

© 2000 р. Я.М. Барасюк, Є. Белтовська-Леман*, М.В. Демич,
В.П. Махній, І.В. Малімон, В.М. Склярчук

Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці

*Інститут металургії і матеріалознавства Польської АН, Краків

МЕХАНІЗМИ ПРОХОДЖЕННЯ ПРЯМОГО СТРУМУ У ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ ДІОДАХ НА ОСНОВІ ВИСОКООМНОГО n -CdTe

Проведений аналіз особливостей прямих вольт-амперних характеристик діодів, виготовлених пульверизацією провідних плівок ІТО на високоомні кристали телуриду кадмію електронної провідності.

The features direct of current-voltage characteristics of diodes made by pulverization of ITO conductive films on high-resistance n -CdTe crystals are analyzed.

Великі атомний номер та густина у поєднанні з високою радіаційною стійкістю телуриду кадмію роблять його перспективним для створення детекторів іонізуючих випромінювань. Хоча на даний час виготовлено цілу низку бар'єрних структур різного типу, основна увага дослідників та розробників зазначених приладів зосереджена на резистивних детекторах [1]. Для забезпечення у них при кімнатних температурах високого співвідношення сигнал/ шум звичайно використовують високоомні кристали телуриду кадмію. Останні придатні також для створення випрямляючих структур з товстим бар'єром, оскільки його товщина визначається рівнем легування базової області діода. Широка область просторового заряду (ОПЗ) сприяє ефективному розділенню носіїв заряду, народжених іонізуючими частками, особливо високоенергетичними, для яких довжина поглинання велика [2]. Отже, використання високоомного матеріалу при виготовленні бар'єрних детекторів дозволяє насамперед розширити спектральний діапазон їх чутливості в область більших енергій. Визначення інших позитивних рис таких діодних структур вимагає детальних досліджень їх основних фізичних властивостей. Дана робота присвячена вивченню механізмів формування прямого струму у контактах ІТО- n CdTe.

Спеціально не леговані кристали вирощені методом Бріджмена і в області кімнатних температур мали низьку (10^{-6} - 10^{-5} Ом $^{-1}$ см $^{-1}$) електронну провідність. Вирізані з монокристалів підкладки

розміром $4 \times 4 \times 1$ мм 3 проходили механічне і хімічне полірування, після чого на одну з більших сторін наносився шар ІТО. Для його синтезу використовувався метод пульверизації з піролізом при температурах 450-550°C. Омичні контакти створювались вплавленням наважок індію на протилежну сторону підкладки при 150°C впродовж 30-60 с. Структури мали яскраво виражені діодні характеристики і помітну фоточутливість при освітленні вольфрамовою лампою через прозору плівку ІТО, яка у даному випадку відіграє роль випрямляючого контакту.

Оцінки показують, що при кімнатній температурі концентрація вільних електронів складає $n_0 \approx 10^{10}$ - 10^{11} см $^{-3}$, а енергетична відстань рівня Фермі від дна зони провідності $F_n \approx 0,35$ еВ. Товщину бар'єра d можна розрахувати за допомогою відомих виразів, якщо вважати хід потенціалу параболічним [3]. Для заданих значень n_0 отримаємо, що $d_0 \approx (1-3) \cdot 10^{-2}$ см, тобто ОПЗ є досить широкою. Це приводить до низки особливостей механізмів формування прямого струму, які розглянемо детальніше. Початкові ділянки прямих вольтамперних характеристик описуються відомим виразом Саа-Нойса-Шоклі [3-5]

$$I_{gr} = I_{gr}^0 [\exp(eV/nkT) - 1], \quad (1)$$

де I_{gr}^0 – генераційно-рекомбінаційний струм відсічки при $V=0$. Зауважимо, що коефіцієнти ідеальності у всьому досліджуваному температурному діапазоні $n \approx 2$.

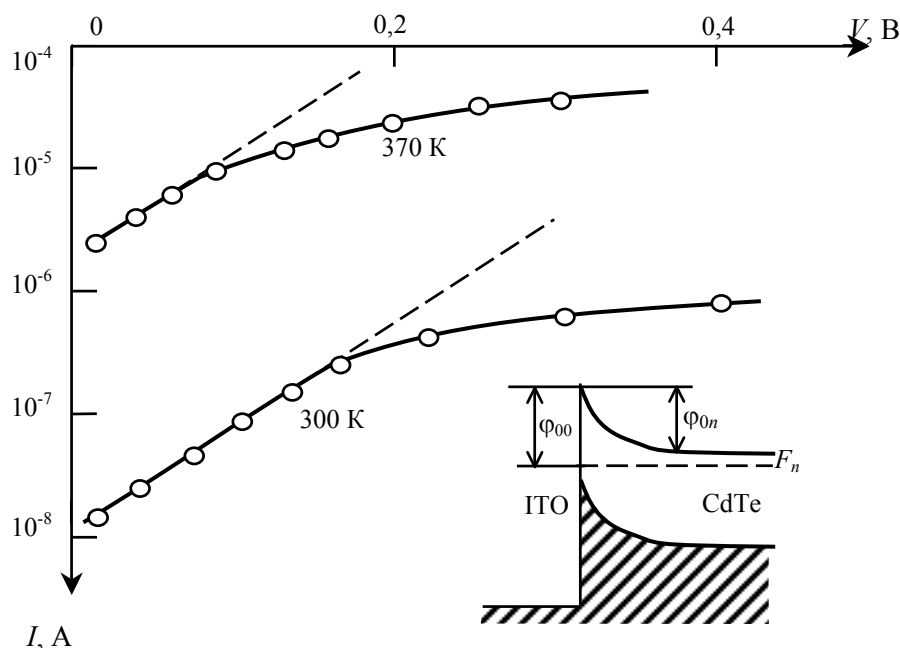


Рис.1. Прямі ВАХ контакту ІТО-*n*CdTe. Пунктирні лінії відповідають залежностям $I \sim \exp(eV/2kT)$. На врізці – можлива енергетична діаграма контакту у рівновазі.

Водночас, максимальні прямі напруги, при яких ці залежності виконуються, не перевищують 0,2 В (рис.1). Врахування послідовного опору діода не врятовує ситуацію, оскільки після цієї операції експериментальні точки все одно не вкладаються на очікувану залежність (1). З іншого боку прямі ВАХ при $V \geq 0,2$ В не описуються виразами, які характерні для процесів захоплення глибокими рівнями [4]. У зв'язку з цим постає питання з'ясування причин таких аномалій.

Першочергова задача при цьому – знаходження висоти потенціального бар'єра структури. Слід розрізнати висоти бар'єра зі сторони напівпровідника ϕ_{0n} та випрямляючого контакту ϕ_{00} . На вставці рис.1 видно, що $\phi_{00} = \phi_{0n} + F_n$, де F_n – енергетичне положення рівня Фермі у квазінейтральній області діода. Зауважимо, що через слабку провідність бази використання ємнісних методів та ВАХ в області її лінійності для знаходження висоти бар'єра не приносить бажаних результатів. Тому проведемо оцінку її значення, використовуючи інші підходи. Відомо, що для поверхнево-бар'єрних діодів (ПБД), до яких власне і належить досліджувана структура, прямий рекомбінаційний струм спостерігається за умови, коли ϕ_{00} більша за половину ширини забороненої зони $E_g/2$ напівпровідника [5]. Якщо рекомбінація йде через рівні з $E_f \approx E_g/2$, то залежність типу (1) спостерігається тільки для напруг, які обмежуються нерівністю

$$eV \leq |2\phi_{00} - E_g|. \quad (2)$$

Підставивши дослідні значення $V \approx 0,2$ В, отримаємо при 300 К для $\phi_{00} \approx 0,95$ еВ, що більше від $E_g/2 \approx 0,75$ еВ. Отже, на поверхні телуриду кадмію утворюється інверсійний шар, який і забезпечує протікання рекомбінаційних процесів до певних прямих напруг. Висота бар'єру зі сторони напівпровідника становить $\phi_{0n} = \phi_{00} - F_n \approx 0,6$ еВ і помітно менша за $E_g/2$. Величину ϕ_{0n} можна також оцінити іншим способом, враховуючи те, що максимальне значення напруги холостого ходу V_{oc} при освітленні діода складає близько $0,7\phi_{0n}$ [5]. При кімнатних температурах V_{oc} досліджуваних контактів досягає 0,4 В, тому $\phi_{0n} \approx 0,6$ еВ, що узгоджується з величиною ϕ_{0n} , отриманою раніше. Отже, можна стверджувати, що початкові ділянки прямих ВАХ структур ІТО-*n*CdTe дійсно визначаються рекомбінацією носіїв в ОПЗ через глибокі рівні, які знаходяться поблизу середини забороненої зони. Правильність такого висновку підтверджується також температурною залежністю параметра I_{gr}^0 , який згідно з теорією [4] повинен описуватись виразом $I_{gr}^0 \sim \exp(-E_g/2kT)$. Експериментальна залежність у координатах $\ln I_{gr}^0 - 10^3/T$ апроксимується прямою (рис.2), нахил якої відповідає енергії $\sim 1,6$ еВ, що узгоджується з E_g телуриду кадмію при 0 К.

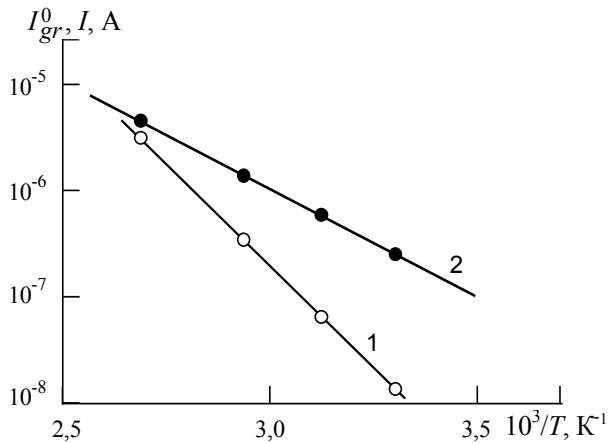


Рис.2. Температурні залежності параметру I_{gr}^0 (1) і прямого струму при $V=0,8$ В (2) контакту ІТО-пCdTe.

Перехід ВАХ при великих прямих V до більш слабкої порівняно з експоненціальною залежністю може спричинятись процесами захоплення. У цьому випадку вона повинна описуватись залежністю типу [4]

$$I \sim (V - V_0)^m, \quad (3)$$

де m може набувати значень 3/2, 2 або 4 у залежності від ролі областей структури у процесах захоплення, а V_0 – характеристична напруга. Згідно з теорією [6] залежність (3) з $m=4$ реалізується при монотонному розподілі інжектованих носіїв у широкій високоомній області.

Експериментальні ВАХ (рис.3) непогано узгоджуються з виразом (3), якщо вважати $m=4$. Хоча дані приведені тільки для кімнатної температури, узгодження спостерігається також і при інших T . Він у певній мірі задається центрами захоплення, енергетичне положення яких може бути знайдене з температурної залежності струму на степеневій ділянці ВАХ при постійній напрузі [6]. Як видно з рис.2, експериментальні значення струму при $V=\text{const}$ добре укладаються на пряму лінію, яка побудована у координатах $\ln I - 10^3/T$.

Знайдена з її нахилу енергія активації становить $\sim 0,4$ еВ, однак природа цього рівня невідома. Вияснення даного питання складає окрему задачу, яка виходить за рамки цієї роботи.

Отже, наведені результати свідчать про те, що прямий струм досліджуваних структур обумовлений процесами рекомбінації в ОПЗ діода та захоплення глибокими рівнями у високоомній області.

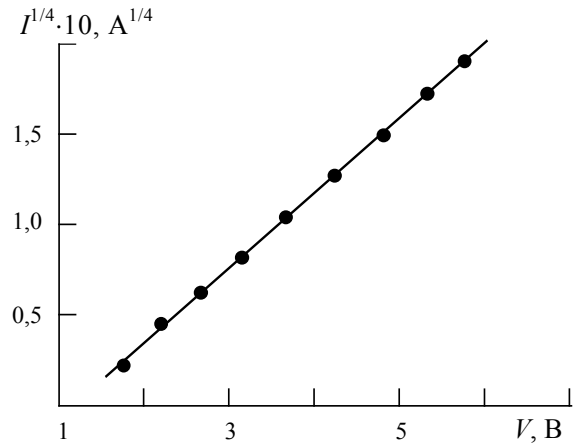


Рис.3. Зіставлення прямих ВАХ контакту ІТО-пCdTe з виразом (3) при 300 К.

Робота виконана у рамках українсько-польського співробітництва при частковій підтримці Міністерства освіти і науки України (проект 2М/233-99).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Корбутяк Д.В., Мельничук С.В., Корбут Є.В., Борисюк М.М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. - Київ: Іван Федорів, 2000.
2. Рыжиков В.Д. Сцинтилляционные кристаллы полупроводниковых соединений A^2B^6 . Получение, свойства, применение. - М.: НИИТЭХИМ, 1989.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Мир, 1984.
4. Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. - М.: Сов. радио, 1978.
5. Махний В.П. Физические процессы в диодных структурах на основе широкозонных полупроводников: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. - Черновцы, 1992.
6. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. - М.: Мир, 1973.