекачування енергії від низькочастотних гармонік до високочастотних при поширенні нелінійної акустичної хвилі після імпульсного лазерного опромінення твердого тіла.**

На рис.1 наведено кристалічну ґратку при поширенні в ній акустичної хвилі – є області стиску та області розтягу, а також дано профіль нелінійної акустичної хвилі, на якій виділено три області – пік (максимальна швидкість поширення збурення,  $v_1$ ), границя незбуреної області (мінімальна швидкість поширення збурення,  $v_3$ ), та посередині ( $v_2$ ). Така схема разом з вищесказаним пояснює утворення УХ. З рис.2. видно, що при поширенні нелінійної акустичної хвилі після імпульсного лазерного опромінення твердого тіла відбувається

перекачування енергії від низькочастотних гармонік до високочастотних, за рахунок чого і відбувається укручення профілю.

На прикладі CdTe показано, що ударна хвиля у твердому тілі при утворенні та поширенні, а також перед самим виникненням - за рахунок поступового збільшення градієнту тиску - призводить до утворення дислокацій. При цьому густина дислокацій збільшується із глибиною і є максимальною в місці утворення ударної хвилі.

### Література:

1. V.A. Gnatyuk, T. Aoki, M. Niraula and Y. Hatanaka. *Influence of laser irradiation and laser-induced In doping on the photoluminescence of CdTe crystals // Semicond. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 18, P. 560–565.
2. А. Байдулаєва, В.П. Велешук, О.І. Власенко, В.А. Гнатюк, Б.К. Даулетмуратов, С.М. Левицький, Т. Аокі. *Механізми масопереносу індію в CdTe при дії наносекундних лазерних імпульсів // "Український фізичний журнал".* – 2011. – Т.55, № 2. – С. 171-177.
3. V.P. Veleschuk, A.I. Vlasenko, E.I. Gatskevich, V.A. Gnatyuk, G.D. Ivlev, S.N. Levytskyi, T. Aoki. *Doping of Cadmium Telluride by Indium at Nanosecond Laser Irradiation of In/CdTe Structure. Journal of Materials Science and Engineering B.* – 2 (4) 2012. – P. 230-239.
4. В.П. Велешук, А. Байдулаєва, А.И. Власенко, В.А. Гнатюк, Б.К. Даулетмуратов, С.Н. Левицький, О.В. Ляшенко, Т. Аокі. *Масоперенос індія в структурі In-CdTe при наносекундному лазерному облученні // ФТТ.* – 2010. – Т. 52, вып. 3. - С. 439 – 445.
5. Robert Triboulet and Paul Siffert. *CdTe and related compounds; physics, defects, hetero- and nano-structures, crystal growth, surfaces and applications.* - 2010.- Elsevier Ltd. 417 p.
6. Otfried Madelung. *Semiconductors: Data Handbook. Springer. 3rd ed., 2004, XIV, 691 p.*