

УДК 621.315.592

А.О. Загіней, Б.К. Котлярчук, Ю.Є. Сивенький  
Інститут прикладних проблем механіки і  
математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

## ІМПУЛЬСНА ЛАЗЕРНА МОДИФІКАЦІЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ

© Загіней А.О., Котлярчук Б.К., Сивенький Ю.Є., 2003

A.O. Zaginey, B.K. Kotlyarchuk, Yu.E. Syvenkyu

## PULSE LASER MODIFICATION OF CADMIUM TELLURIDE NEAR SURFACE LAYERS

© Zaginey A.O., Kotlyarchuk B.K., Syvenkyu Yu.E., 2003

**Досліджено Оже-спектри і спектри фотолюмінесценції поверхні CdTe після імпульсного лазерного опромінення. Проаналізовано зміни густини дислокацій та величини мікротвердості на поверхні і по глибині модифікованих лазером шарів. Запропоновано використовувати модифіковані приповерхневі шари для гетерування неконтрольованих домішок.**

**Auger spectrums and spectrums of photoluminescence of CdTe surface after pulsing laser irradiation have been explored. The changes of the dislocation density and quantity of microhardness on the surface and through the depth of the layers modified by pulse laser have been analysed. We propose to use modified near surface layers for gettering of uncontrollable impurities.**

**Вступ.** Використання монокристалічного телуриду кадмію для виготовлення фотоприймачів, детекторів іонізуючого випромінювання, оптичних елементів ІЧ діапазону і як основного матеріалу в якості підкладок для епітаксialного нарощування (Cd,Hg)Te (КРТ) забезпечує постійну зацікавленість до нього з боку дослідників [1-5]. У зв'язку з таким широким спектром використання матеріалу, важливого значення набувають розробки нових методів керованої модифікації його структури і властивостей. Сюди, передусім, слід зарахувати нерівноважну імпульсну лазерну модифікацію, яка вигідно відрізняється широтою діапазону енергетичних і просторово-часових характеристик випромінювання, можливістю спряження з вакуумним технологічним устаткуванням, локальністю і короткою тривалістю термічного впливу.

Переважає кількість наукових публікацій в цій галузі присвячена взаємодії лазерних імпульсів наносекундної тривалості з напівпровідниками, що викликано необхідністю відпалу іонно-імплантованих шарів [2-5]. У проведених нами дослідженнях на КРТ [6,7] відзначалося, що лазерне опромінення в режимі вільної генерації призводить до генерації як точкових, так і лінійних дефектів у приповерхневих шарах.

Метою роботи є дослідження морфології, хімічного складу та розподілу дефектів структури на поверхні і по глибині модифікованих лазером приповерхневих шарів монокристалічного телуриду кадмію. Вивчення природи таких дефектів у телуриді кадмію

дозволить з'ясувати їх роль у перерозподілі електронно-діркових станів, а також є важливим при визначенні граничних режимів роботи детекторів і елементів оптики в умовах дії інтенсивних потоків електромагнітного випромінювання.

**Матеріали і методика експерименту.** Ефективність дії лазерного випромінювання на напівпровідникові матеріали суттєво залежить від якості підготовки поверхні. Насамперед до уваги слід брати фактори, які визначають ступінь взаємодії лазерного випромінювання (ЛВ) з матеріалом: коефіцієнти поглинання і відбивання. Від величини цих структурно чутливих параметрів залежить порогова густина енергії ЛВ, яка призводить до генерації дефектів і плавлення поверхневого шару. У роботах з дослідження взаємодії ЛВ з телуридом ртуті і КРТ нами було показано, що недосконалості кристалічної структури можуть служити додатковим джерелом утворення дефектів при лазерній обробці, аж до генерації мікротріщин і порушення цілісності зразків [6, 7]. Тому, для одержання відтворюваних експериментальних результатів, дослідження проводилися на природних сколах монокристалічного CdTe.

Спеціально не леговані, а також леговані міддю зразки CdTe розмірами 5x5x1 мм виколувалися з монокристалічних злитків, одержаних методом Бріджмена. Лазерному опроміненню піддавалися грані, орієнтовані в напрямку <111>, а бокові грані утворювалися природними сколами по площинах спайності (110) і (101). Розподіл дислокацій в приповерхневих шарах виявлявся селективним травленням площин (110) в травнику на основі HNO<sub>3</sub> і K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.

Мікроструктура поверхні і поперечних сколів досліджуваних зразків, а також густина дислокацій визначалася підрахунком кількості ямок травлення на визначену площу з використанням оптичного мікроскопа Metalloplan зі збільшенням до 1200 разів.

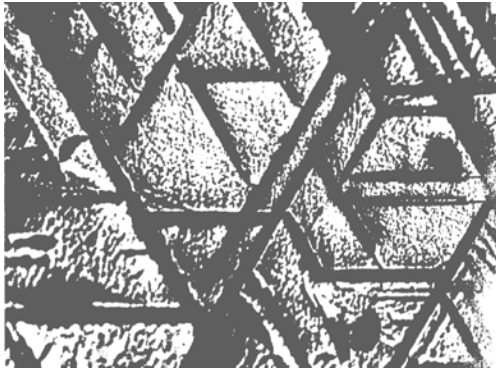
Джерелом опромінення використовувався серійний лазер на рубіні ГОР-300, який працював у режимі вільної генерації з тривалістю імпульсу 1,5 мс, або 20 нс в режимі модульованої добротності.

**Результати та їх аналіз.** Серією контрольних експериментів встановлена гранична густина енергії випромінювання ( $\lambda=0,693$  мкм), вище від якої в приповерхневому шарі зразків телуриду кадмію утворюються структурні дефекти у вигляді дислокацій, дислокаційних півпетель і мікротріщин. Величина граничної густини енергії для поверхні сколу (111) об'ємних зразків CdTe становить  $\sim 2,9$  Дж/см<sup>2</sup>. Походження дефектів зумовлене термомеханічними напруженнями в системі нагрітий шар – об'єм зразка. Спостерігався монотонний спад густини ямок травлення по глибині і переважне їх утворення поблизу виходів на поверхню дислокацій, мало кутових меж і меж блоків. Густина таких дефектів у кристалі до опромінення була на рівні  $10^4$ - $10^5$  см<sup>-2</sup>, що характерно для зразків, отриманих методом Бріджмена. Ці дефекти є центрами підвищеного поглинання лазерного випромінювання і концентраторами механічних напружень у зразках.

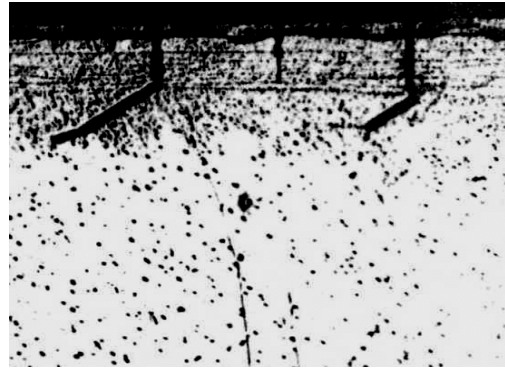
Істотною особливістю дії лазерних імпульсів на кристали телуриду кадмію при кімнатній температурі є те, що таке опромінення (на відміну від HgTe і КРТ складів X<0,4), супроводжується утворенням кристалографічно орієнтованих тріщин (рис. 1). Тріщини утворюються в напрямках площин сколу {110}, а кути перетинання між ними становлять 60° і 120°.

При енергіях, достатніх для плавлення приповерхневого шару кристала ( $E>3$  Дж/см<sup>2</sup>), спостерігається два типи тріщин (рис. 2). Крім описаних вище кристалографічно орієнтованих (під кутом 60° до поверхні) тріщин у шарі, не підданому розплаву, у

перекристалізованому поверхневому шарі товщиною 10-20 мкм з'являються тріщини з іншою орієнтацією, переважно перпендикулярною до поверхні зразка. Походження цього типу тріщин зумовлено характером і напрямком механічних напруг (розтягу) у самому перекристалізованому шарі, а також особливостями його кристалічної будови. В міру збільшення густини енергії лазерного випромінювання кількість тріщин збільшується аж до порушення цілісності зразків і відшарування перекристалізованого приповерхневого шару.



*Рис. 1. Поверхня CdTe після лазерної обробки без попереднього підігрівання. Густина енергії,  $E=2,9$  Дж/см<sup>2</sup>*



*Рис. 2. Поперечний скол CdTe після лазерної обробки без попереднього підігрівання. Густина енергії,  $E=2,9$  Дж/см<sup>2</sup>*

Одним з ефективних способів придушення процесів тріщиноутворення в опромінену CdTe є попереднє підігрівання зразків до температур, що забезпечують пластичний плин у матеріалі. Серією контрольних експериментів встановлено, що попереднє підігрівання зразків телуриду кадмію перед лазерною обробкою до температури  $\sim 600$  К практично усуває утворення тріщин (рис. 3).

Густина дислокацій на поверхні і по глибині перекристалізованого лазером шару досягає значень  $10^7$ -  $10^8$  см<sup>-2</sup> (точний підрахунок не можливий через злиття ямок травлення). Змінюючи густину енергії лазерного випромінювання і температуру попереднього підігрівання можна ефективно керувати процесом формування приповерхневого шару CdTe глибиною 10-100 мкм з високою густиною дислокацій без зміни властивостей об'єму. На можливе використання такого модифікованого лазером шару КРТ як гетера неконтрольованих домішок було вказано нами в роботі [7]. Попередні дослідження на легovanому міддю CdTe показали, що відпал зразків з рекристалізованим шаром товщиною 50 мкм протягом трьох діб при 650 К призводить до суттєвого перерозподілу міді по об'єму. Концентрація її в приповерхневому шарі зростає, а в об'ємі зменшується на півтора-два порядки. Спостерігалось зменшення густини ямок травлення в об'ємі зразків порівняно з вихідною.

Глибина рекристалізованого шару в зразках, опроміненіх в режимі модульованої добротності, не перевищує 1 мкм. Після селективного травлення поверхні і поперечних сколів не виявлено генерації лінійних дефектів структури.

В Оже-спектрах поверхні сколів монокристалічного телуриду кадмію до і після опромінення лазерними імпульсами мілісекундної тривалості (рис. 4 а,б), крім піків основних компонентів присутні піки вуглецю, кисню, хлору і сірки, адсорбованих з навколишнього середовища під час тривалого зберігання зразків на повітрі, а також під час лазерної обробки у вакуумній камері ( $P \sim 10^{-4}$  Па). Травлення поверхні кристалів у робочій

камері Оже-спектрометра зі швидкістю близько 40 А/хв призводить до зникнення піків сторонніх елементів в Оже-спектрах уже через 10-15 с (рис. 4, в), що підтверджує припущення про їх адсорбцію тільки на поверхні перекристалізованого лазерним випромінюванням шару. Зміна співвідношення інтенсивності піків кадмію і телуру після опромінення свідчить про збагачення телуrom поверхні кристалів на глибині зондування, яка є меншою 1 мкм. У модифікованому шарі стехіометрія не порушується (рис. 4, в).

Фотолюмінісцентні властивості модифікованих лазерною обробкою спеціально не легованих зразків телуриду кадмію досліджували в спектральному діапазоні 650 - 1000 нм при температурі 4,2 К. Люмінесценцію збуджували з поверхні (111) випромінюванням аргонного лазера. Низькотемпературний спектр люмінесценції неопромінених зразків (рис. 5, а) складається зі смуги зв'язаних екситонів  $\sim 780$  нм, що є домінуючою, крайової смуги 795-810 нм і порівняно широкої смуги в довгохвильовій області спектра 845-960 нм. Після лазерного опромінення зразків відбувається перерозподіл інтенсивності смуг люмінесценції, а з зростанням густини енергії у спектрах з'являється нова смуга в області 840 нм (рис. 5, б, в).

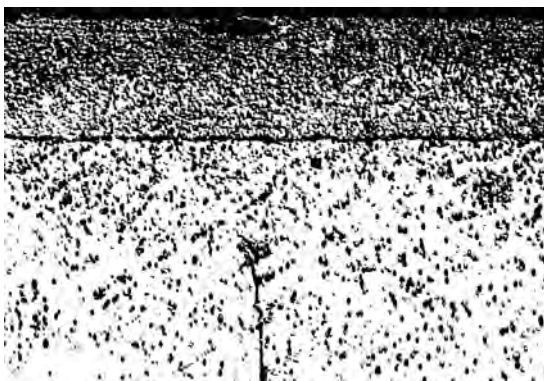


Рис. 3. Поперечний скол попередньо підігрітого до 600 К CdTe після лазерної обробки.  $E=2,9$  Дж/см<sup>2</sup>

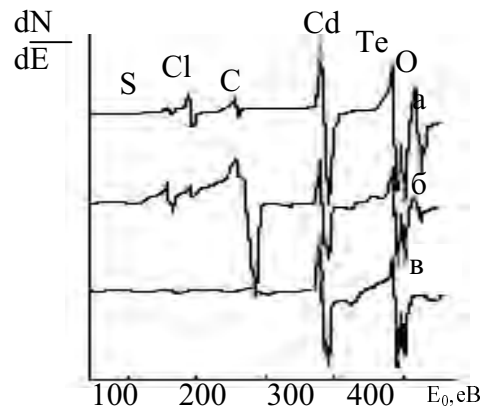


Рис. 4. Оже-спектри поверхні CdTe. а – до опромінення; б – після опромінення,  $E=2,8$  Дж/см<sup>2</sup>; в – після іонного очищення

Відомо [3,4], що смуги фотолюмінісценції в зазначеній області можуть індукуватися внаслідок механічної обробки поверхні або пластичної деформації зразків CdTe, що свідчить на користь їхнього зв'язку з рекомбінацією через електронні стани структурних дефектів, що вводяться під час поверхневого або об'ємного деформування.

Поява цієї смуги після лазерної дії, на наш погляд, безпосередньо пов'язана з індукованими імпульсним нагріванням дефектами (переважно дислокаціями) в поверхневому шарі кристала, що підтверджується також вибіркоким хімічним травленням опромінених зразків. Зі збільшенням дози опромінення зростає густина генерованих дислокацій, що виявляється ростом інтенсивності смуги 840 нм. Причиною зміщення максимумів екситонних смуг у короткохвильову область спектра, яка спостерігається з зростанням дози опромінення може бути порушення стехіометричного співвідношення компонентів у приповерхневому шарі зразка (нестача Cd) (рис. 4).

При підвищенні температури спостерігається температурне гасіння смуги фотолюмінесценції в області 840 нм і при 77 К вона не виявляється, зате спостерігається істотний, до 10 разів від вихідної, зростанням інтенсивності смуги з максимумом у діапазоні 1,4-1,42 еВ. Інтенсивність цієї смуги зростає з підвищенням температури попереднього підігрівання й енергії опромінення, зміщуючись у більш довгохвильову область (рис. 6).

Варто зауважити, що без додаткових досліджень важко говорити про конкретний вид дефектів, відповідальних за свічення, але безсумнівним залишається наявність чіткого взаємозв'язку інтенсивності піків в області 1,4-1,42 еВ при 77 К і 840 нм при 4,2 К з появою дислокацій, індукованих лазерним опромінюванням.

Детальніші дослідження енергетичних рівнів у забороненій зоні монокристалів телуриду кадмію після лазерного опромінення були проведені методом термостимульованого струму (ТСС). Результати експериментів показали, що максимуми на кривих ТСС спостерігаються приблизно в однакових температурних діапазонах для опромінених і неопромінених поверхонь зразків. Однак термостимульовані струми в опромінених зразках на декілька порядків більші, ніж у неопромінених (рис. 7). Під час підігрівання неопромінених зразків за лінійним законом носії струму пере захоплюються на більш глибокі рівні в забороненій зоні, внаслідок чого струм, що утворюють носії в зоні провідності, зменшується (рис. 7, а). Максимум ТСС на рис. 7, б можна пояснити іонізацією індукованих лазерним випромінюванням акцепторних центрів. При нагріванні зразків під час дослідження ТСС акцепторні центри звільняють носії, що, попадаючи в зону провідності, стимулюють ріст струму в опромінених кристалах.

Результати проведених досліджень свідчать про те, що в опромінених лазером зразках CdTe змінюється механізм захоплення носіїв на рівнях у забороненій зоні.

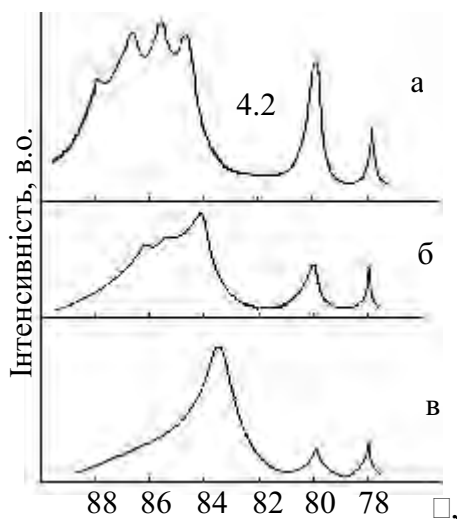


Рис. 5. Низькотемпературні спектри фотолюмінесценції CdTe при 4.2 К.  
а – поверхня до опромінення;  
б, в – поверхні після опромінення з енергіями: 2.8, 2.9 (Дж/см<sup>2</sup>)

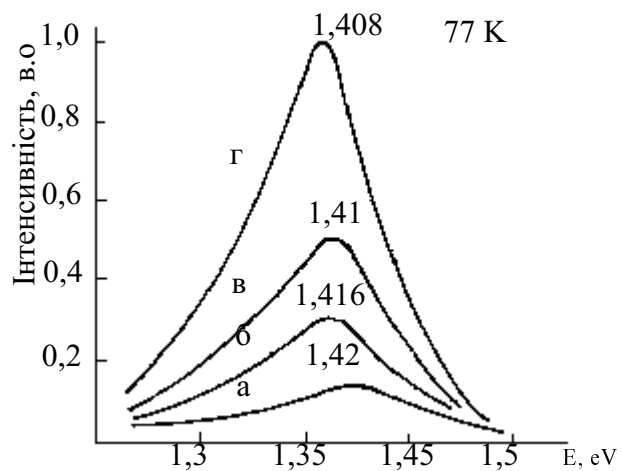


Рис. 6. Спектри фотолюмінесценції CdTe при 77 К. а – поверхня до опромінення; б, в, г – поверхні після опромінення з енергіями: 2.7, 2.8, 2.9 (Дж/см<sup>2</sup>)

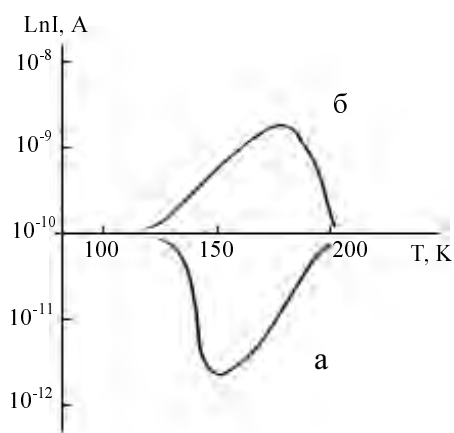


Рис. 7. Спектри термостимульованого струму в зразках CdTe. а – до опромінення; б – після опромінення,  $E=2,9$  Дж/см<sup>2</sup>.

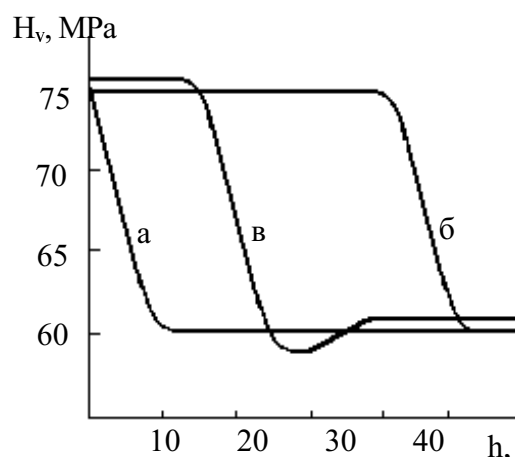


Рис. 8. Апроксимовані криві залежності мікротвердості від глибини в зразках CdTe.  $E$ , Дж/см<sup>2</sup>: а - 2,9; б - 3,2; в - 3,0.

Мікротвердість по Вікерсу ( $H_v$ ) на поверхні зразків CdTe опроміненних мілісекундними імпульсами з пороговою густиною енергії ( $\sim 2,9$  Дж/см<sup>2</sup>) (рис. 8, а) підвищується в середньому на 25 %, залишаючись такою по всій глибині модифікованого шару при  $E > 2,9$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 8, б). Таке значне підвищення мікротвердості пов'язано з зростанням до  $10^8$  см<sup>-2</sup> густини індукованих лазерним випромінюванням дислокацій на поверхні зразків. Незначний мінімум на кривій мікротвердості в легованих зразках (рис. 8, в) можна пояснити стоком міді до поверхні кристала, що підтверджує гетеруючу дію модифікованого шару.

**Висновки.** На поверхні зразків CdTe до і після опромінення лазерними імпульсами спостерігається наявність адсорбованих атомів вуглецю, кисню, хлору і сірки, а також порушується співвідношення основних компонент у бік збільшення концентрації телуру.

Лазерна обробка монокристалічного телуриду кадмію при кімнатних температурах супроводжується генерацією кристалографічно орієнтованих тріщин. Процеси тріщиноутворення ефективно усуваються попереднім підігріванням зразків до температури пластичної деформації ( $\sim 600$  К).

Внаслідок термомеханічних напружень, які виникають в приповерхневому шарі CdTe при опроміненні мілісекундними лазерними імпульсами, генеруються лінійні дефекти, густина яких досягає  $10^8$  см<sup>-2</sup>. При лазерній обробці в режимі модульованої добротності не спостерігається збільшення густини лінійних дефектів структури, а глибина рекристалізованого шару не перевищує 1 мкм.

Перерозподіл інтенсивності і поява нових смуг в спектрах фотолюмінесценції, а також зміна механізму захоплення носіїв на рівнях у забороненій зоні опроміненних зразків CdTe безпосередньо пов'язана з індукованими лазерним нагріванням дефектами структури.

Цілеспрямовано модифіковані лазером приповерхневі шари CdTe можна використати для гетерування неконтрольованих домішок і дефектів структури.

1. Корбутяк Д.В., Мельничук С.В., Корбут Є.В., Борисюк М.М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. – К., 2000.

2. S.H. Song, J.F. Wang, G.M. Lalev, L.He and M. Isshiki // *Journal of Crystal Growth*, 2003. – 252. – P. 102-106.

3. Байдуллаева А., Власенко А.И., Мозоль П.Е. // ФТП, 1997. – 31. – №12. – С. 1428–1430.
4. Байдуллаева А., Власенко А.И., Мозоль П.Е., Смирнов А.Б. // ФТП, 2001. – 35. – В.6. – С. 745-748.
5. Бабенцов В.Н., Тарбаев Н.И. // ФТП, 1998. – 32. – №1. – С. 32 – 35.
6. A. Zaginey, B. Kotlyarchuk, V. Savitsky, V. Pisarevsky // Proc. SPIE. Intern. Conf. on Solid State Cryst., 1998. – 3725. – P. 295-298.
7. A. Zaginey, B. Kotlyarchuk, V. Savitsky, O. Storchun, V. Pisarevsky // Journal of Crystal Growth, 1998. – 194. – P. 317-320.

УДК 621.382.323

**В.В. Невзоров, В.А.Павлиш<sup>\*</sup>, Л.М. Смеркло**

Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут,

<sup>\*</sup> Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

## **МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ОПОРУ У ВІДКРИТОМУ СТАНІ ПОТУЖНОГО ДМОН ТРАНЗИСТОРА**

© Невзоров В.В., Павлиш В.А., Смеркло Л.М., 2003

**V.V. Nevzorov, V.A. Pavlysh, L.M. Smerklo**

## **METHOD FOR REDUCTION ON-RESISTANCE OF POWER DMOS TRANSISTOR**

© Nevzorov V.V., Pavlysh V.A., Smerklo L.M., 2003

**Розглянуто вплив комірок складної форми, які складені з правильних геометричних фігур (трикутник, квадрат, шестикутник) на опір у відкритому стані потужного ДМОН транзистора. Показано, що комірка, яка складається з одного трикутника та трьох шестикутників має перевагу над комірками з іншими формами.**

**Influence of cells of the composite form which one consist of exact geometrical figures (triangle, square, hexagon) on resistance R-on power DMOS transistor is investigated. It is shown that the cell, which one consists of one triangle and three hexagons has advantage before cells of other forms.**

**Вступ.** На сьогодні самосумісна багатокоміркова конструкція ДМОН польового транзистора (ДМОН ПТ) для перемикаючих схем набула широкого розповсюдження, оскільки вона дозволяє порівняно легко реалізувати високі пробивні напруги та низький опір у відкритому стані [1]. Вертикальний розріз ДМОН ПТ, показаний на рис. 1, де:  $r$  – радіус вписаного кола в комірку;  $L$  – відстань між комірками;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – компоненти повного опору ДМОН ПТ у відкритому стані.