

Исследование вольт-амперной характеристики гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ в зависимости от температуры

© Ш.Н. Усмонов[¶], Ш.А. Мирсагатов, А.Ю. Лейдерман

Физико-технический институт им. С.В. Стародубцева Академии наук Республики Узбекистан, 100084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 18 мая 2009 г. Принята к печати 30 мая 2009 г.)

Исследованы вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ при различных значениях температуры. Установлено, что прямая ветвь вольт-амперной характеристики таких структур при малых напряжениях (до 0.5 В) описывается экспоненциальной зависимостью, а при больших (до 2.6 В) имеется участок сублинейного роста тока с напряжением. Экспериментальные результаты объясняются на основе теории эффекта инжекционного обеднения. Показано, что произведение подвижности основных носителей на концентрацию глубоких центров растет с ростом температуры.

1. Введение

Теллурид кадмия p -типа проводимости является оптимальным материалом для создания высокоэффективных пленочных солнечных элементов (СЭ) наземного применения [1]. Его ширина запрещенной зоны, составляющая 1.45 эВ, хорошо соответствует максимуму спектра солнечного излучения. Поэтому СЭ с базовым слоем теллурида кадмия имеет самый высокий теоретический коэффициент полезного действия — 29% [1]. Максимальная экспериментальная эффективность 16.5% зарегистрирована для СЭ на основе гетеросистем CdS/CdTe [1]. Эффективность СЭ на основе $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ во многом определяется совершенством состава, структуры, геометрическими размерами и фазами твердого раствора $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$, который формируется на границе раздела гетероструктуры [2–4]. Для достижения наиболее высокой эффективности СЭ твердый раствор должен иметь непрерывно изменяющийся на толщине $d \ll 1$ мкм состав от CdS до CdTe . Использование высокотемпературной технологии при формировании гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ приводит к увеличению содержания неконтролируемых примесей по всей структуре, в том числе в слое твердого раствора. Поэтому актуальной задачей является получение гетероструктуры с малой концентрацией неконтролируемых примесей и малой толщиной слоя твердого раствора. Для этого необходимо исследовать гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$, полученные при различных технологических режимах, с целью установления оптимальных условий выращивания.

2. Методика эксперимента

Для проведения исследований были изготовлены гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ по технологии, описанной в работе [3]. Верхний контакт, со стороны которого осуществляется освещение, был изготовлен напылением индия в вакууме ($\sim 10^{-5}$ Торр) в П-образной конфигурации.

Тыльный контакт изготавливался из молибдена. Базовым материалом для гетероструктуры служили пленки $p\text{-CdTe}$ с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^3 - 10^4$ Ом·см, толщина составляла ~ 70 мкм. Пленки состоят из блоков микрокристаллов со столбчатой структурой зерен, ориентированных по направлению роста и разориентированных по азимуту. Размеры зерен находятся в пределах от 100 до 150 мкм, так что зерна охватывают всю толщину пленки.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктуры, представленные в полулогарифмическом масштабе на рис. 1, регистрировались в прямом направлении в широких пределах изменения тока I и напряжения V . Исследование проводилось в температурном диапазоне $T = 273 - 433$ К.

3. Результаты и их обсуждение

Начальный участок ВАХ (до 0.5 В) хорошо аппроксимируется известным законом [5]

$$I = I_0 e^{qV/ckT}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона. Значения показателя c в экспоненте и предэкспоненциальный множитель I_0 , вычисленные из ВАХ для различных температур, приведены в табл. 1.

Твердый раствор $i\text{-CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ формирующийся между слоями $p\text{-CdTe}$ и $n\text{-CdS}$, является высокоомным [2,6,7], и он в основном определяет электронные процессы в структуре в целом, в том числе и механизм переноса тока.

Зависимость (1) характерна для так называемого „длинного“ p - n -диода, т. е. когда $d/L_p > 1$, где d — длина базы, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ — диффузионная длина неосновных носителей, D_p — коэффициент диффузии, τ_p — время жизни неосновных носителей. Поскольку электронные процессы, обусловленные модуляцией заряда при прохождении тока через структуру, в основном определяются переходным высокоомным слоем $i\text{-CdTe}_{1-x}\text{S}_x$,

[¶] E-mail: Sh_usmonov@rambler.ru

уместно в качестве длины базы взять толщину этого слоя, которая составляет $d \approx 2$ мкм [3].

Экспоненциальная зависимость тока от напряжения (1) была уточнена в [8] для $p-i-n$ -структур, и в результате показатель c в экспоненте имеет следующий вид:

$$c = \frac{2b + \text{ch}(d/L_p) + 1}{b + 1}, \quad (2)$$

где $b = \mu_n/\mu_p$ — отношение подвижностей электронов и дырок, для твердого раствора $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ $b \approx 10$ [9]. Зная b , можем найти $d/L_p \approx 3.35$, затем можно найти диффузионную длину неосновных носителей: $L_p \approx 0.6$ мкм. Это позволяет определить произведение подвижности на время жизни неосновных носителей $\mu_p\tau_p = qL_p^2/kT$, которое получается при комнатной температуре равным $\sim 1.43 \cdot 10^{-7}$ см²/В. При $T = 353$ К $\mu_p\tau_p \approx 3.9 \cdot 10^{-7}$ см²/В, что превышает в 2.73 раза значение при комнатной температуре; возрастание $\mu_p\tau_p$ с температурой, вероятно, объясняется перезарядкой глубоких центров.

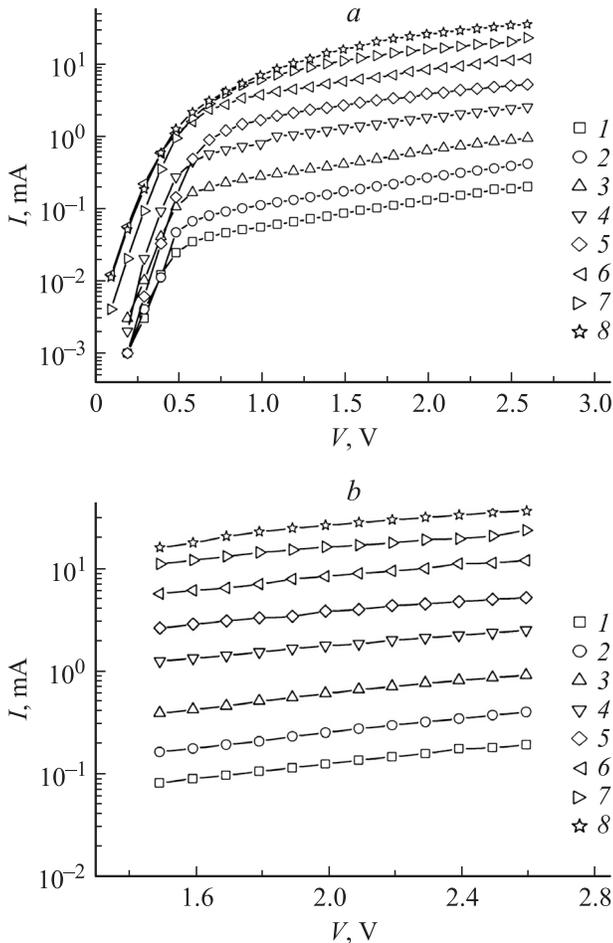


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ в прямом направлении при различных температурах (а) и их сублинейные участки (б). T , К: 1 — 293, 2 — 313, 3 — 333, 4 — 353, 5 — 373, 6 — 393, 7 — 413, 8 — 433.

Таблица 1. Значения показателя c в экспоненте и предэкспоненциального множителя I_0 в соотношении (1), определенные из экспериментальных ВАХ при различных температурах

T , К	c	I_0 , А
293	3.19	$9.52 \cdot 10^{-8}$
313	3.09	$1.02 \cdot 10^{-7}$
333	2.71	$2.58 \cdot 10^{-7}$
353	2.20	$2.62 \cdot 10^{-7}$
373	1.80	$3.74 \cdot 10^{-7}$
393	1.93	$3.0 \cdot 10^{-6}$
413	1.80	$9.82 \cdot 10^{-7}$
433	1.77	$2.82 \cdot 10^{-6}$

Время жизни неосновных носителей тока (τ_p) оценивалось по релаксации неравновесных носителей тока при малом уровне возбуждения как в отсутствие напряжения, так и при различных приложенных напряжениях [10,11]. Неравновесные носители возбуждались электрическим сигналом, который подавался с генератора калиброванных импульсов Г5-35 П-образного вида с амплитудой 60–80 мВ и длительностью 100–200 мкс. Крутизна таких импульсов составляла не более $2 \cdot 10^{-8}$ с, а скважность не менее $5 \cdot 10^{-4}$.

Релаксационная кривая для концентрации неравновесных носителей Δn в отсутствие напряжения описывается экспоненциальной зависимостью вида

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где t — время, τ — постоянная времени релаксации. По зависимости (3) было определено значение постоянной времени: $\tau \approx 2.38 \cdot 10^{-7}$ с. Поскольку в исследованных структурах релаксационный процесс неравновесных носителей тока модулируется неосновными носителями, то характерное время релаксации определяется временем жизни неосновных носителей и, следовательно, $\tau_p \approx 2.38 \cdot 10^{-7}$ с.

Зная значение τ_p , можем найти подвижность неосновных носителей дырок; она составляет $\mu_p \approx 0.6$ см²/(В·с), что хорошо согласуется с данными для μ_p в твердом растворе $i\text{-CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ [12].

Предэкспоненциальный множитель I_0 в зависимости (1) описывается выражением [5]

$$I_0 = \frac{kT}{q} \frac{Sb\text{ch}(d/L_p)}{2(b+1)L_p\rho \text{tg}(d/2L_p)}, \quad (4)$$

где S — площадь образца, ρ — удельное сопротивление. По соотношению (4) были найдены значения удельного сопротивления $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ при различных температурах, они приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, твердый раствор имеет большое удельное сопротивление, т.е. действительно является высокоомным.

Из температурной зависимости удельного сопротивления по наклону зависимости $\ln(1/\rho) = f(1/T)$ была оценена энергия активации носителей заряда, ко-

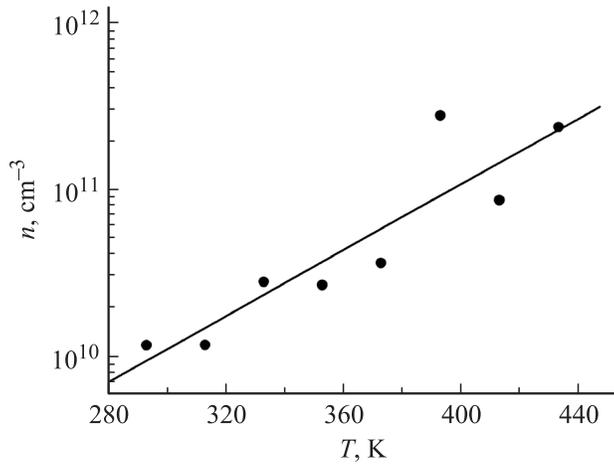


Рис. 2. Зависимость концентрации основных носителей тока твердого раствора $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ от температуры.

торая получилась равной $\Delta E \approx 0.17$ эВ. В твердом растворе $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ двухзарядная вакансия Cd образует с заряженным донорным центром комплекса типа $(V_{\text{Cd}}^{-2}D^+)^-$, который имеет энергию активации $\Delta E_{V_{\text{Cd}}^{-2}D^+} = 0.14-0.17$ эВ [13]. Следовательно, в диапазоне температур 293–430 К проводимость твердого раствора, помимо мелких примесей, определяется комплексами типа $(V_{\text{Cd}}^{-2}D^+)^-$.

Как известно, удельное сопротивление при данной температуре определяется концентрацией основных носителей (n): $\rho = 1/q\mu_n n$. На основе данных табл. 2 была найдена температурная зависимость концентрации основных носителей, которая представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что концентрация основных носителей в $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ при комнатной температуре имеет значение $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и растет с увеличением температуры, достигая $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при $T = 430$ К. Отсюда следует, что исследуемый твердый раствор $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ является сильно компенсированным материалом и концентрация ионизованных комплексов типа $(V_{\text{Cd}}^{-2}D^+)^-$ имеет величину $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре. Проведенный расчет концентрации основных носителей по вычисленному удельному сопротивлению дает усредненную оценку. Разброс точек на рис. 2, по всей вероятности, свидетельствует о том, что исследуемый твердый раствор является неоднородным по составу [14].

Из рис. 1 видно, что вслед за обычной экспоненциальной зависимостью на всех ВАХ, независимо от температуры, появляются протяженные сублинейные участки (в диапазоне напряжений $1 < V < 2.6$ В). По-видимому, эти участки ВАХ могут быть хорошо описаны в рамках теории так называемого „эффекта инжекционного обеднения“, впервые предсказанного теоретически в работе [15]. В случае этого эффекта ВАХ имеет весьма специфический характер и описывается закономерностью вида

$$V \approx V_0 e^{Jad}, \quad (5)$$

где

$$a = \frac{1}{2qD_n N_t} \quad (6)$$

— параметр, зависящий только от коэффициента диффузии основных носителей D_n (т.е. от их подвижности, $D_n = (kT/q)\mu_n$) и концентрации глубоких примесей N_t ; J — плотность тока. Одним из важнейших условий наблюдения сублинейного участка ВАХ (5) является требование

$$Jad > 2, \quad (7)$$

которое выполняется при всех температурах (например, $Jad \approx 3$ при $T = 293$ К, $S = 5$ мм²).

Как следует из теории, проявление такой ВАХ возможно только при встречных направлениях амбиполярной диффузии неравновесных носителей и их амбиполярного дрейфа, который в этом случае определяется инжекционной модуляцией заряда глубоких примесей (см. подробнее [8]). Используя выражение (5), можно определить параметр a непосредственно из данных по ВАХ:

$$a = \frac{[\ln(V_2/V_1)]S}{(I_2 - I_1)d}, \quad (8)$$

где I_1, I_2 — значения тока при двух напряжениях V_1, V_2 . Значения параметра a , найденные из ВАХ при различных температурах, приведены в табл. 3.

Как отмечалось выше, знание величины a позволяет определить концентрацию глубоких центров N_t ,

Таблица 2. Значения удельного сопротивления твердого раствора $i\text{-CdTe}_{1-x}\text{S}_x$, определенные из экспериментальных ВАХ при различных температурах

$T, \text{ К}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{см}$
293	$8.93 \cdot 10^7$
313	$8.89 \cdot 10^7$
333	$3.74 \cdot 10^7$
353	$3.91 \cdot 10^7$
373	$2.89 \cdot 10^7$
393	$3.8 \cdot 10^6$
413	$1.22 \cdot 10^7$
433	$4.45 \cdot 10^6$

Таблица 3. Значения параметра a в зависимости от температуры

$T, \text{ К}$	$a, \text{ см/А}$
293	$1.60 \cdot 10^6$
313	$1.23 \cdot 10^6$
333	$7.53 \cdot 10^5$
353	$2.19 \cdot 10^5$
373	$7.80 \cdot 10^4$
393	$4.43 \cdot 10^4$
413	$1.34 \cdot 10^4$
433	$6.75 \cdot 10^3$

ответственную за появление сублинейного участка ВАХ, которая составила при комнатной температуре $N_t \approx 1.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В твердом растворе CdTe $_{1-x}$ S $_x$ глубокие уровни образуются неконтролируемыми примесями Cu, Ag, Au, которые имеют энергии ионизации $E_i \approx 0.3-0.4 \text{ эВ}$, а также двухзарядной вакансией кадмия (V_{Cd}^{-2}) с энергией ионизации $E_i \approx 0.6 \text{ эВ}$ [13].

Используя данные табл. 3, мы нашли зависимость произведения подвижности основных носителей на концентрацию глубоких центров, $\mu_n N_t$, от температуры, которая представлена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что $\mu_n N_t$ для основных носителей в твердом растворе CdTe $_{1-x}$ S $_x$ увеличивается с ростом температуры. Это, по-видимому, позволяет заключить, что в данном твердом растворе большую роль в механизме подвижности играет рассеяние носителей на глубоких центрах.

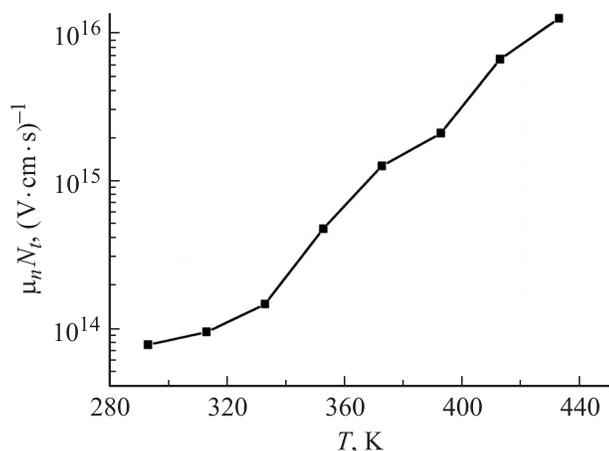


Рис. 3. Зависимость произведения $\mu_n N_t$ от температуры твердого раствора CdTe $_{1-x}$ S $_x$, определенная из зависимости $a(T)$.

Зависимость $\mu_n N_t$ от температуры показывает, что глубокие уровни в CdTe $_{1-x}$ S $_x$ расположены почти непрерывно по энергии и их концентрация быстро возрастает с приближением к середине запрещенной зоны. При этом многие уровни из разряда рекомбинационных центров переходят в разряд уровней прилипания. Уровни прилипания, находящиеся в заряженном состоянии, увеличивают вероятность столкновений с подвижными носителями. Эти процессы, по-видимому, приводят к уменьшению подвижности носителей. Следовательно, рост $\mu_n N_t$ с температурой в основном определяется увеличением концентрации глубоких уровней.

4. Заключение

Установлено, что значение $\mu_p \tau_p$ в гетероструктуре n -CdS/ p -CdTe с повышением температуры увеличивается. Например, $\mu_p \tau_p \approx 1.43 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{В}$ при $T = 293 \text{ К}$, а при $T = 353 \text{ К}$ $\mu_p \tau_p \approx 3.9 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{В}$.

Путем исследования температурной зависимости предэкспоненциального множителя I_0 экспоненциального участка ВАХ показано, что распределение концентрации равновесных носителей в твердом растворе CdTe $_{1-x}$ S $_x$ n в зависимости от температуры имеет сложный характер. Наличие в зависимости $n(T)$ участков постоянных значений говорит о неоднородности твердого раствора CdTe $_{1-x}$ S $_x$ не только по проводимости, но и по составу.

Исследование температурной зависимости сублинейного участка ВАХ показало, что глубокие уровни в CdTe $_{1-x}$ S $_x$ распределены непрерывно и их концентрация возрастает с приближением к середине запрещенной зоны.

Список литературы

- [1] K. Durose, P.R. Edwards, D.P. Holliday. *J. Cryst. Growth*, **197**, 733 (1999).
- [2] M.K. Herndon, A. Gupta, V.I. Kaydanov, R.T. Collins. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (22), 3503 (1999).
- [3] С.А. Музафарова, Ш.А. Мирсагатов, Ж. Жанабергенов. *ФТТ*, **49** (6), 1111 (2007).
- [4] Х.Х. Исмаилов, А.М. Абдугафуров, Ш.А. Мирсагатов, А.Ю. Лейдерман. *ФТТ*, **50** (11), 1953 (2008).
- [5] В.И. Стафеев. *ЖТФ*, **28** (9), 1631 (1958).
- [6] K. Ohata, J. Sarate, T. Tanaka. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **12**, 1641 (1973).
- [7] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов. *Неорг. матер.*, **41**, 915 (2005).
- [8] Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. *Токи двойной инжекции в полупроводниках* (М., Сов. радио, 1978).
- [9] *Физика и химия соединений $A^{IV}B^{VI}$* , под ред. С.А. Медведева (М., Мир, 1970).
- [10] L.W. Davies. *Proc. IEEE*, **51**, 1637 (1963).
- [11] А. Фаренбурх, Р. Бьюб. *Солнечные элементы. Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987).
- [12] С.А. Музафарова, Ш.А. Мирсагатов, Ф.Н. Джамалов. *ФТП*, **43** (2), 187 (2009).
- [13] K. Zanio. In: *Semiconductors and Semimials*, v. 4 (Academic Press, 1978).
- [14] С.А. Музафарова, Б.У. Айтбаев, Ш.А. Мирсагатов, К. Дуршимбетов, Ж. Жанабергенов. *ФТП*, **42** (12), 1409 (2008).
- [15] A.Yu. Leyderman, P.M. Karageorgiy-Alkalaev. *Sol. St. Commun.*, **27**, 339 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of temperate dependence of n -CdS/ p -CdTe heterostructure current–voltage characteristic

Sh.N. Usmonov, Sh.A. Mirsagatov, A.Yu. Leyderman

Starodubtsev Physicotechnical Institute,
Academy of Sciences of Uzbekistan,
100084 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Current–voltage characteristics of n -CdS/ p -CdTe heterostructures have been investigated at different temperatures. It has revealed that direct current–voltage characteristics of such structures are described by exponential dependence at small voltage (to 0.5 V) and then, at greater voltage (to 2.6 V) they have sublinear behavior. These experimental results have been explained on the basis of the theory of injection depletion. It has been shown, that product of major carrier mobility and concentration of the deep centers increases with the temperature increasing.