

Література:

1. Krykun, P., Pavlenko, V., Korendovych, V., Yassenko, S., & Tkach, M. (2024). Розбудова національної системи оборонного планування України за Євроатлантичними принципами: воєнно-історичний аналіз. *Journal of Scientific Papers Social Development & Security*, 14(3), 14–32. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.3.2>
2. Просянкіна-Жарова Т. І. Інформаційні технології для систем підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06. Київ, 2025. 50 с.
3. Schneider Electric. (n.d.). Schneider Electric. <https://www.se.com/ua/uk/work/campaign/innovation/platform/>
4. Hlushko, A., Laktionov, O., Yanko, A., & Isaiev, O. (2025). Models for industry differentiation in decision-making systems with an application to the Ukrainian economy. *Radioelectronic and computer systems*, 2025(3), 37–52. <https://doi.org/10.32620/reks.2025.3.03>
5. Laktionov, O., Yanko, A., Boriak, B., & Mykhailichenko, O. (2025). Predicting robotic platform missions using a kernel activation network with an asymmetric kernel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(9 (137)), 93–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.340833>
6. Laktionov, O., Shefer, O., Fryz, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of a comprehensive indicator for diagnosing massive missile strikes. *Advanced Information Systems*, 9(2), 44–50. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.06>

УДК 539.2:621.315.548.0: 612.029.62, 621.315.592

МЕХАНІЗМИ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ CdTe ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ОПРОМІНЕННІ.

С.М. Левицький, к.т.н., с.н.с., ст. дослідник
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лаукарьова НАНУ
levytskyi@ua.fm

О.В. Шефер, д.т.н., доцент,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
itm.ovshefer@nupp.edu.ua

В роботі наведено дослідження порогових процесів в CdTe – дефектоутворення, плавлення при потужному наносекундному лазерному опроміненні, математично обраховано залежність порогової інтенсивності плавлення від тривалості імпульсу лазера.

Нелінійний, близький до експоненційного характер залежності $A(I)$ після порогу плавлення I_{th} пояснюється додаванням амплітуд акустичного тиску від різкої зміни об'єму при плавленні, акустичної емісії при плавленні – кристалізації та тріщиноутворенні, від реактивної дії парів з розплаву і від розширення хмари гарячої плазми. Відомо, що процеси фазових переходів і нерівноважного пароутворення при імпульсному лазерному опроміненні можуть на порядок збільшувати амплітуду акустичного відгуку.

Додатковий внесок в амплітуду акустичного тиску дають наступні механізми:

Акустична емісія – випромінювання внутрішніх спонтанних акустичних хвиль шумового характеру при локальній динамічній перебудові структури твердого тіла, що супроводжується виникненням і зривом механічних напруг у локальних об'ємах при тріщиноутворенні, утворенні дислокацій, при фазових перетвореннях тверде тіло – рідина

(плавлення) і рідина – тверде тіло (кристалізація) у монокристалах, зокрема при імпульсному лазерному опроміненні [31-33, 38].

Величина тиску при фазовому переході визначається в лінійному по $\Delta\rho_{sl}$ наближенні від зміни густини при плавленні $\Delta\rho_{sl} = \rho_s - \rho_l$ згідно виразу $P_{sl} = \Delta\rho_{sl} d(Vh)/dt$, де V – швидкість зміни товщини шару розплаву h . Величина P_{sl} квадратично залежить від максимального значення V .

Імпульс віддачі нерівноважних парів над поверхнею розплаву при досягненні порогу плавлення, причому тиск пари досягає при плавленні 900 МПа і може зростати приблизно на порядок при зростанні температури нагрівання поверхні на 100 К. Перед досягненням порогу плавлення I_{th} з'являється імпульс віддачі при випаровуванні атомів з більшою летючістю.

Світлодетонаційний тиск $P_{дет} = (a_n \tau)^{-1/3} I^{3/4}$, що виникає за рахунок розширення хмари гарячої плазми над поверхнею кристалу. Коефіцієнт a_n характеризує властивості плазми та залежить від заряду та атомної ваги іону. Можливий також перехід світлодетонаційного імпульсу в ударну хвилю.

Загальна величина тиску індукованих акустичних коливань $P_{акуст} = P_{фТА} + P_{нелін}$, де $P_{нелін}$ спричиняє нелінійність залежності $A(I)$ і, у свою чергу, визначається парціальними внесками декількох різних механізмів:

$$P_{нелін} = P_{AE} + P_{sl} + P_{напів} + P_{дет}, \quad (1)$$

де, P_{AE} - сумарний тиск, створений акустичними імпульсами акустичної емісії при фазових переходах та утворенні дислокацій і мікротріщин; P_{sl} – сумарний тиск від фазових переходів тверде тіло-рідина і рідина-тверде тіло; $P_{напів}$ – тиск віддачі парів.

Тиск віддачі атомів з більшою летючістю до порогу плавлення малий у порівнянні з фототермоакустичним сигналом при наносекундному ІЛО при даній інтенсивності. При досягненні порогу плавлення нелінійне зростання амплітуди акустичного сигналу відбувається за рахунок доданків P_{AE} , P_{sl} , $P_{напів}$ та $P_{дет}$.

Відмітимо, що прямі функціональні залежності всіх доданків $P_{нелін}$ від параметрів лазерного випромінювання та фізичних властивостей напівпровідникових сполук малодосліджені та не визначені, оскільки механізми (процеси) перетворення енергії імпульсів лазерного випромінювання в енергію хаотичних акустичних коливань після порогу плавлення досить складні. Розрахунок внеску кожного окремого механізму збудження в загальну величину тиску при ІЛО в цьому випадку вимагає спеціального розгляду.

Було встановлено, що поріг плавлення твердих розчинів на основі CdTe – Cd(Zn, Hg) в області фундаментального поглинання при стехіометричному складі до 1 % (Zn, Hg виступає в ролі легуючої домішки) в межах похибки не відрізняється від порогу плавлення CdTe.

Відмітимо, що акустоємісійний метод вивчення порогових процесів, зокрема порогу плавлення, має певну перевагу над типовими методами – метод відбивання зондуючого променя від поверхні, рентгенівський метод, оптична та атомно-силова мікроскопія, тощо, оскільки даний метод чутливий до процесів локальної перебудови структури твердого тіла, а ультразвукові сигнали містять інформацію щодо вивільненої енергії при таких процесах (зрив напруг, плавлення, кристалізація, абляція).

Експериментально виявлено, що процес лазерно-індукованого локального плавлення напівпровідників спричиняє нелінійну залежність амплітуди індукованого акустичного відгуку в діапазоні 20 – 2000 кГц від інтенсивності наносекундного лазерного випромінювання. Це пояснюється сумуванням акустичних імпульсів, індукованих при різкій зміні об'єму при плавленні, тиском нерівноважних парів над розплавом і розширенням хмари гарячої плазми, а також акустичною емісією при зародженні дислокацій і при фазових перетвореннях тверде тіло-рідина та рідина - тверде тіло.