

В.О. Українець, Г.А. Ільчук, Н.А. Українець, Р.Ю. Петрусь, С.Б. Харамбура
Властивості поверхнево-бар'єрних структур Me(In, Sn, Pb)-p-CdTe в області додатніх зміщень

Національний університет „Львівська політехніка”, кафедра фізики,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. 8(0322) 398-775, E-mail: gilchuk@polynet.lviv.ua

Виявлено нетипову поведінку фізичних властивостей (диференційної ємності, диференційної провідності, внутрішньої фотоємності) поверхнево-бар'єрних структур Me(In,Sn,Pb)-p-CdTe, виготовлених на відносно високоомному p-CdTe ($\rho = (0,3 \div 6,0)$ Ом·м, $p_{c-v} = (0,3 \div 40) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $T = 300$ К) в області прямих зміщень. Показано, що ці явища взаємопов'язані і зумовлені проявом проміжного шару структур, локалізованого між металом і дірковим телуридом кадмію.

Ключові слова: диференційна ємність і провідність, внутрішня фотоємність, телурид кадмію.

Стаття поступила до редакції 19.05.2003; прийнята до друку 12.04.2004.

I. Вступ

Стратегія фізичних досліджень у напівпровідниковому матеріалознавстві класичного і новітнього (нанотехнологічного) напрямків відводить суттєву роль сполукам групи $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$, зокрема телуриду кадмію (CdTe). Ведеться інтенсивний пошук з метою покращення параметрів вирощуваних монокристалів і плівок CdTe [1] і його використання для виготовлення неохолоджуваних детекторів ядерних випромінювань, сонячних елементів, тощо. Практичне вирішення цих питань у значній мірі пов'язується з використанням приладів з бар'єром Шоттки (БШ), які забезпечують значення коефіцієнту збирання заряду близьке до 80% [2], дозволяють реалізувати лавинне помноження носіїв [3,4] та інше.

II. Методика експерименту

Об'єктом дослідження були поверхнево-бар'єрні структури (ПБС) Me(In,Sn,Pb)-p-CdTe, які створювались на вирощеному методом Бріджмена монокристалічному p-CdTe з питомим опором $\rho = (0,3 \div 6,0)$ Ом·м і концентрацією дірок $p_{c-v} = (0,3 \div 40) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при $T = 300$ К. Досліджувались їх електрофізичні (вольт-амперна і вольт-фарадна характеристики) та фотоелектричні (внутрішня фотоємність в умовах подачі на структуру зміщень) властивості. При створенні ПБС бар'єрний електрод формувався термічним напilenням або електрохімічним осадженням металів In, Sn, Pb,

робота виходу електрона з яких менша за енергію спорідненості p-CdTe. Робоча поверхня ПБС відповідала кристалографічній орієнтації (110) підкладки p-CdTe. Перед нанесенням металу (In, Sn чи Pb) проводилась хімічна поліровка поверхні, переважно в бром-метаноловому розчині, а в окремих випадках в 50% HNO_3 з промивкою в підігрітому розчині KBr. Опір бази створених структур знаходився в межах $50 \div 700$ Ом. Для фотоелектричних вимірювань формувались напівпрозорі електроди товщиною $d \cong 0,5$ мкм і площею $S \cong 30 \div 50$ мм². Усі виготовлені за описаною методикою ПБС мали випрямні властивості, так що пропускнуому напрямку відповідало прикладення напруги додатньої полярності до p-CdTe. При освітленні ПБС виникала фото-е.р.с., полярність якої узгоджувалась із напрямком випрямлення.

Вимірювались вольт-фарадні характеристики (ВФХ) виготовлених ПБС в інтервалі частот $f = (10^2 \div 3 \cdot 10^6)$ Гц з використанням мостів змінного струму типу МПП-300 та Л2-7 при напрузі вимірного змінного сигналу $U_{\sim} = 20 \div 25$ мВ та подачі на структуру регульованого зміщення.

Відомо, що використання мостових методів ґрунтується на порівнянні імпедансу еквівалентної схеми ПБС (рис. 1-а) з імпедансом двоелементної схеми (рис. 1-б) плеча моста. При цьому зв'язок між елементами C , G , r і C' , G' цих схем виражається формулами [5]:

$$C' = \frac{C}{(rG + 1)^2 + \omega^2 r^2 C^2}, \quad (1)$$

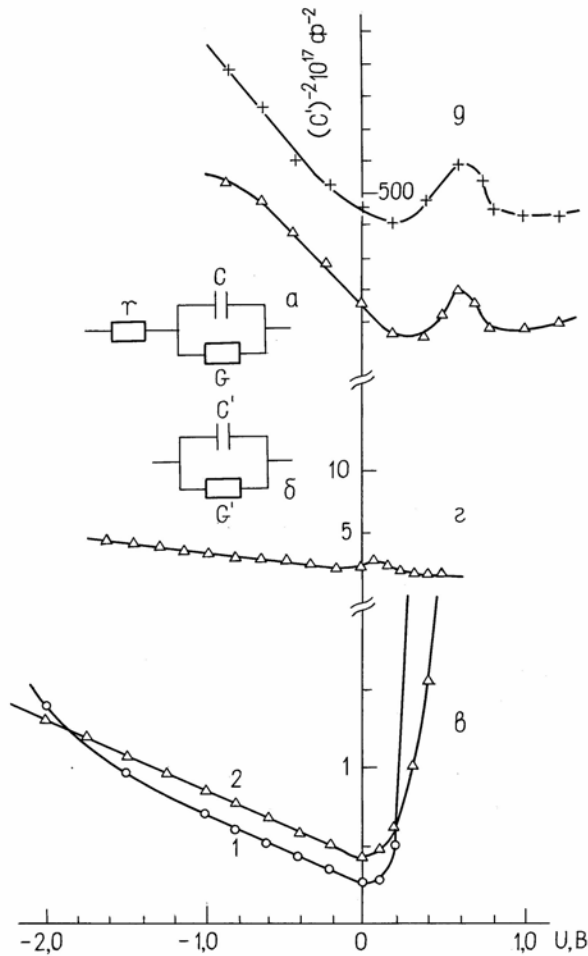


Рис. 1. Еквівалентна схема поверхнево-бар'єрної структури (а), схеми заміщення при мостових вимірюваннях (б) та вольт-фарадні залежності $(C')^{-2} = f(U)$ ефективної ємності ПБС метал-р-CdTe: Pb-р-CdTe, зразок Д_{кт}-39, $r = 470$ Ом (в); Sn-р-CdTe, зразок Д_{шт}-35_{еп}, $r = 430$ Ом (г); In-р-CdTe, зразок ДС_б-13 $r = 500$ Ом (д) ($T = 300$ К) і частотах вимірного сигналу $\Delta - f = 300$ кГц, $\circ - f = 700$ кГц, $+ - f = 3$ МГц.

$$G' = \frac{G(rG + 1) + \omega^2 r C^2}{(rG + 1)^2 + \omega^2 r^2 C^2}, \quad (2)$$

де ω – циклічна частота вимірного сигналу, r – опір бази ПБС, C і G – диференційні ємність і провідність бар'єру, відповідно, C' і G' – ємність і провідність, відповідно, паралельної схеми заміщення збалансованого моста. Традиційне використання мостової схеми для вимірювання параметрів бар'єрних структур вимагає виконання в експерименті спрощуючих умов:

$$rG \ll 1 \quad (3)$$

$$\omega^2 r^2 C^2 \ll 1, \quad (4)$$

за яких виміряні значення C' і G' будуть рівними C і G еквівалентної схеми бар'єру. Умови (3) і (4) відносно легко реалізуються при вимірюванні на структурах з низькоомною базою. Однак

застосування ємнісного методу до структур на відносно високоомних напівпровідникових матеріалах, зокрема телурид кадмію, не дозволяє одночасно їх реалізувати і призводить до принципових труднощів в одержанні із вимірювань абсолютних значень ємності. Дослідження ємності додатково ускладнюються наявністю в ПБС Me-р-CdTe релаксацій ємності різної фізичної природи.

За таких обставин автори [6] запропонували при дослідженні ПБС з великим опором бази обмежитись вимірним значенням диференційної ємності C' і з цією метою теоретично дослідили вплив величини опору бази r діода Шоттки на C' та поведінку її ВФХ $(C')^{-2} = f(U)$. Використання терміну „ефективна ємність” і дослідження її ВФХ сьогодні є експериментально перевіреним методом [7,8] одержання фізичної інформації, для випадків коли неможливо реалізувати умови (3) і (4).

Наші дослідження ВФХ ефективної ємності проводились одночасно з вимірюваннями стаціонарних ВАХ, диференційної провідності в залежності від напруги та фотovoltaїчного ефекту. В останньому випадку використовувалась вимірна установка на основі монохроматора ЗМР-3 з модуляцією світлового сигналу з частотою 500 Гц та подальшим його підсиленням і записом.

III. Результати і їх обговорення

Типові експериментальні залежності ефективної ємності C' досліджених структур при $T = 300$ К від напруги зміщення в координатах $(C')^{-2}$, U наведені на рис. 1-в, г, д. Характерною особливістю усіх графіків $(C')^{-2} = f(U)$, незалежно від використаного при виготовленні ПБС способу полірування поверхні р-CdTe і матеріалу бар'єрного електроду, є їх лінійний характер в області зворотніх зміщень ($U < 0$), що добре узгоджується з теорією [6]. При зменшенні зворотнього зміщення значення $(C')^{-2}$ рівномірно зменшується, досягаючи мінімуму в околі напруги $U = 0$. Після проходження мінімуму і подальшого зростання напруги прямого зміщення спостерігається відмінність у поведінці графіків $(C')^{-2} = f(U)$ різних структур (рис. 1-в, г, д). Так різке збільшення значень $(C')^{-2}$ залежності $(C')^{-2} = f(U)$ на рис. 1-в добре узгоджується з особливостями поведінки теоретичної ВФХ $(C')^{-2} = f(U)$ [6] і зумовлене перерозподілом напруги між областю просторового заряду (ОПЗ) і базою. Виконані теоретичні оцінки значення напруги U_m , що відповідає мінімуму експериментального графіка $(C')^{-2} = f(U)$, з використанням формул [6]:

$$U_m = I(R_m + r), \quad (5)$$

де R_m значення критичного опору

$$R_m = 4,4r \left[2,5 + \frac{qV_D}{kT} + \ln \frac{qrI_s}{kT} \right]. \quad (6)$$

Тут q – елементарний заряд, k – стала Больцмана, T – температура. При цьому опір бази r визначався із нахилу лінійної частини ВАХ в області прямого зміщення, дифузійний потенціал V_D – по струмовій відсічці ВАХ, а струм насичення I_s – екстраполяцією лінійної ділянки ВАХ в напівлогарифмічному масштабі в області додатніх зміщень до значень $U \rightarrow 0$. З точністю до вибраного при вимірюванні ВФХ кроку змін напруги зміщення ($\Delta U = 0,05$ В) результат розрахунку U_{\min} добре узгоджується з експериментом у випадку ВФХ усіх структур (рис. 1-в,г,д). Що стосується поведінки залежності $(C')^{-2} = f(U)$ в області прямих зміщень двох інших ПБС (рис. 1- г, д) то тут спостерігається суттєве відхилення від передбачень теорії. А саме, замість очікуваного стрімкого росту величини $(C')^{-2}$ в області $U > U_{\min}$, спостерігається „осциляція” значення $(C')^{-2}$ (досягнення деякого максимуму величини $(C')^{-2}$ і подальше її зменшення). До того ж рис. 1-д демонструє зменшення значень ефективної ємності і майже паралельне переміщення ВФХ вздовж осі $(C')^{-2}$ при зростанні частоти вимірного сигналу.

Оскільки в області прямих зміщень нами спостерігаються додаткові „осциляції” кривої $(C')^{-2} = f(U)$, то було цілком доречно дослідити поведінку активної складової імпедансу в цій області. Для цього проведені вимірювання останньої на

відносно низьких частотах, при яких еквівалентна схема ПБС приймає вигляд, показаний на рис. 2-б [5]. На рис.2-а (графік 1) наведена залежність диференційної провідності ПБС Sn-p-CdTe на низьких частотах ($f = 10$ кГц) від величини струму при прямому зміщенні. Одночасно стрілками відзначені величини напруг, що відповідають точкам екстремумів графіка $G = f(I)$. Видно, що диференційна провідність G бар'єру із збільшенням струму зростає. У відповідності з класичними уявленнями вона повинна досягати насичення, зумовленого обмеженням, що його накладає на ріст струму опір бази r ПБС (крива 2). Однак на експерименті не спостерігається насичення провідності. Остання після досягнення максимуму при $U = 0,65$ В, що відповідає умові випрямлення зон, в подальшому зменшується. В області напруги $U = 1,3$ В прямого зміщення має місце „селективне” зменшення провідності, яке проявляється в процесі збільшенні напруги і зникає при її зворотному зменшенні і поверненні до $U = 0$ В. Оскільки в цій області провідність G визначається опором бази

$$G = q\mu n E \frac{S}{l}, \quad (7)$$

де n – концентрація носіїв в p-CdTe, μ – рухливість, E – напруженість електричного поля, S – площа і l – довжина бази, то очевидно, що основним фактором, який впливає на її зміни і супроводжується зменшенням ємності на рис. 1-г, д, є зміни концентрації носіїв.

Ефект зростання опору бази в області додатніх зміщень $U > U_1$ спостерігається і на стаціонарних ВАХ в координатах I, U (рис. 2-в), якими відображено процес деградації електричних властивостей структури. Тут символами (1) і (2)

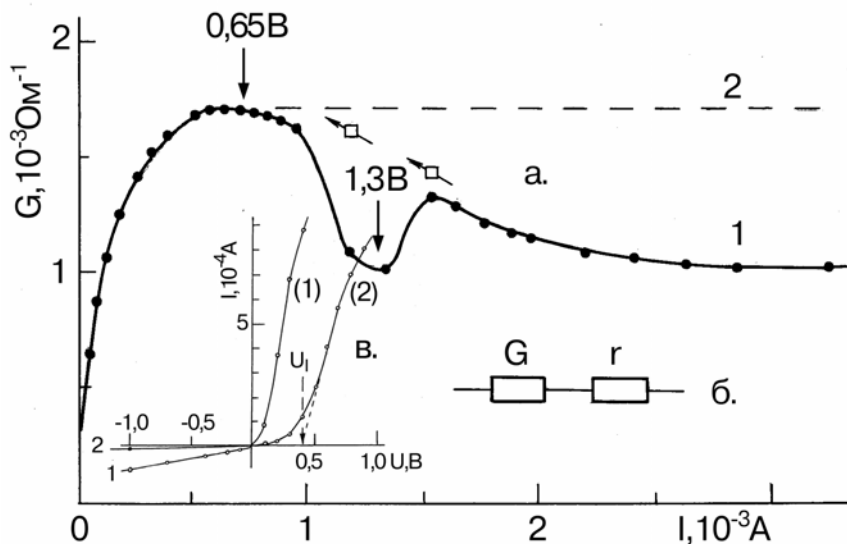


Рис. 2. Залежність диференційної провідності ПБС Sn-p-CdTe на низьких частотах від величини струму в області прямого зміщення (а): графік 1-експеримент (зразок БТн-1, $f = 10$ кГц, $r = 700$ Ом, $p = 7,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $T = 300$ К), 2-теорія; еквівалентна схема ПБС на низьких частотах (б) та ВАХ ПБС In-p-CdTe (зразок ДСб-13) для моментів часу (1) і (2) проведення вимірювань, що відрізняються на $2 \cdot 10^3$ годин. Опори бази $r_{(1)} = 260$ Ом, $r_{(2)} = 550$ Ом, параметр ідеальності ВАХ $n_{(1)} = 1,04$, $n_{(2)} = 1,76$).

позначені ВАХ ПБС In-p-CdTe (зразок ДСб-13) для двох моментів часу проведення вимірювань, що відрізняються на $2 \cdot 10^3$ годин. Зокрема, після досягнення лінійної ділянки, зумовленої обмеженням на ріст струму опору бази структури, відбувається зменшення нахилу графіка $I = f(U)$ (збільшення диференціального опору в режимі стаціонарної ВАХ). Зростання з часом струмової відсічки ВАХ вказує на самодовільний ріст товщини проміжного шару між металом і телуридом кадмію. Про створення і використання окисних шарів на CdTe недавно повідомлялось в [9].

Спостережувані особливості електрофізичних властивостей ПБС Me(In,Sn,Pb)-p-CdTe корелюють з даними фотоелектричних вимірювань, зокрема закономірностями внутрішньої фотоемісії дірок через бар'єр в цих структурах. На рис. 3-а наведено залежність висоти бар'єру з боку металу ϕ_B^{opt} від напруги зміщення, яка побудована за даними переміщення відтинок фаулерівських залежностей в координатах $I^{1/2}$, $\hbar\omega$ (рис. 3-б). Тут I фотострум фотovoltaїчного ефекту БШ в режимі короткого замикання в домішковій області спектру, зумовлений фотоемісією, $\hbar\omega$ – енергія квантів падаючого випромінювання. Із класичних уявлень про ідеальний БШ відомо, що висота бар'єру з боку металу не повинна залежати від зміщення [10]. Тому експериментально спостережувана залежність $\phi_B^{opt} = f(U)$ є проявом проміжного шару в досліджуваних ПБС. Справді, при зворотних зміщеннях висота бар'єру ϕ_B^{opt} зменшується, а при прямих зміщеннях – збільшується і, після проходження максимуму спадає в області напруг $U > U_1$. Тут U_1 – струмова відсічка ВАХ. Це зумовлено додатковим фактором, крім опору ОПЗ і бази, що вносить вклад в перерозподіл напруги, яким і є проміжний шар.

Таким чином, поведінка ефективної ємності в області додатних зміщень корелює з особливостями ВАХ і закономірностями фотоемісії в цій області і не залежить від технологічних особливостей формування ПБС на p-CdTe. Як правило в літературі аналізується зворотна частина ВФХ $(C')^{-2} = f(U)$. Специфічна поведінка диференціальної ємності відзначається деякими авторами, наприклад [10], однак детальна інформація не наводиться. Відображена на рис. 1 різноманітність поведінки ВФХ в області додатних зміщень, разом з інформацією рис. 2, дозволяє зробити висновок, що вони зумовлені варіаціями товщини проміжного шару у вимірюваних ПБС. ВФХ рис. 1-в відноситься до структури де товщина δ цього шару достатньо мала (по даних [10] менше 30 Å) і тому ПБС має ВФХ $(C')^{-2} = f(U)$ подібну до ідеального діоду. При зростанні δ проміжний шар стає тунельно непрозорим, ємності проміжного шару і ОПЗ включаються послідовно і загальна ємність стає складною функцією параметрів проміжного шару і прикладеної напруги. В області прямих зміщень

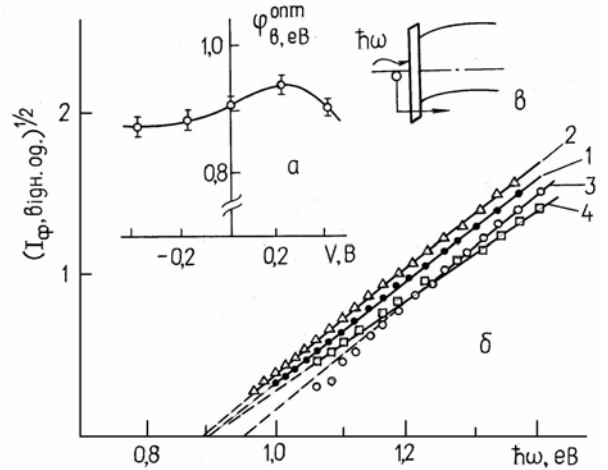


Рис. 3. Залежність висоти бар'єру з боку металу ϕ_B^{opt} від напруги регульованого зміщення (а), побудована по відтинках фаулерівських залежностей внутрішньої фотоемісії (б): 1 – 0 В; 2 – 0,2 В; 3 – +0,2 В; 4 – +0,4 В) і енергетична модель ПБС з позначенням механізму фотоемісії дірок (в).

розміри ОПЗ суттєво зменшуються а питома роль процесів на межі розділу зростає. Складний характер змін ϕ_B^{opt} , що прослідковується із фотоелектричних вимірювань, і $G(I)$ очевидно пов'язаний із зарядкою поверхневих енергетичних станів проміжного шару і їх нерівномірним розподілом по спектру.

IV. Висновки

Комплексно досліджено фізичні властивості ПБС метал-p-CdTe в області прямих зміщень. Показано, що нетипова поведінка диференціальної ємності, диференціальної провідності, внутрішньої фотоемісії в залежності від прикладеного до ПБС Me(In,Sn,Pb)-p-CdTe зміщення зумовлені проявами властивостей проміжного шару, який самодовільно формується між бар'єрним металом і телуридом кадмію під дією комплексу технологічних факторів, що важко контролюється. Проміжний шар має тенденцію збільшувати свою товщину в процесі деградації негерметизованих структур. Наведена інформація повчальна для ідентифікації проміжного шару при створенні і дослідженні ПБС на інших високоомних напівпровідникових матеріалах.

Українець В.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник;
Ільчук Г.А. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики;
Українець Н.А. – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри фізики;
Петрусь Р.Ю. – інженер;
Харамбура С.Б. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики.

- [1] R. Triboulet. Fundamentals of the CdTe synthesis // *Journal of Alloys and Compounds*, **371**(1-2), pp. 67-71 (2004).
- [2] T. Kunz, M. Laasch, I. Meinhardt, K.W. Benz. CdTe and CdTe: Cl vapour growth in a semi-closed system // *J. Cryst. Growth.*, **1-4**(184-185), pp. 1005-1009 (1998).
- [3] В.Е. Українець. Лавинное умножение фотоносителей в поверхностно-барьерных структурах металл-p-CdTe // *Физическая электроника*, (24), сс. 63-66 (1982).
- [4] Н.В. Демич, В.П. Махний. Лавинное умножение электронов и дырок в теллуриде кадмия // *Письма в ЖТФ*, **27**(20), сс. 57-60 (2001).
- [5] В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский. *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки* (физика, технология, применение). Сов. радио, М. 248 с. (1974).
- [6] О.В. Константинов, О.А. Мезрин. Влияние последовательного сопротивления диода Шоттки на его эффективную емкость // *Физика и техника полупроводников*, **17**(2), сс. 305-311 (1983).
- [7] Ю.А. Гольдберг, О.В. Иванова, Т.В. Львова, Б.В. Царенков. Влияние последовательного сопротивления на характеристику емкость-напряжение поверхностно-барьерной структуры // *Физика и техника полупроводников*, **17**(6), сс. 1068-1072 (1983).
- [8] А.В. Ковальчук. Влияние последовательного сопротивления на вольтёмкостную характеристику барьерных структур металл-органический полупроводник-металл // *Физика и техника полупроводников*, **19**(2), сс. 307-310 (1985).
- [9] Г.А. Ильчук, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Р.Н. Бежимбетов, В.И. Иванов-Омский, Н.А. Українець. Создание и фотоэлектрические свойства структур окисел-CdTe // *Физика и техника полупроводников*, **34**(9) сс. 1099-1102 (2000).
- [10] Э.Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник*. Радио и связь, М. 209 с. (1982).

V.O. Ukrainets, G.A. Ilchuk, N.A. Ukrainets, R.Yu. Petrus', S.B. Kharambura

Properties of Me(In, Sn, Pb)-p-CdTe Surface-Barrier Structures in Forward Bias Region

National University "Lviv'ska Politekhnik", Department of Physics,
12, Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine tel. 8(0322) 398-775, E-mail: gilchuk@polynet.lviv.ua

An atypical character of physical properties (differential capacitance, differential conductance, internal photoemission) of surface-barrier structures Me(In,Sn,Pb)-p-CdTe fabricated on the relatively high resistance p-CdTe ($\rho = (0,3 \div 6,0) \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, $p_{c-v} = (0,3 \div 40) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $T = 300 \text{ K}$) is revealed in the forward bias region. It is shown, that these effects are interrelated and caused by the interfacial structure layer localized between the metal and hole cadmium telluride.