

## Динамика перезарядки дефектов в крупноблочных пленках $p$ -CdTe

© Х.Х. Исмаилов, Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов

Физико-технический институт,  
700084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 25 апреля 2005 г. Принята к печати 18 мая 2005 г.)

Исследована вольт-фарадная характеристика МОП структуры на основе крупноблочной пленки  $p$ -CdTe. Немонотонная зависимость объясняется перезарядкой глубоких акцепторных уровней на границе полупроводник-окисел и изменением степени компенсации поверхностных состояний.

PACS: 71.20.Nr, 73.40.Qv

В последние годы экспериментально обнаружена немонотонная зависимость тока короткого замыкания  $I_{sc}$  солнечных элементов на основе Ge [1], Si [2–4] и коллекторного тока в биполярных фототранзисторах на основе CdTe [5]. Одним из основных результатов этого круга исследований является возрастание  $I_{sc}$  и убывание напряжения холостого хода ( $V_{oc}$ ), а также уменьшение коллекторного тока биполярных CdTe-фототранзисторов при монотонном возрастании концентрации глубоких дефектов ( $N_t$ ). Однако в солнечных элементах [6,7], созданных на основе крупноблочных поликристаллических пленок  $p$ -CdTe, в отличие от указанных выше работе, не только  $I_{sc}$ , но и коэффициент полезного действия ( $\eta$ ) возрастают с ростом концентрации глубоких примесей, как было показано в [8].

В [8,9] было показано, что природа упомянутых закономерностей одна и та же и связана с ростом времени жизни неосновных носителей заряда при увеличении степени компенсации. Кроме этого, последнее обстоятельство приводит к изменению толщины слоя объемного заряда в полупроводниковых структурах, а в поликристаллах кроме изменения толщины слоя объемного заряда изменяется потенциал на межзеренных границах. Известно, что в поликристаллических полупроводниках кинетические параметры, в том числе времена жизни неосновных носителей заряда, в основном определяются дефектами на поверхности (концентрация  $N_{ss}$ ), из которых главную роль играют межзеренные поверхностные состояния. Поэтому в данной работе изучается изменение степени компенсации поверхностных состояний на границе раздела окисел- $p$ -CdTe и сопротивления приповерхностного слоя полупроводника.

Наведенная концентрация носителей заряда на поверхности пленок  $p$ -CdTe создавалась с помощью МОП структуры. МОП структура была сформирована путем напыления специально изготовленного сплава Zn + Sn на поверхность крупноблочных пленок  $p$ -CdTe методом магнетронного ионного распыления в кислородсодержащей среде [10]. Отметим, что такие же пленки  $p$ -CdTe были использованы для создания солнечных элементов. Сопротивление пленки  $p$ -CdTe было равно  $\rho \approx 10^3 - 10^4$  Ом·см, а толщина составляла  $d \approx 70$  мкм. Пленки состоят из блоков микрокристаллов со столбчатой структурой зерен, ориентированных по направ-

лению роста и разориентированных по азимуту. Размеры зерен находятся в пределах от 100 до 150 мкм, так что зерна охватывают всю толщину пленки. На рис. 1 приведены экспериментальная (1) и расчетная (2) вольт-фарадные ( $C-V$ ) характеристики.

Экспериментальная  $C-V$ -характеристика была снята на частоте тестового сигнала  $f = 1$  МГц при комнатной температуре. Для построения расчетной  $C-V$ -характеристики концентрации равновесных носителей заряда (дырок) была определена из экспериментальной  $C-V$ -кривой. Концентрация равновесных носителей заряда ( $p_0$ ), определенная по величине емкости плоских зон и по наклону вольт-фарадной характеристики, оказалась равной  $10^{12}$  см $^{-3}$  [11], что на 3 порядка меньше равновесной концентрации дырок в самой пленке  $p$ -CdTe. Такая концентрация дырок характерна для приповерхностного слоя пленки.

Приповерхностный слой с такой концентрацией  $p_0$  формируется при изготовлении МОП структуры из-за диффузии атомов олова (Sn) и индия (In), которые являются для теллурида кадмия донорными примесями [12]. Расчетная вольт-фарадная характеристика была построена, как в [13]. Подъем и провал емкости на экспериментальной вольт-фарадной характеристике (рис. 1) были подробно проанализированы в [14], и они объясняются наличием глубоких акцепторных центров с энергиями  $E \approx E_v + 0.5$  эВ в слое объемного заряда и  $E \approx E_v + 0.16$  эВ на границе диэлектрик-полупроводник. Последние заполняются при скоплении основных носителей заряда на границе окисел- $p$ -CdTe, а первые опустошаются в режиме обеднения. Сопоставление экспериментальной и расчетной вольт-фарадной характеристик показывает, что исследуемая МОП структура оказывается сложной.

Наблюдаемое поведение экспериментальной вольт-фарадной характеристики, возможно, связано с перезарядкой поверхностных состояний с эффективной плотностью  $N_{ss}$ . По сдвигу экспериментальной  $C-V$ -характеристики по оси напряжения относительно расчетной найден полный заряд ( $Q_{ss}$ ), захваченный поверхностными состояниями, и значение поверхностного потенциала ( $\psi_s$ ), соответствующего заданному смещению на верхнем металлическом электроде. Реальный поверхностный потенциал определяется из значения  $\psi_s$ , со-

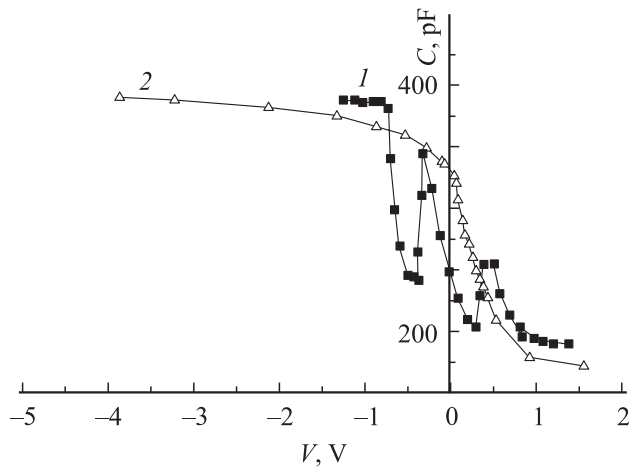


Рис. 1. Экспериментальная (1) и расчетная (2) вольт-фарадные характеристики.

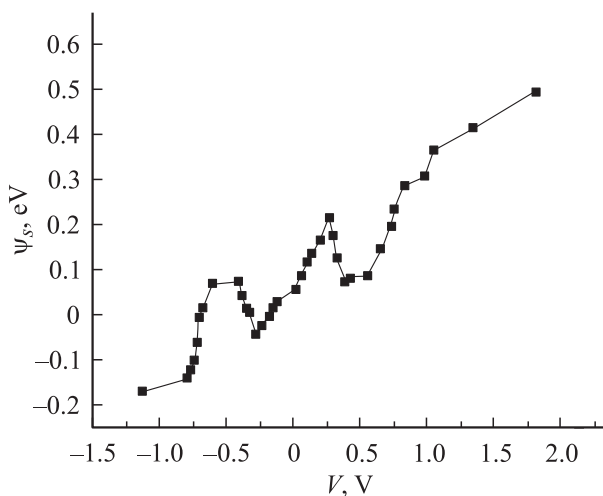


Рис. 2. Зависимость поверхностного потенциала от приложенного напряжения.

ответствующего идеальной вольт-фарадной характеристике, при одном и том же значении емкости экспериментальной и расчетной  $C-V$ -кривых. Таким путем найденная зависимость  $\psi_s$  от приложенного напряжения  $V$  приведена на рис. 2, а зависимость  $N_{ss}$  от  $\psi_s$  — на рис. 3. Общий анализ зависимостей  $\psi_s(V)$ ,  $N_{ss}(\psi_s)$  показывает, что в режимах аккумуляции и обеднения происходит перезарядка дефектов в приповерхностном слое полупроводника и на границе раздела.

Зависимость  $\psi_s(V)$  в режиме аккумуляции ведет себя anomalously с ростом отрицательного смещения, и край валентной зоны начинает изгибаться вниз вместо изгиба вверх. Такая тенденция продолжается до  $V = -0.42$  В, которому соответствует  $\psi_s = 0.077$  эВ, после чего поверхностный потенциал меняет свое направление изменения с дальнейшим ростом отрицательного смещения и снова приобретает отрицательное значение при  $V = -0.72$  В. Что касается плотности

поверхности состояний, то она своего максимального значения  $\sim 8.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  достигает при  $V = -0.69$  В ( $\psi_s = -0.016$  эВ), далее с усилением режима обогащения начинает резко уменьшаться и при  $\psi_s = -0.1$  эВ ( $V = -0.75$  В) обращается в нуль. После этого потенциал меняет знак и начинает сильно возрастать. Рассмотренное anomalous поведение зависимостей  $\psi_s(V)$ ,  $N_{ss}(\psi_s)$  в режиме обогащения объясняется перезарядкой глубоких локальных центров на поверхности и в приповерхностном слое полупроводника. Действительно, начало участка anomalous поведения зависимостей  $\psi_s(V)$ ,  $N_{ss}(\psi_s)$  совпадает с началом участка спада емкости на  $C-V$ -характеристике (см. рис. 1), где происходит заполнение глубоких акцепторных центров. Пока концентрация аккумулированных дырок меньше, чем концентрация глубоких центров, продолжается процесс заполнения и на  $C-V$ -характеристике сохраняется участок спада емкости. Захват дырок отрицательными акцепторными центрами ( $N_{ssa}$ ) нейтрализует их и, следовательно, приводит к изменению компенсации донорных и акцепторных поверхностных состояний, в результате чего растет эффективная плотность  $N_{ss}$ . Согласно приведенной в [14] оценке, этот глубокий акцепторный уровень имеет энергию активации  $E_a = 0.16$  эВ, что близко к  $E_a = 0.15$  эВ [12] энергии активации межузельного атома теллура ( $\text{Te}_i$ ).

Динамика изменения  $\psi_s$  в диапазоне  $V = -(0.29-0.42)$  В (рис. 2) показывает уменьшение проводимости приповерхностного слоя полупроводника вместо роста ее в режиме обогащения. Такая зависимость  $\psi_s(V)$  свидетельствует о наличии глубоких акцеп-

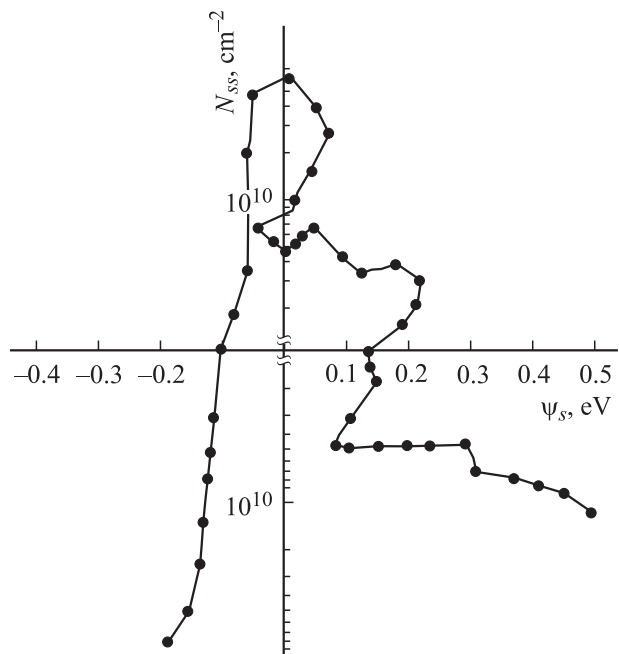


Рис. 3. Зависимость эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала на границе раздела окисел- $p$ -CdTe.

торных центров в приповерхностном слое. Кроме этого, следует отметить в термодинамическом равновесии на границе раздела окисел– $p$ -CdTe наличие значительного количества атомов индия (In) и олова (Sn), о чем свидетельствует изгиб валентной зоны ( $E_v$ ) вниз на величину  $\psi_s = 0.06$  эВ. При этом эффективная плотность состояний  $N_{ss} = 5.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и они имеют донорный тип. Как видно из рис. 3, эффективная плотность  $N_{ss}$  в режиме плоских зон ( $\psi_s = 0$ ) характеризуется величиной  $N_{ss} = 4.7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и они имеют донорную природу. Помимо этого из рисунка следует, что  $N_{ss}$  при  $\psi_s = -0.1$  и  $0.13$  эВ проходит через нуль.

В режиме обеднения из-за перезарядки глубоких акцепторных уровней с  $E_a \approx 0.5$  эВ поверхностный потенциал в области напряжения  $0.26$ – $0.39$  В (см. рис. 2) вместо увеличения уменьшается. Далее с ростом  $V$  вновь  $\psi_s$  возрастает, и при  $V = 1.8$  В  $\psi_s = 0.5$  эВ. Что касается динамики изменения  $N_{ss}$  (см. рис. 3), то в процессе уменьшения  $\psi_s$  величина  $N_{ss}$  также стремительно уменьшается и становится равной нулю при  $\psi_s = 0.13$  эВ. Затем поверхностные состояния приобретают акцепторную природу, плотность стремительно возрастает до  $N_{ss} = 4.1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  ( $\psi_s = 0.08$  эВ) и выходит на плато во всем диапазоне режима обеднения до  $\psi_s = 0.29$  эВ. В режиме инверсии эффективная плотность  $N_{ss}$  медленно увеличивается и становится равной  $N_{ss} = 1.1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  при  $\psi_s = 0.5$  эВ.

Таким образом, показано, что перезарядка глубоких акцепторных уровней на границе раздела окисел–полупроводник ( $p$ -CdTe) и в приповерхностном слое сопровождается изменением степени компенсации поверхностных состояний, обуславливая тем самым немонотонную зависимость емкости от напряжения.

## Список литературы

- [1] P. Baruch. J. Phys. Chem. Sol., **8**, 153 (1959).
- [2] M. Yamaguchi, S.J. Taylor, M.-Ju Yang, S. Matsuda, O. Kawasaki, T. Hisamatsu. Jap. J. Appl. Phys., **35** (7), pt 1, 3918 (1996).
- [3] M. Yamaguchi, S.J. Taylor, S. Watanabe, K. Ando, M. Yamaguchi, T. Hisamatsu, S. Matsuda. Appl. Phys. Lett., **72** (10), 1226 (1998).
- [4] M. Imaizumi, S.J. Taylor, M. Yamaguchi, T. Ito, T. Hisamatsu, S. Matsuda. J. Appl. Phys., **85** (3), 1916 (1999).
- [5] Ш.А. Мирсагатов, А.И. Султанов. Электрон. техн. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника, вып. 3 (55), 98 (1990).
- [6] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов. Письма ЖТФ, **29** (24), 84 (2003).
- [7] Ж. Жанабергенов, Ш.А. Мирсагатов, С.Ж. Каражанов, С.А. Музафарова. Письма ЖТФ, **29**, 82 (2003).
- [8] S.Zh. Karazhanov. J. Appl. Phys., **89** (8), 3707 (2001).
- [9] S.Zh. Karazhanov. Appl. Phys. Lett., **76** (19), 2689 (2000).
- [10] Ш.А. Мирсагатов, А.И. Султанов. Узбекский физ. журн., **5** (6), 350 (2003).
- [11] В.Г. Георгиу. Вольт-фарадные измерения параметров полупроводников (Кишинев, Изд-во Штиинца, 1987).

- [12] K. Zanio. In: *Semiconductors and Semimetals* (N.Y., Acad. Press, 1978) v. 13, p. 236.
- [13] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [14] Х.Х. Исмаилов, Ш.А. Мирсагатов, С.Х. Шомирзаев, С.А. Музафарова. Матер. конф. „Фотозлектрические явления в полупроводниках-2004“ (Ташкент, 2004) с. 110.

Редактор Л.В. Шаронова

## Dynamics of defect recharging in large-block films of $p$ -CdTe

Kh.Kh. Ismailov, J. Janabergenov, Sh.A. Mirsagatov, S.Zh. Karajanov

Physical-Technical Institute,  
700084 Tashkent, Uzbekistan