

Механизм переноса тока в гетероструктурах $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ с толстым слоем твердого раствора $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$

© Х.Х. Исмоилов, А.М. Абдугафуров, Ш.А. Мирсагатов, А.Ю. Лейдерман

Физико-технический институт „Физика-Солнце“ Академии наук Узбекистана,
700084 Ташкент, Узбекистан

E-mail: aabdugafurov@rambler.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 11 апреля 2008 г.)

Исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики гетеросистемы $p\text{-CdTe}/n\text{-CdS}$. Результаты показывают, что на гетерогранице $p\text{-CdTe}/n\text{-CdS}$ формируется высокоомный i -слой (твердый раствор $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$), который неоднороден не только по проводимости, но и по составу. По данным вольт-фарадных характеристик оценены толщины твердых растворов и установлено, что в промежуточном слое имеются области различного типа проводимости. Показано, что амбиполярные диффузия и дрейф в высокоомных твердых растворах $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ направлены навстречу друг другу, что приводит к появлению сублинейного участка ВАХ типа $V = \exp(Iaw)$. Наблюдение сублинейного участка ВАХ при прямом и обратном направлениях тока в широком диапазоне температур 77–323 К свидетельствует о том, что диффузионно-дрейфовый режим реализуется в различных частях i -слоя в зависимости от плотности тока и температуры окружающей среды. Изменение величин тока и емкости, а также формы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик после ультразвукового облучения показывает, что в твердых растворах $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ имеются метастабильные состояния, которые в процессе ультразвукового облучения, вероятно, распадаются и затем вновь образуют твердые растворы с более стабильными состояниями.

Работа выполнена в рамках гранта № 2Ф-032 Фонда поддержки фундаментальных исследований Академии наук Узбекистана.

PACS: 73.40.Lq, 73.40.Ty

Поликристаллический CdTe является дешевым и перспективным материалом для солнечной энергетики, так как этот полупроводник имеет ширину запрещенной зоны $E_g \approx 1.5\text{ eV}$ при комнатной температуре, т.е. оптимален для детектирования солнечного излучения. Другое перспективное направление практического использования поликристаллического CdTe — создание на его основе детекторов жесткого рентгеновского и γ -излучения [1,2]. Большие атомные номера компонент материала $Z = 48(\text{Cd})$ и $Z = 52(\text{Te})$ обеспечивают более высокую квантовую эффективность по сравнению с детекторами на основе кремния. Поэтому в последние годы интенсивно исследуются различные полупроводниковые структуры на основе поликристаллического CdTe, прежде всего гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$. Очень часто гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ используются как солнечные элементы. Интерес к ним связан с дороговизной кремниевых и арсенид-галлиевых аналогов. После установления факта формирования твердого раствора (ТР) $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ на границе раздела гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ начались интенсивные исследования, направленные на установление свойств этого слоя, поскольку он является высокоомным и может существенно влиять на электронные процессы во всей структуре в целом [3–5]. В этих работах было показано, что ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ на гетерогранице формируется сильно неоднородным (см. также [6,7]). В работах [7,8] фотоэлектрическим методом определены ширина запрещенной зоны E_g , состав x и постоянные решетки $a(x)$ твердых растворов на гетерогранице $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ в зависимости от технологических параметров. При этом было обна-

ружено, что геометрия и состав ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ сильно зависят от технологических параметров, прежде всего от температуры подложки. В [9] было показано, что промежуточный ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ толщиной $\sim 1\ \mu\text{m}$ сильно влияет на механизм переноса тока в гетероструктуре $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$. Поэтому представляет интерес исследование гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ в случае, когда ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ на гетерогранице достаточно толстый. Необходимо изучить влияние состава и глубоких уровней в твердом растворе на кинетические процессы и процессы переноса тока. В этот вопрос могут внести определенную ясность исследования вольт-фарадной и вольт-амперной характеристик гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$. В настоящей работе приводятся результаты систематических исследований гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$, у которой толщина высокоомного ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ составляет $3\ \mu\text{m}$. Толщина промежуточного твердого раствора была измерена по сколу с торца гетероструктуры на микроскопе МИМ-8, как в работе [9]. При указанной толщине промежуточного слоя выпрямляющие свойства гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ и выходные параметры солнечного элемента резко ухудшаются. Поэтому установление природы физических процессов в таких гетероструктурах имеет большое практическое значение в связи с определением причин, приводящих к таким негативным последствиям.

Для проведения исследования были изготовлены гетеропереходы $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ по технологии, описанной в [8]. Верхний П-образный контакт, со стороны которого осуществляется освещение, изготовлен из индия, напыленного в вакууме $\sim 10^{-5}$ Торр. Нижний контакт изготов-

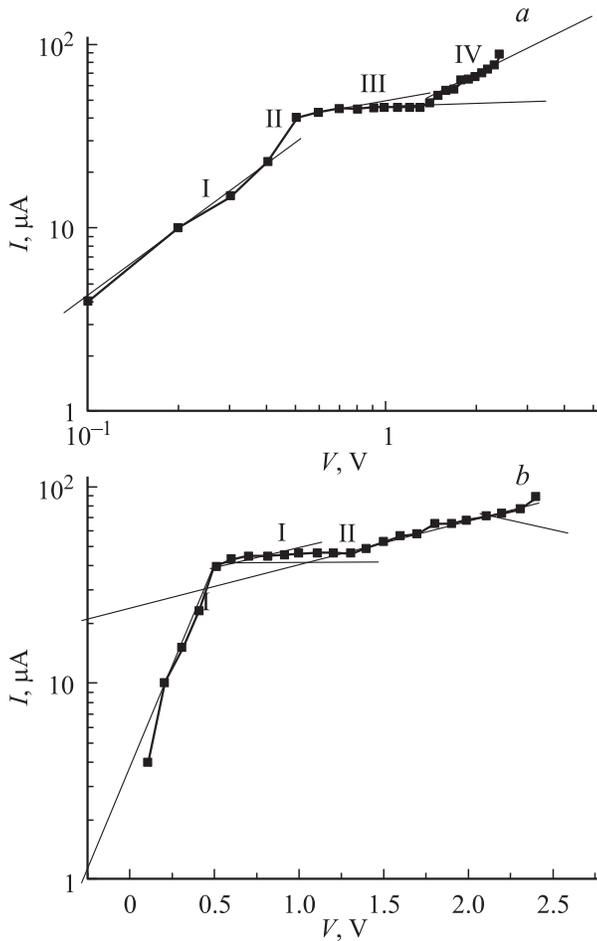


Рис. 1. Прямая ВАХ типичного образца при $T = 300$ К. *a* — в двойном логарифмическом масштабе: $I \sim V^\alpha$, $\alpha = 1.17$ (I), 2.27 (II), 0.12 (III), 0.9 (IV); *b* — в полулогарифмическом масштабе: I — $V \sim V_0 \exp(Iaw)$, $a = 3.2 \cdot 10^7$, $N_i = 3.8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; II — $I = I_0 \exp(qV/ckT)$, $I_0 = 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ A}$, $c = 64$.

лен из молибдена. Базовым материалом для гетероструктуры служили пленки p -CdTe. Сопротивление пленок было равно $\rho \approx 10^2 - 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, а толщина составляла $70 \mu\text{m}$. Пленки состояли из блоков микрокристаллов со столбчатой структурой зерен, ориентированных по направлению роста и разориентированных по азимуту. Размеры зерен находились в пределах от 100 до $150 \mu\text{m}$, так что зерна пронизывали всю толщину пленки.

Вольт-фарадные характеристики $C(V)$ измерялись в широком диапазоне частот $1 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$ при комнатной температуре. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в прямом и обратном направлениях в широких пределах изменения тока и напряжения при различных температурах ($77 - 323$ К). Следует отметить, что в ранее опубликованной работе [9] также исследовались ВАХ гетероструктур n -CdS/ p -CdTe. В ней отмечалось, что при малых напряжениях, по-видимому, имеет место ток термоэлектронной эмиссии, который с ростом напряжения сменяется экспоненциальной зависимостью

типа $J \approx \exp(qV/ckT)$, обусловленной влиянием процессов, происходящих в квазинейтральном i -слое. В настоящей работе промежуточный слой стал примерно в 3 раза больше, и можно ожидать реализации процессов, возможных исключительно в $p-i-n$ -структурах [10,11]. На рис. 1, *a, b* и 2, *a, b* представлены типичные ВАХ исследуемых образцов в прямом (когда на верхний контакт подан „+“ и обратном („-“ на верхнем контакте) направлениях. На рис. 1, *a* и 2, *a* зависимости тока от напряжения представлены в обычном двойном логарифмическом масштабе, на рис. 1 *b* и 2, *b* — в полулогарифмическом масштабе. На всех этих рисунках ясно прослеживается существование области, в которой ток почти не меняется с ростом напряжений (ВАХ идет почти параллельно оси напряжений). По-видимому, здесь имеет место эффект инжекционного обеднения, впервые теоретически предсказанный в [12] для $p-i-n$ -структур и наблюдавшийся потом на многих материалах, в частности для $p-i-n$ -структур из кремния, легированного цинком или золотом [13,14]. Для наблюдения этого эффекта, реализующегося исключительно в материалах с большими концентрациями глубоких примесей, необходимо выполнение целого ряда условий.

1) В исследуемой $p-i-n$ -структуре должны обязательно реализоваться встречные направления амбипо-

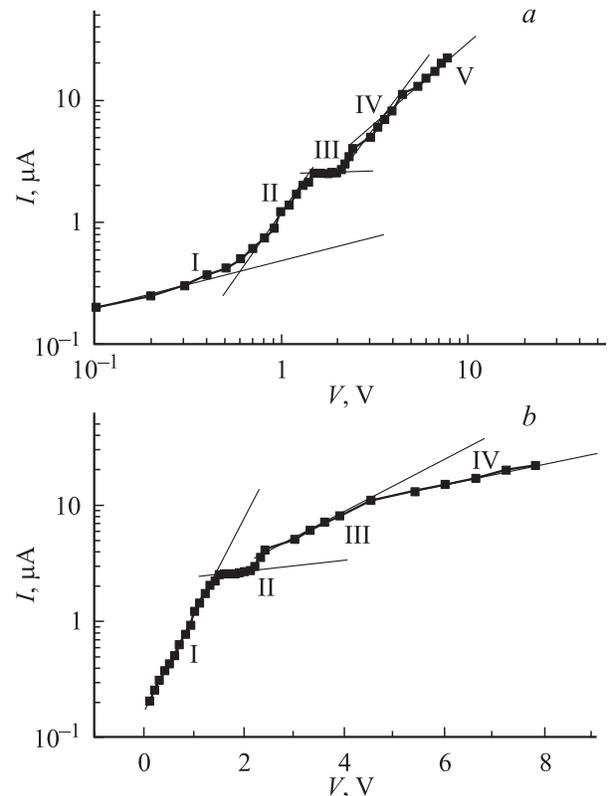


Рис. 2. Обратная ВАХ типичного образца при $T = 300$ К. *a* — в двойном логарифмическом масштабе: $I \sim V^\alpha$, $\alpha = 0.39$ (I), 2.2 (II), 0.15 (III), 2 (IV), 1.3 (V); *b* — в полулогарифмическом масштабе: I, III, IV — $I = I_0 \exp(-qV/ckT)$, где $c = 18.7$ (I), 74 (III), 181 (IV); II — $V \sim V_0 \exp(Iaw)$, $a = 3.7 \cdot 10^8$, $N_i = 6.6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

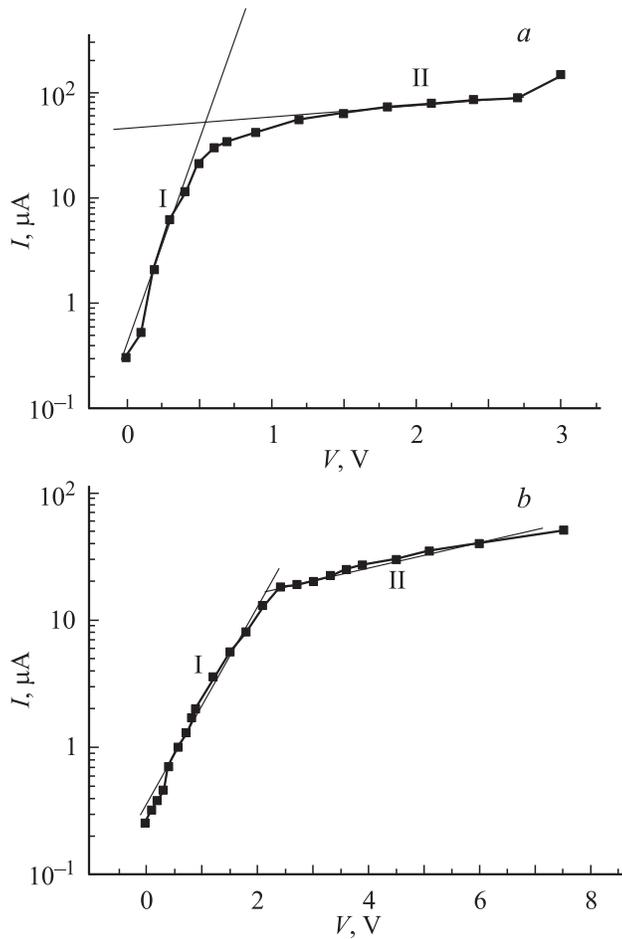


Рис. 3. Прямая (а) и обратная (b) ВАХ типичного образца в полулогарифмическом масштабе при $T = 300$ К после УЗ-облучения. $I = I_0 \exp(-qV/ckT)$, $I_0 = 8.9 \cdot 10^{-8}$ А. c : а) I — 5.68, II — 126; б) I — 17, II — 160.

лярных диффузии и дрейфа, что, в частности, легко осуществить, если сделать концентрацию у антизапорного контакта больше, чем у инжектирующего p - n -перехода.

2) Амбиполярная скорость дрейфа v_a должна определяться главным образом модуляцией заряда глубоких примесей и не зависеть от концентрации свободных носителей. В частности, в условиях высокой концентрации глубоких примесных центров, захватывающих дырки, v_a определяется выражением (подробнее см. [10,15])

$$v_a = \frac{I}{qbN_t}, \tag{1}$$

где I — плотность тока, q — заряд электрона, $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ — отношение подвижностей электронов и дырок, N_t — концентрация глубоких примесей.

В этом случае ВАХ носит сублинейный характер и описывается выражением

$$V = V_0 \exp(Iaw), \tag{2}$$

где w — длина i -базы, a — параметр, зависящий от концентрации глубоких примесей N_t ,

$$a = \frac{1}{2qD_nN_t}. \tag{3}$$

При этом обычно соблюдается условие

$$Iaw > 2. \tag{4}$$

В нашем случае $w = 3 \mu\text{m}$, $a = 3.2 \cdot 10^7 \text{ cm} \cdot \text{A}^{-1}$ (для тока в прямом направлении) и $2.8 \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{A}^{-1}$ (для тока в обратном направлении). Концентрация глубоких примесей N_t , определенная по формуле (3), составляет $N_{t1} = 3.8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ и $N_{t2} = 4.4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ для прямого и обратного направлений соответственно. Тогда $Iaw \approx 8.8$ для прямого тока и ≈ 4.4 для обратного тока, т.е. в пределах условия (4).

Проведенные исследования показывают, что сублинейный участок ВАХ сохраняется и при температурах 77 и 323 К. На рис. 3 приводятся ВАХ тех же образцов после ультразвукового (УЗ) облучения. Видно, что

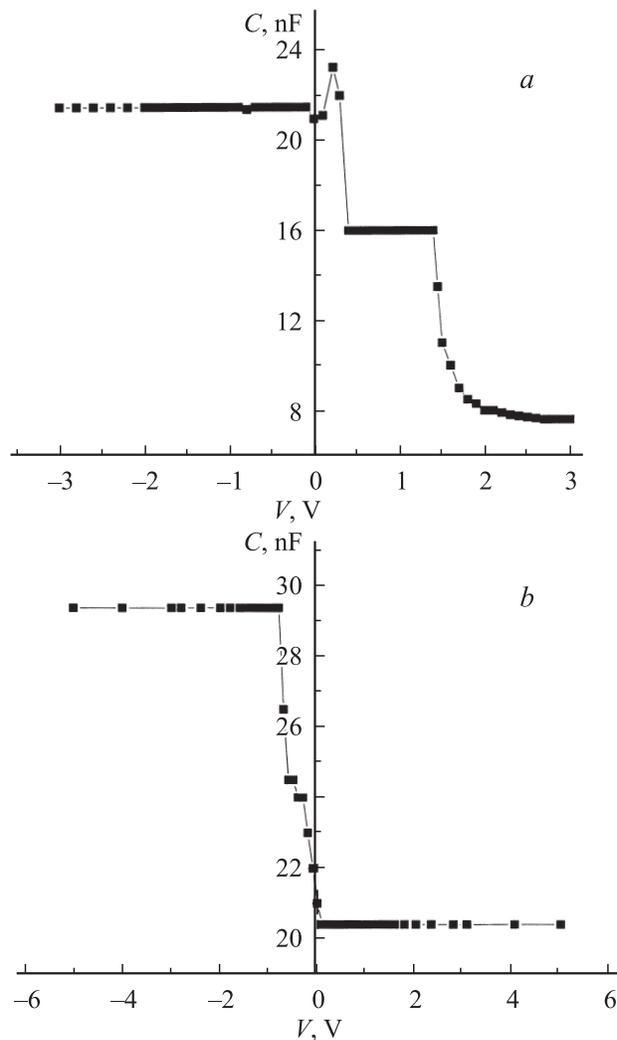


Рис. 4. $C(V)$ -характеристика типичного образца при $f = 100$ Hz, $T = 300$ К до облучения (а) и после УЗ-облучения (b).

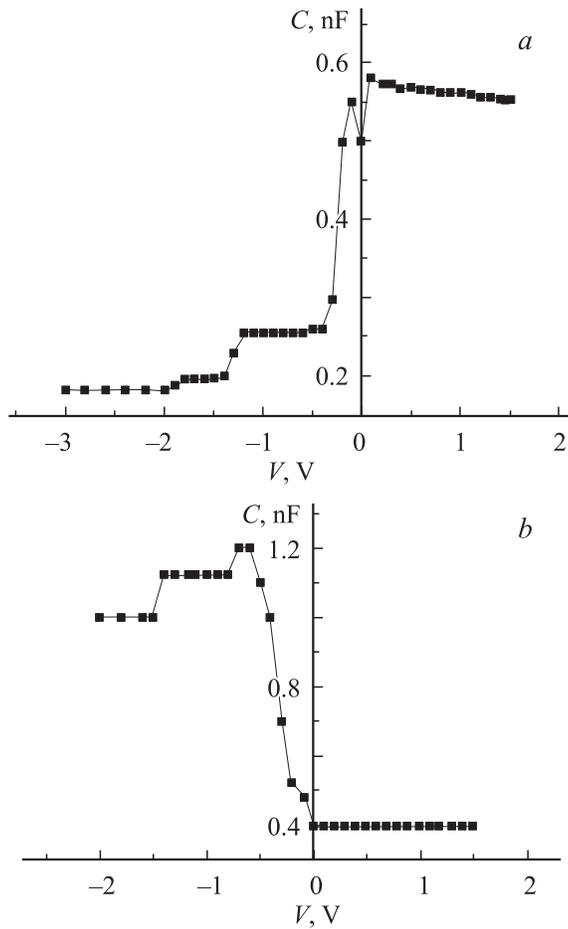


Рис. 5. $C(V)$ -характеристика типичного образца при $f = 1000 \text{ Hz}$, $T = 300 \text{ K}$ до облучения (а) и после УЗ-облучения (б).

ВАХ сильно изменилась, и участок типа (2) практически полностью исчез. Это однозначно свидетельствует о том, что глубокие примеси метастабильны и УЗ-воздействие изменяет их (возможно, они распадаются).

На первый взгляд удивляет то, что сублинейный участок ВАХ наблюдается как при прямом, так и при обратном направлении тока. Но это вполне можно объяснить качественно, если вспомнить, что возникающий i -слой хотя и мал по размерам, но неоднороден по составу. Исследования показывают, что i -слой состоит из нескольких разных слоев, что подтверждают и емкостные измерения (рис. 4, а; 5, а). Емкостные измерения также показывают, что ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ является действительно высокоомным и неоднородным по составу, о чем свидетельствуют $C(V)$ -характеристики, подобные вольт-фарадным характеристикам МОП- и ПОП-структур, и появление нескольких плато емкости как функции напряжения при различных частотах тестового сигнала. Наличие плато $C(V)$ -характеристик как при положительной, так и при отрицательной полярности приложенного напряжения указывает на то, что в промежуточном слое имеются ТР различного типа проводимости, так как в исследуемой гетероструктуре они играют роль диэлектрика

(окисла), а значения их емкости соответствует значению емкости на плато $C(V)$ -характеристик. Толщины ТР, оцененные из этой области $C(V)$ -характеристики, разные при различных частотах тестового сигнала. Например, при $f = 4 \text{ kHz}$ по всей области $C(V)$ -характеристики наблюдаются четыре плато (рис. 5, а), из них три — в области отрицательного напряжения и одно — в области положительного напряжения. Суммарная толщина твердых растворов, оцененная по плато $C(V)$ -характеристик, оказалась $\sim 0.7 \mu\text{m}$. Оценка проводилась по формуле $d = (\epsilon S/C)$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика (ТР), S — площадь верхнего металлического электрода. При оценке считалось $\epsilon \approx 9.5$, так как у сульфида кадмия и теллурида кадмия она равна 9–10 и 9.6 соответственно [16]. Поскольку ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ на гетерогранице $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ синтезируется с различными составами, их суммарная толщина должна быть гораздо большей, чем толщина, оцененная при одной частоте, например при $f = 4 \text{ kHz}$. Толщина твердых растворов, оцененная по емкостным измерениям, согласуется с

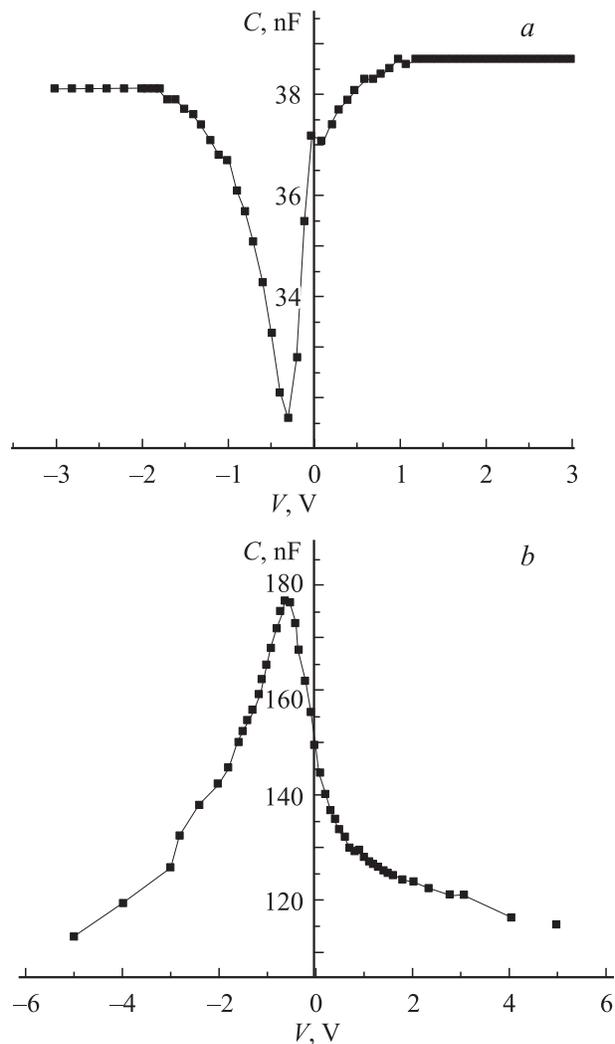


Рис. 6. $C(V)$ -характеристика типичного образца при $f = 1 \text{ MHz}$, $T = 300 \text{ K}$ до облучения (а) и после УЗ-облучения (б).

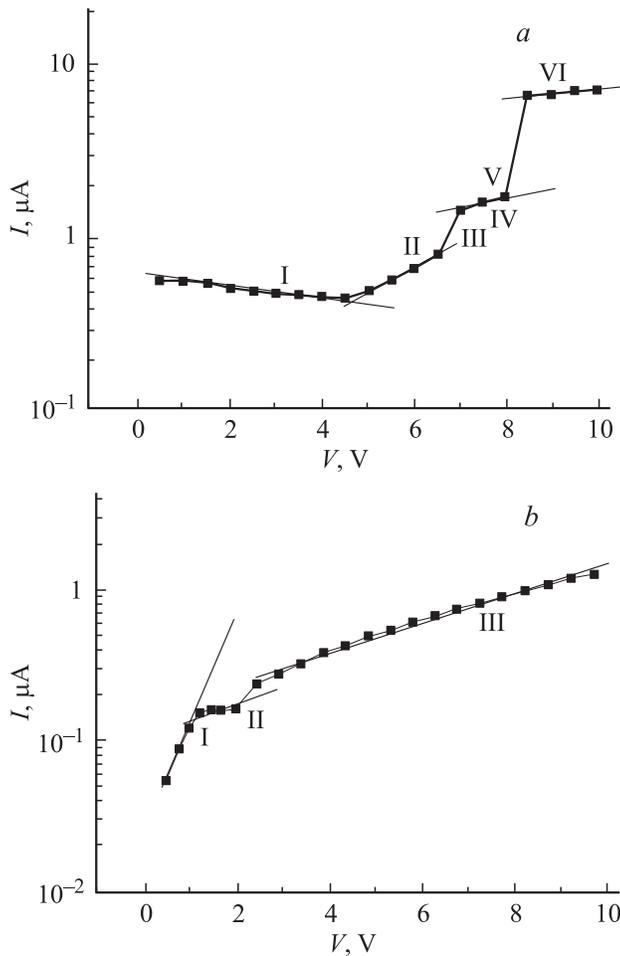


Рис. 7. Прямая (а) и обратная (б) ВАХ типичного образца в полулогарифмическом масштабе при $T = 323$ К после УЗ-облучения. а) I, VI — $V \sim V_0 \exp(Iaw)$, где $a = -9.17 \cdot 10^9$, $N_i = -1.2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ (I), $a = 5.33 \cdot 10^7$, $N_i = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (VI); II, III, IV, V — $I = I_0 \exp(-qV/ckT)$, где $c = 56$ (II), 34 (III), 192 (IV), 16 (V); б) I, III — $I = I_0 \exp(-qV/ckT)$, где $c = 36.3$ (I), 104 (III); II — $V \sim V_0 \exp(Iaw)$, $N_i = 3.2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$.

толщиной, полученной на микроскопе МИМ-8 путем измерения по сколу торца структуры. На рис. 4, б, 5, б приведены $C(V)$ -характеристики после УЗ-облучения мощностью 1 Вт при частоте 2.5 МГц в течение 10 мин. Сопоставление их с $C(V)$ -характеристиками, измеренными при тех же частотах до облучения, показывает, что наблюдаются изменения не только по величине, но и по форме. При этом происходит увеличение или уменьшение толщины твердых растворов, о чем свидетельствуют емкости на плато $C(V)$ -характеристик при $f = 1$ МГц (рис. 6). Аналогичное изменение происходит и с вольт-амперными характеристиками. Если раньше прямая и обратная ВАХ при комнатной температуре описывались двумя экспоненциальными и одним сублинейным участками (рис. 1, б, 2, б), то после УЗ-облучения ВАХ описывается только двумя экспоненциальными участками как при прямом, так и при обратном направ-

лении тока (рис. 3, а и б). УЗ-воздействие приводит к появлению трех сублинейных участков на прямой ВАХ при $T = 323$ К (рис. 7, а) вместо одного сублинейного участка до облучения (рис. 1, а). Обратная ветвь ВАХ при $T = 323$ К практически не изменяется, исчезает лишь участок резкого роста тока в зависимости от напряжения. Эти данные подтверждают то, что в составе ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ имеются метастабильные состояния, которые в процессе УЗ-облучения распадаются и затем вновь образуют ТР со стабильными состояниями [7]. По-видимому, в прямом и обратном направлениях ВАХ главную роль играют разные части i -слоя.

Таким образом, появление сублинейного участка ВАХ типа (2) однозначно свидетельствует о возникновении неоднородного по составу i -слоя в процессе формирования гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$. Это подтверждается и емкостными измерениями. Изменения величин тока и емкости, а также формы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик после УЗ-облучения показывают, что в ТР $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ имеются метастабильные состояния, которые в процессе УЗ-облучения распадаются и затем вновь образуют ТР со стабильными состояниями.

Список литературы

- [1] С.А. Колесов, Ю.В. Клевков, А.Ф. Плотников. ФТП **38**, 473 (2004).
- [2] T. Takahashi, Sh. Watanabe. IEEE Trans. Nucl. Sci. **48**, 950 (2001).
- [3] M.K. Herndon, A. Gupta, V.I. Kaydanov, R.T. Collins. Appl. Phys. Lett. **75**, 3503 (1999).
- [4] K. Ohata, J. Sarate, T. Tanaka. Jpn. J. Appl. Phys. **12**, 1641 (1973).
- [5] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов. Неорган. материалы **41**, 915 (2005).
- [6] Ш.А. Мирсагатов, С.А. Музафарова. Материалы конф. „Физика в Узбекистане“. Ташкент (2005). С. 97.
- [7] S.A. Muzafarova, Sh.A. Mirsagatov. Ukr. J. Phys. **51**, 1125 (2006).
- [8] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов. Тр. конф. „Фундаментальные и прикладные вопросы физики“. Ташкент (2003). С. 363.
- [9] Ш.А. Мирсагатов, Ж. Жанабергенов, С.А. Музафарова. ФТТ **49**, 1111 (2007).
- [10] Э.И. Адирович, П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках. Сов. радио, М. (1978). 320 с.
- [11] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах. Мир, М. (1973). 416 с.
- [12] A.Yu. Leiderman, P.M. Karageorgiy-Alkalaev. Solid State Commun. **25**, 781 (1978).
- [13] P.M. Karageorgiy-Alkalaev, I.Z. Karimova, P.I. Knigin, A.Yu. Leiderman. Phys. Status Solidi A **36**, 391 (1976).
- [14] А.А. Абакумов, И.З. Каримова, П.И. Книгин, А.Ю. Лейдерман. ФТП **10**, 486 (1978).
- [15] П.М. Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю. Лейдерман. Фоточувствительность полупроводниковых структур с глубокими примесями. Фан, Ташкент (1981). 200 с.
- [16] А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. Мир, М. (1975). 432 с.