

Образование омических контактов к низкоомному $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ для фотовольтаических применений

© О.А. Парфенюк[¶], М.И. Илащук, К.С. Ульяницкий

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
58012 Черновцы, Украина

(Получена 19 декабря 2007 г. Принята к печати 29 декабря 2007 г.)

Исследованы электрофизические свойства твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ разного состава ($0.1 \leq x \leq 0.3$). Установлено, что при $x = 0.1$ образуется низкоомный материал p -типа проводимости, близкий по своим параметрам к нелегированному CdTe . Особенностью кристаллов $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$ является то, что при осаждении на их поверхность меди из насыщенного раствора CuSO_4 образуется омический контакт, характеристики которого не ухудшаются в широком температурном интервале (80–300 К). Исследование световых и темновых характеристик структур $\text{Cu}/p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/n\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/\text{In}$ показало их перспективность в качестве фотопреобразователей солнечного света.

PACS: 72.80.Ey, 73.40.Cg, 73.40.Lq, 81.05.Dz, 85.40.Ls

1. Введение

Теллурид кадмия является одним из наиболее распространенных полупроводниковых материалов, которые используются для изготовления многих высокоэффективных приборов различного назначения [1]. Однако практическое применение CdTe в значительной мере затруднено из-за сложности получения омических контактов к данному полупроводнику, особенно к кристаллам p -типа проводимости с низким удельным сопротивлением, используемых для создания фотопреобразователей. Согласно теории Шоттки–Мотта [2], омический контакт к полупроводнику p -типа можно получить при использовании металла с большей термодинамической работой выхода электронов (W_M) в сравнении с работой выхода электронов из полупроводника (W_S). Используя приведенные в литературе значения электронного сродства теллурида кадмия $\chi = 4.28$ эВ или 4.5 эВ [3] и исходя из положения уровня Ферми в низкоомном $p\text{-CdTe}$ $E_F = 0.244 - 0.166$ эВ при концентрациях дырок, изменяющихся в пределах $1 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, можно оценить величину работы выхода для таких кристаллов W_{CdTe} . Оказалось, что значение последней будет изменяться в границах $W_{\text{CdTe}} = 5.54 - 5.6$ эВ при $\chi = 4.28$ эВ и $W_{\text{CdTe}} = 5.76 - 5.88$ эВ при $\chi = 4.5$ эВ, что превышает W_M практически для всех металлов [4]. Кроме того, материал контактов должен создавать мелкие акцепторные уровни в запрещенной зоне $p\text{-CdTe}$.

В большинстве работ для создания контактов к низкоомному теллуриду кадмия дырочного типа проводимости проводили предварительное легирование приконтактной области образца соответствующими примесями [3,5,6] или специальную обработку поверхности [7]. В обоих случаях создавался приконтактный слой с повышенной концентрацией дырок.

В данной работе для создания фотопреобразователей предложено использовать твердые растворы

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$. Будет показано, что при определенных значениях x образуется низкоомный материал p -типа проводимости, который по своим свойствам близок к нелегированному CdTe . Особенностью такого материала является то, что при осаждении на его поверхность меди из насыщенного водного раствора CuSO_4 не образуется энергетический барьер для движения носителей и контакт оказывается омическим.

2. Экспериментальная часть

С целью определения предельных значений x , при которых образуются низкоомные кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ дырочного типа проводимости, исследовали равновесные характеристики твердых растворов различного состава ($0 \leq x \leq 0.3$). Кристаллы выращивали методом Бриджмена при низком давлении пара Cd ($P_{\text{Cd}} = 0.02$ атм). В качестве исходных компонент использовали предварительно очищенный методом вакуумной дистилляции магний и очищенные зонным методом кадмий и теллур.

Состав полученных кристаллов контролировали сравнением ширины запрещенной зоны, определенной из исследований края поглощения, с результатами, известными из литературы [8]. Дополнительный контроль осуществляли при помощи масс-спектропии вторичных ионов. С помощью этой же методики был определен элементный состав исследуемого материала. Установлено, что в качестве остаточных примесей присутствуют такие химические элементы, как Na, K, Al, In, Ga, Si, Cr.

Измерение электрофизических параметров кристаллов — электропроводимости (σ) и коэффициента Холла (R_H) — проводили по стандартной методике на постоянном токе. Использовали образцы в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами $1.2 \times 1.5 \times 12$ мм, на поверхность которых наносили два токовых контакта и две пары зондовых.

[¶] E-mail: parfenyuk@chnu.cv.ua

Полупроводниковые $p-n$ -переходы изготавливали на основе твердых растворов $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Te$. Для этого использовали плоскопараллельные пластинки $8 \times 8 \times 1$ мм, поверхность которых подвергали механической и химической полировке. Область n -типа проводимости получали с помощью диффузии индия из жидкой фазы.

Контакты к образцам для электрических измерений в базовой части изготовленных структур создавали осаждением меди из насыщенного водного раствора $CuSO_4$ [9]. Омические контакты к n -области получали, используя индий.

Для определения основных параметров изготовленных структур проведены исследования темновых вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарядных (ВФХ) характеристик. Измерены также световые ВАХ структур при различных интенсивностях освещения.

3. Результаты и обсуждение

Основные электрофизические параметры твердых растворов $Cd_{1-x}Mg_xTe$ приведены в таблице. Все исследуемые образцы обладали дырочным типом проводимости. При $x = 0.1$ концентрация дырок p практически совпадает с типичной для нелегированного p - $CdTe$. Однако введение Mg приводит к некоторым изменениям равновесных свойств образцов: проявлению мелкого, истощенного при температурах $T > 80$ К акцепторного уровня, и некоторому понижению холловской подвижности μ_H носителей заряда.

При дальнейшем увеличении содержания Mg ($0.15 \leq x \leq 0.3$) кристаллы переходят в полуизолирующее состояние. Анализ литературных данных показывает [10], что рост сопротивления материала при увеличении концентрации Mg ($x > 0.1$) является характерным для твердых растворов $Cd_{1-x}Mg_xTe$. Можно предположить, что этот процесс вызван компенсирующим действием неконтролируемых примесей и одновременным уменьшением концентрации вакансий кадмия при увеличении количества Mg .

Как видно из рис. 1, ВАХ образца $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Te$ с нанесенными токовыми медными контактами является линейной при 80 К, что указывает на их омичность. Косвенным подтверждением высокого качества изготовленных контактов является возможность измерения R_H

Основные электрофизические параметры твердых растворов $Cd_{1-x}Mg_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.3$) при 300 К

Номер образца	x	Концентрация носителей p , cm^{-3}	Подвижность носителей μ_H , $cm^2/V \cdot s$	Глубина локального уровня ΔE , эВ
1	0	$5 \cdot 10^{15}$	60	0.05
2	0.1	$3 \cdot 10^{15}$	36	—
3	0.15	$2 \cdot 10^7$	16	0.85
4	0.2	$6 \cdot 10^7$	12	0.84
5	0.3	$6 \cdot 10^7$	18	0.84

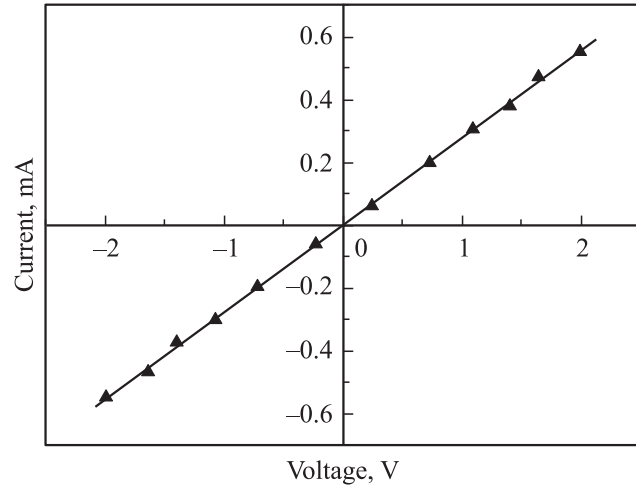


Рис. 1. ВАХ кристалла $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Te$ при 80 К. Контакты изготовлены осаждением меди.

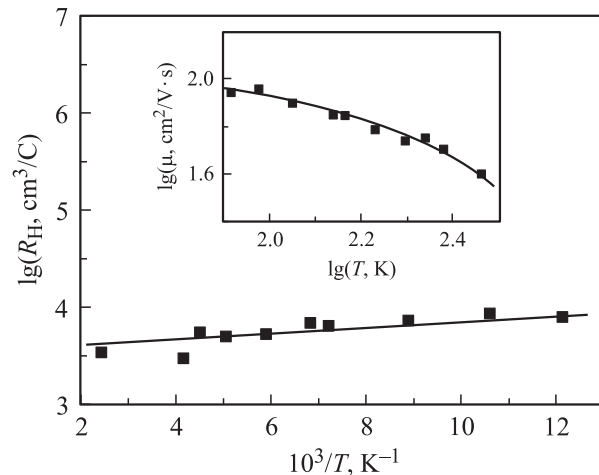


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла монокристалла $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Te$ с осажденными медными контактами (образец 2 таблицы). На вставке — экспериментальная температурная зависимость подвижности (точки) и расчет (сплошная линия) (см. текст).

в широком температурном интервале включая азотные температуры (рис. 2). Приведенная температурная зависимость величины R_H соответствует области истощения мелкого акцепторного уровня, что нехарактерно для нелегированного p - $CdTe$, полученного в тех же технологических условиях. В последнем случае зависимость $R_H(T)$ характеризуется наличием области активации энергетического уровня $E_v + 0.05$ эВ [1]. Указанное различие может быть объяснено изменением спектра энергетических уровней при переходе от бинарного соединения $CdTe$ к твердому раствору $Cd_{1-x}Mg_xTe$. Слабая зависимость $R_H(T)$ обусловлена неодинаковым относительным участием различных механизмов рассеяния при изменении температуры. Подвижность носителей (μ_H) в образцах $Cd_{0.9}Mg_{0.1}Te$ несколько ниже по срав-

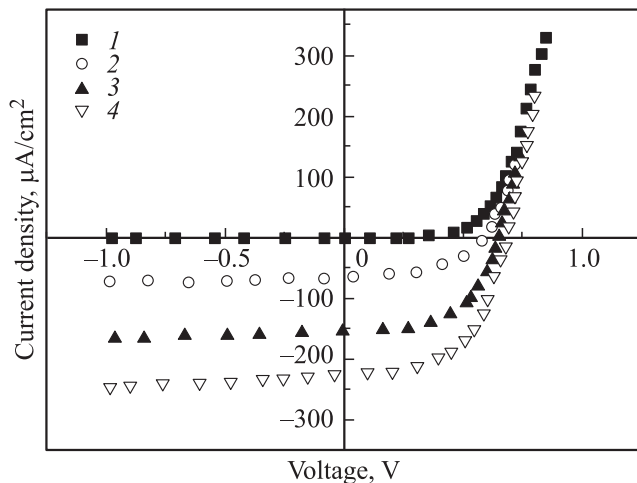


Рис. 3. ВАХ структуры $\text{Cu}/p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/n\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/\text{In}$ при 300 К: 1 — темновая; (2–4) — при освещении. Освещенность, 10^4 лк: 2 — 1.8, 3 — 2.9, 4 — 5.8.

нению с нелегированным CdTe. Расчеты показывают, что для отображения температурного хода экспериментальной зависимости $\mu_{\text{H}}(T)$ необходимо учитывать три механизма рассеяния: на полярных оптических фононах, ионизованных примесях и сплавном потенциале. Именно последний механизм, который отсутствует в соединении CdTe, вызывает некоторое понижение подвижности при образовании твердого раствора $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$.

Созданные структуры $\text{Cu}/p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/n\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/\text{In}$ характеризуются хорошо выраженным выпрямлением и являются фоточувствительными (рис. 3). Из исследований темновых ВАХ и ВФХ определены высота потенциального барьера, $e\phi = 0.8$ эВ, и толщина электрического перехода без внешнего напряжения, $d \approx 2$ мкм. Линейная зависимость ВФХ в координатах $(S/C)^3 = f(U)$ (S — площадь, C — барьерная емкость p - n -перехода, U — напряжение) дает основания отнести эти структуры к плавным p - n -переходам с линейным распределением примесей в переходной области.

При воздействии излучением, близким по спектральному составу и интенсивности к солнечному, структуры характеризовались такими параметрами: напряжение холостого хода $U_{oc} = 0.64$ В, ток короткого замыкания $I_{sc} = 220$ мкА/см², фактор заполнения ВАХ $F = 0.6$.

Необходимо отметить, что поведение атомов меди при ее использовании для создания тыльного контакта в барьерных структурах на основе CdTe в настоящее время широко дискутируется. Большинство исследователей считает, что высокая подвижность атомов меди в теллуриде кадмия может обусловить ее диффузию из контакта и таким образом привести к деградации свойств структуры [11]. Однако диффузионные процессы наиболее вероятны при повышении температуры или при наличии электрического поля в области неомического контакта $\text{Cu}/p\text{-CdTe}$. Кроме этого, диффузия Cu

с тыльного контакта внутрь структуры может иметь положительное влияние, поскольку создаваемые примесью дефекты увеличивают концентрацию дырок в поверхностном слое CdTe.

В предлагаемых барьерных структурах на основе твердого раствора $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$, для которого контакт с медью является омическим (отсутствует внутреннее электрическое поле), диффузия меди с тыльного контакта менее существенна, тем более что технология изготовления контакта исключает нагревание структуры.

Объяснение образования омических медных контактов к низкоомному $p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$ требует дальнейших исследований. Возможные причины данного явления — изменение величины электронного сродства, а также физико-химических и энергетических характеристик поверхности кристаллов при переходе $\text{CdTe} \rightarrow \text{CdMgTe}$.

Сопоставляя проблемы, возникающие при создании омических контактов к низкоомному $p\text{-CdTe}$, с относительной простотой решения этого вопроса при использовании твердого раствора $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$, можно отметить перспективность данных исследований.

4. Заключение

Показано, что при осаждении на поверхность твердого раствора $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$, близкого по своим параметрам к нелегированному теллуриду кадмия p -типа проводимости, меди из насыщенного раствора CuSO_4 образуется омический контакт, свойства которого не изменяются при понижении температуры до 80 К. Отсутствие нагревания материала, разрушающих обработок поверхности в процессе создания контакта, а также его относительная простота дают возможность использовать твердый раствор $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$ при разработке эффективных фотопреобразователей. Последнее подтверждается исследованиями свойств созданных структур $\text{Cu}/p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/n\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/\text{In}$.

Список литературы

- [1] K.R. Zanio. *Cadmium telluride. Semiconductors and semimetals* (N.Y.,—San Francisco—London, Acad. Press, 1976) v. 13.
- [2] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1973) ч. III, гл. 8, с. 298.
- [3] J.P. Pompon. *Sol. St. Electron.*, **28** (7), 689 (1985).
- [4] В.С. Фоменко. *Эмиссионные свойства материалов*. Справочник (Киев, Наук. думка, 1970) гл. 24, с. 444.
- [5] M.K. Rabinal, J. Lyubomirsky, E. Pekarskaya, V. Lyakhovitskaya, David Cahen. *J. Electron. Mater.*, **26**, 893 (1997).
- [6] E. Janik, R. Triboulet. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **16**, 2333 (1983).
- [7] В.П. Заячківський, М.А. Ковалец, Н.И. Кучма, Н.И. Процюк, И.А. Плысюк. *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 211 (1984).

- [8] А.П. Ахоян, Н.И. Витриховский, Г. Гарягдыев, И.Я. Городецкий, Н.Е. Корсунская, О. Нурягдыев. УФЖ, **30**, 1412 (1985).
- [9] В.В. Слынько, Е.С. Никонюк, В.В. Матлак. Приборы и техника эксперимента, № 3, 203 (1968).
- [10] U. Masasi. J. Phys. Soc. Jap., **26**, 1186 (1969).
- [11] D. Grecu, A.D. Compaan, D. Young, U. Jayamada, D.H. Rose. J. Appl. Phys., **88** (5), 2490 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Formation of ohmic contacts to low-resistance $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ for photovoltaic applications

O.A. Parfenyuk, M.I. Ilashchuk, K.S. Ulyanitsky

Y. Fed'kovych Chernivtsi National University,
58102 Chernivtsi, Ukraine

Abstract Electrical properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}$ solid solutions of different composition ($0.1 \leq x \leq 0.3$) are investigated. It is established that at $x = 0.1$ the material obtained is low-resistance one of p -type conductivity with electrical characteristics close to those of undoped CdTe. A peculiarity of $\text{Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}$ crystals is that the copper deposited onto their surface from an aqueous CuSO_4 solution creates an ohmic contact the properties of which are stable over the temperature range from 80 to 300 K. Investigations of dark and light characteristics of $\text{Cu}/p\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/n\text{-Cd}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{Te}/\text{In}$ show that they are prospective as solar photoconverters.