

УДК 621.315.592

Яковина В.С.¹, Нікіфоров Ю.М.², Берченко М.М.¹¹ДУ “Львівська політехніка”, кафедра напівпровідникової електроніки²Тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулля

ВПЛИВ ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2$)

© Яковина В.С., Нікіфоров Ю.М., Берченко М.М., 2000

Об'ємні монокристали $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ n-типу обробляли лазерно-індукованими ударними хвилями (ЛУХ) без термічного впливу. Показано, що зміни концентрації носіїв заряду становлять до 120 %, а їх рухливості до 45 % від вихідної. Пропонується пояснення цих змін взаємною дією трьох механізмів взаємодії ЛУХ з дефектною підсистемою кристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Bulk n- $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ samples were treated using laser induced shock waves (LSW) without thermal effects. It is shown that the carrier density changes up to 120 % and their mobility changes up to 45 %. Three mechanisms of interaction between LSW and bulk $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ defect subsystem are given.

Вступ

Дослідження впливу ударних хвиль (УХ) на напівпровідники має важливе значення як для фундаментальної, так і для прикладної науки. Лазерно-індуковані ударні хвилі (ЛУХ) є зручнішими порівняно з УХ іншого походження (вибухові, внаслідок бомбардування прискореними електронами та іонами), оскільки лазерна обробка створює кращі умови експерименту, дозволяє більш гнучко контролювати параметри УХ зміною параметрів лазерного випромінювання.

Відомо, що поширення в об'ємі кристала УХ може призводити до генерації різного роду точкових дефектів, концентрація яких досягає 10^{-4} ат. % [1]. При цьому суттєво змінюються характеристики напівпровідників та приладів на їх основі [2].

У роботі [3] наведено критерій утворення ударних хвиль під час дії лазерного випромінювання на поверхню поглинаючих конденсованих середовищ, а також розглянуто можливість утворення УХ при дії лазерними імпульсами різної тривалості та енергії.

У роботі розглядається взаємодія дефектної підсистеми об'ємних монокристалів твердих розчинів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ з ЛУХ і відповідна зміна електрофізичних параметрів матеріалу.

Методика експерименту

Досліджувались об'ємні монокристалічні зразки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2$) n-типу провідності з різною вихідною структурною досконалістю як нелеговані, так і підлегвані індієм на рівні 10^{14} см^{-3} .

Лазерні ударні хвилі створювались опроміненням зразків при кімнатній температурі за допомогою неодимового лазера ГОС-1001 з LiF затвором, що працює в режимі моду-

льованої добротності (довжина хвилі випромінювання 1,06 мкм, тривалість імпульсу – 30 нс). Опромінення (крім окремо зазначених випадків) проводилось одним імпульсом випромінювання, що забезпечувало проходження однієї ЛУХ через кристал. Для захисту від прямої дії лазера напівпровідник був захищений мідною фольгою завтовшки 100 мкм, а сам він кріпився на масивній металічній підкладці для виводу хвилі розвантаження. Крім того в місцях контакту фольга-зразок та напівпровідник-підкладка були забезпечені добрі акустичні контакти для узгодження ударних імпедансів та запобіганню розколювання зразка при виході УХ. Розміри зразків вибирались так, щоб ударний стиск був однорідним і одно-вісним (типові розміри $5 \times 6 \times 1$ мм³).

Принциповою відмінністю від експериментів роботи [5] є захист зразків від безпосередньої дії випромінювання лазера. Оскільки глибина проникнення теплової хвилі в режимі генерації УХ становить декілька мікрометрів, то навіть така тепла дія в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ може зумовити розпад твердого розчину, дифузії ртуті та інших відомих проявів теплової дії. Отже, умови експерименту підбирались так, щоб уникнути теплового впливу взагалі і бути переконаними, що вплив на кристал відбувався саме завдяки проходженню УХ.

Обговорення результатів

Зміна параметрів напівпровідника визначалась за допомогою вимірювання польових залежностей ефекту Холла при кімнатній температурі та при 77 К. Діапазон магнітних полів, за яких проводили вимірювання лежить в межах 0,02...1,4 Тл. Під час розрахунків за двозонною моделлю криві будували до 10 Тл – значення поля, при якому коефіцієнт Холла досягає насичення. Як було показано в [6], польові залежності ефекту Холла при температурі рідкого азоту добре корелюють з електричною активністю протяжних дефектів в телуриді кадмію-ртуті.

Гальваноманітні вимірювання проводились через тривалий час після ударно-хвильової обробки (>60 діб) з метою виявлення стабільних у часі, остаточних змін дефектної структури напівпровідника. Параметри вихідних та типових оброблених зразків при температурі рідкого азоту наведено в таблиці. У цій же таблиці наведені склад твердого розчину та відношення коефіцієнта Холла в слабкому полі до коефіцієнта в сильному, де він досягає насичення. Склад досліджуваних твердих розчинів визначали з власної концентрації носіїв при кімнатній температурі.

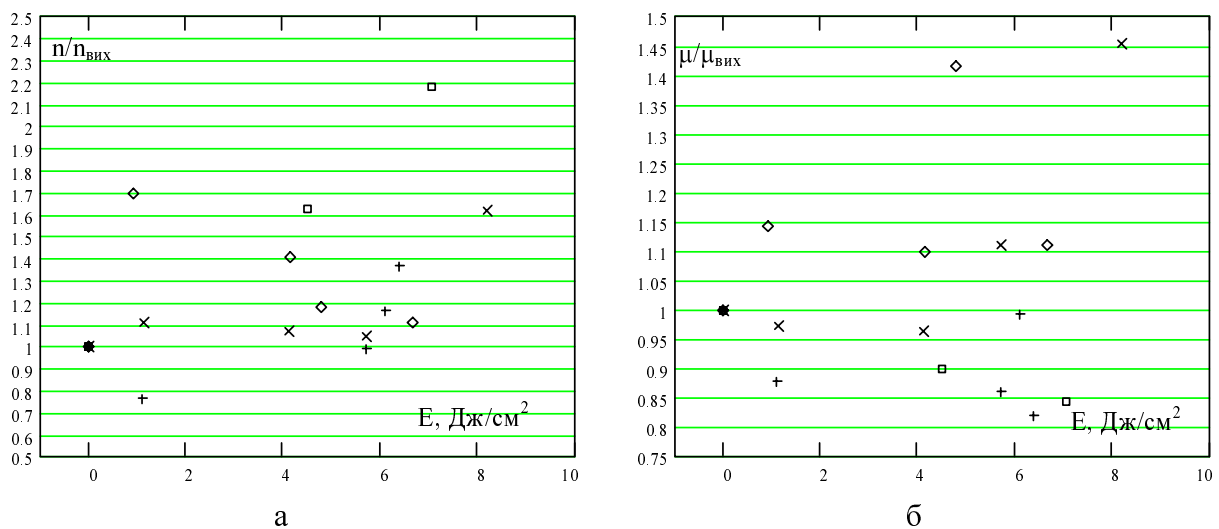
Електрофізичні параметри вихідних та типових оброблених зразків при 77 К

Зразок	$n_1, \text{см}^{-3}$	$n_2, \text{см}^{-3}$	$\mu_1, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\mu_2, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	$R_H(B \rightarrow 0)/R_H(B \rightarrow \infty)$	Склад, х
Л93-4-5-2	$1.17 \cdot 10^{14}$	$4.94 \cdot 10^{13}$	149 600	7 728	1.358	0.212
Л93-4-5-2*	$1.36 \cdot 10^{14}$	$6.59 \cdot 10^{13}$	148 500	6 601	1.417	0.198
Л92-97-10-2	$1.16 \cdot 10^{14}$	$2.36 \cdot 10^{13}$	195 300	10 140	1.177	0.207
Л92-97-10-2*	$1.21 \cdot 10^{14}$	$3.29 \cdot 10^{13}$	216 800	6 705	1.248	0.204
Л90-391-11-1	$3.71 \cdot 10^{14}$	—	81 470	—	1.028	0.210
Л90-391-11-1*	$8.08 \cdot 10^{14}$	—	68 810	—	1.094	0.213
2Д92-17-8	$5.54 \cdot 10^{14}$	—	149 500	—	1.062	0.213
2Д92-17-8*	$7.79 \cdot 10^{14}$	—	164 200	—	1.051	0.211

* – оброблений зразок

Аналізуючи залежності електрофізичних параметрів від густини енергії лазерного імпульсу, що генерував УХ в кристалах, насамперед хотілося б зазначити зростання концентрації носіїв заряду в матриці зі збільшенням густини енергії у всьому діапазоні, що використовувався в наших дослідженнях. Оскільки це кристали n-типу, то такий факт може свідчити про введення домішки донорного типу, що збігається з висновками [7], де такими дефектами вважають дислокації.

З іншого боку поведінка рухливості носіїв в цих же зразках не така однозначна: в одному з них (Л92-97-10-2) вона зростає зі збільшенням густини енергії майже на 50 % від вихідної, в трьох інших залишається майже незмінною (Л93-4-5-2) або слабо спадає (Л90-391-11-1) (чи зростає в зразку 2Д92-17-8) в межах 10...15 % від початкового значення. Така поведінка рухливості в досліджуваних зразках дещо суперечить ідеї про введення донорних домішок, оскільки в [7] спостерігалось збільшення концентрації електронів та зменшення їх рухливості. Типові графіки залежностей концентрації та рухливості (нормованих до відповідних початкових значень) від густини енергії лазерного імпульсу показано на рисунку.



Залежності приведеніх концентрації (а) та рухливості (б) від густини енергії лазерного імпульсу (однакові символи на обох рисунках відповідають одному зразку).

В [1] показано, що: при проходженні УХ виникає висока концентрація точкових дефектів; генерація дефектів в напівпровідниках не пов'язана з пластичною деформацією; генерація дефектів не пов'язана з термічною активацією при нагріванні; для утворення точкових дефектів необхідна саме УХ, оскільки акустична хвиля, а тим більше статичне навантаження подібного ефекту не роблять; генерація точкових дефектів спостерігається при таких амплітудах УХ, коли середня енергія на атом становить усього соті частини електрон-вольта.

У тій же роботі зазначено, що найбільш ефективними центрами розсіювання є власні дефекти та важкі домішки. Показано, що імовірність пошкодження експоненційно залежить від надлишкової кінетичної енергії, що набувається центром розсіювання у фронті УХ. Надлишкові імпульс та повна енергія з імовірністю дефектоутворення не корелюють. Показано також, що основним механізмом взаємодії УХ з пластичними матеріалами (в [1] досліди проводились на Si та металах) є рух дислокацій внаслідок пластичної деформації.

Отже, оскільки пластичність телуриду кадмію-ртуті є проміжною між пластичністю кремнію та металів, можна стверджувати, що в нашому випадку діють принаймні два механізми взаємодії ударної хвилі з монокристалами $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Перший – утворення точкових дефектів під дією УХ (особливо сильно повинна взаємодіяти УХ з атомами ртуті, оскільки ртуть по-перше слабо зв'язана в ґратці $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а по-друге ртуть є важким елементом, який є найбільш ефективним центром розсіювання [1]). Оскільки, згідно з [1], при кімнатній температурі більша частина введених дефектів відпалюється, то цей механізм повинен найсильніше виявлятися при опроміненні декількома імпульсами, що повторюються з інтервалом не більше декількох хвилин. Тоді френкелівська пара вакансія ртуті – ртуть в міжвузлі не встигає рекомбінувати, і міжвузельний атом під дією наступної ударної хвилі (а імовірність розсіювання УХ на міжвузельному атомі набагато більша, ніж на атомі у вузлі ґратки) може вийти на стоки, одним з яких є поверхня кристала. Тоді в кристалі повинна збільшуватись кількість вакансій ртуті, що спричиняє зміну типу провідності на дірковий. Це і спостерігалось нами на зразку 2Д90-48-3, який опромінювався різними дозами і різною кількістю імпульсів випромінювання, а отже, змінювалась амплітуда і кількість ЛУХ, що пройшли через кристал. Дані з таких експериментів ще потребують доповнення і будуть опубліковані згодом.

Другим механізмом є взаємодія УХ з протяжними дефектами. Оскільки $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ досить пластичний матеріал, то такий механізм повинен вносити досить вагомий вклад, особливо при обробці одним імпульсом лазера при кімнатній температурі, коли більша частина введених точкових дефектів відпалюється. Наявність такого виду взаємодії, як вже зазначалось, підтверджується результатами роботи [7]. На нашу думку, основним проявом взаємодії ЛУХ з системою протяжних дефектів в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ є введення нових дислокацій. Оскільки дислокації мають донорний характер, то в кристалах n-типу повинна збільшуватись концентрація носіїв заряду та зменшуватись їх рухливість.

На нашу думку можливий ще й третій механізм зміни електрофізичних параметрів напівпровідника типу $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ з великою концентрацією власних точкових дефектів (ВТД) під дією УХ. Як відомо дефектний стан $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ визначається параметрами низькотемпературного відпалу та режиму охолодження. У вихідному матеріалі ми маємо концентрацію точкових дефектів, яка відповідає рівновазі при температурі відпалу, оскільки при кімнатній температурі енергія коливань ґратки замала, щоб спричинити відпал ВТД. Крім того, відомо, що точкові дефекти можуть мігрувати на стоки типу дислокацій, малокутових границь, поверхні кристала. Отже, на нашу думку, третій механізм полягає у низькотемпературному відпалі ВТД під дією надлишкової енергії, переданої дефекту ударною хвилею. Тоді, такі дефекти на відстані порядку дифузійної довжини можуть рухатись до стоків, деякі з них, а саме дислокації, можуть утворюватись під дією УХ (див. вище). Оскільки основним дефектом в $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ є вакансія ртуті, то цей механізм повинен спричиняти зменшення компенсації матеріалу n-типу, що задовільно узгоджується з нашими експериментами. Крім того, цей механізм пояснює той факт, що рухливість носіїв не зменшувалась більше ніж на 15 %, а в деяких випадках зростала на 45 % порівняно з вихідною.

Висновки

1. Показано, що під дією ЛУХ (без термічного впливу) у вузькощілинних кристалах телуриду кадмію-ртуті відбуваються довгочасові (>200 діб), стабільні зміни електрофізичних параметрів.

2. Показано, що при обробці об'ємних монокристалів $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2$) ударними хвилями, індукованим наносекундними імпульсами лазерного випромінювання, можливі три механізми зміни параметрів напівпровідника:

I – атермічне бездислокаційне утворення ВТД за механізмом [1];

II – введення дислокацій;

III – низькотемпературний відпал ВТД під дією енергії ЛУХ.

3. Під час обробки монокристалів $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ одиночним імпульсом лазерного випромінювання, і відповідно при проходженні однієї ЛУХ через кристал, основними механізмами зміни електрофізичних параметрів матеріалу є комбінація другого і третього.

4. При проходженні декількох ЛУХ з інтервалом $\sim 10^2$ с, основний вплив на властивості кристалів $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ має перший механізм.

5. Загальна ж картина взаємодії ЛУХ з вузькощілинним $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ зумовлена поєднанням всіх трьох механізмів і потребує подальшого вивчення.

[1] Янушкевич В.А., Полянинов А.В., Пруцков Е.Г. и Польшгалов Г.А. // Изв. АН СССР. Сер.Физ. 1985. Т.49. № 6. С.1146–1152.

[2] Нікіфоров Ю.М. // Вісн. ДУ"Львівська політехніка". 1999. № 362. С.73–76.

[3] Янушкевич В.А. // Физика и химия обработки материалов. 1975. № 5. С.9–11.

[4] Peyre P., Merrien P., Lieurade H.P. and Fabbro R. // Surface Engineering. 1995. Vol.11. № 1. P.47–52.

[5] Gnatyuk V.A., Vlasenko A.I., Mozol P.O., Gorodnichenko O.S. // Semicond. Sci.Technol. 1998. Vol.13. № 11. P.1298–1303.

[6] Berchenko N.N., Kurbanov K.R. and Nikifirov A.Yu. // Acta Physica Polonica A. 1995. Vol.88. № 4. P.679–682.

[7] Вирт И.С. Автореф. дисс. ...канд. физ.-мат. наук. К., 1987.