

гибридных ФПУ// XIX МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2006.

4. *Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* КМОП-микросхемы первичного преобразования для многоэлементных гибридных фотоприемных устройств// Электроника, микро- и нанoeлектроника: Сб. науч. тр./ Под ред. В. Я. Стенина. — М.: МИФИ, 2005. С. 21—26.

5. *Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* Универсальный матричный криогенный КМОП-мультиплексор формата 640x512 для гибридных фотоприемных устройств// Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Матер. II науч.-техн. конф. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2005. С. 100, 101.

6. *Кузнецов Ю. А., Шилин В. А.* Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1988. — 160 с.

7. *Деркач Ю. П., Рева В. П., Сизов Ф. Ф.* "Смешанная" концепция построения схем считывания для фокальных процессоров с ВЗН и деселекцией элементов// Прикладная физика. 2003. № 3. С. 90—96.

8. *Kim B., Yoon N., Lee H.C., Kim C-K.* Novel Concept of TDI readout circuit for LWIR detector// Proc. SPIE. 2000. V. 4028. P. 166—172.

9. *Лиш И. И.* Устройство считывания с временной задержкой и накоплением сигналов с многоэлементных ИК-фотоприемников: Пат. 2236064 С1 RU.

10. *Аветисян Г. Х., Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* Устройство считывания с временной задержкой и накоплением сигналов с многоэлементных ИК-фотоприемников// Положительное решение по заявке на изобретение № 2006127266/28(029630) от 28.07.2006 г.

11. *Деркач Ю. П., Коринец С. В., Рева В. П., Сизов Ф. Ф.* Схема считывания информации для ИК-матриц с ВЗН формата 576x6// XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2004.

12. *Yang G., Sun C., Shaw T., Wrigley C., Peddada P., Blazejewski E., Pain B.* A high dynamic-range, low-noise focal plane readout for VLWIR applications implemented with current mode background subtraction// Proc. SPIE. 1998. V. 3360. P. 42—51.

13. *Бородин Д. В., Бочков В. Д., Осипов Ю. В., Храпунов М. Л.* 128-канальная микросхема первичного преобразования с цифровой коррекцией передаточной функции в каждом канале// XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2004.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.

## CMOS multiplexer with analogue TDI mode for hybrid FPA

*G. H. Avetisyan, D. V. Borodin, Yu. V. Osipov*

Science & Production Enterprise "Pulsar", Moscow, Russia

*CMOS IC designed for low background TDI FPA and also devices with precision skimming of dark and background component of photocurrent (integrating capacitance 0,1 pF and less). In TDI IC with integrating capacitances more than units of picofarads are possible considerable reduction of IC area.*

УДК 537.311.33

## Гистерезис вольт-фарадных характеристик структур на $p\text{-Cd}_{0,27}\text{Hg}_{0,73}\text{Te}$ с широкозонным варизонным слоем на поверхности

*В. В. Васильев, Ю. П. Машуков*

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук  
г. Новосибирск, Россия

*Обнаружено, что вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структуры на основе  $p\text{-Cd}_{0,27}\text{Hg}_{0,73}\text{Te}$  демонстрируют характерный гистерезис: при прямом ходе развертки (от минуса к плюсу) ВФХ близка к обычной высокочастотной, а при обратном ходе имеется протяженная полочка, на которой емкость области пространственного заряда (ОПЗ) становится примерно в два раза больше. Для объяснения хода ВФХ рассматриваются особенности зонной структуры варизонного полупроводника.*

Слои полупроводниковых твердых растворов кадмий—ртуть—теллура (КРТ), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и имеющие на своих границах варизонные слои, в

настоящее время являются одним из основных материалов для изготовления ИК-фотоприемников [1, 2].

ВФХ МДП-структуры может дать много полезных данных относительно характеристик полупроводникового образца вблизи его поверхности. По сравнению со случаем однородного по составу полупроводника в случае варизонного твердого раствора трудности анализа ВФХ значительно увеличиваются.

В работе исследуются особенности ВФХ варизонного образца КРТ *p*-типа в виде эпитаксиальной пленки на подложке GaAs; наблюдающийся характерный гистерезис мы объясняем свойствами варизонного слоя, а не границей раздела полупроводник—диэлектрик.

### Экспериментальные подробности

Непосредственно после выращивания образцы МЛЭ КРТ получались *n*-типа с концентрацией электронов  $(1-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Конверсия в *p*-тип с концентрацией дырок  $(5-10) \cdot 10^{15}$  происходила в результате отжига в парах ртути [1]. Особенности ВФХ, рассмотренные ниже, мы наблюдали на образцах *p*-типа неоднократно. В данном случае использовали образец, имеющий следующие параметры: состав основного материала  $x = 0,27$ , его толщина — 9 мкм, в варизонном слое состав линейно возрастал к поверхности до значения 0,71 на протяжении 0,5 мкм; холловская концентрация дырок  $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижность —  $300 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Образец имел неправильную форму и площадь около  $1,5 \text{ см}^2$ . Для получения МДП-структур на образец наносили слой SiO<sub>2</sub>, полученный плазмохимическим методом в реакторе с удаленной плазмой; полевые электроды размером  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$  получали термическим испарением In через маску. Так как пленка МЛЭ КРТ располагалась на полупроводнике GaAs, контакт к базе припаивался к слою КРТ и находился где-то на периферии образца; вследствие этого базовое сопротивление, включенное последовательно с комплексным сопротивлением МДП-структуры, могло оказывать существенное влияние на измерения и его приходилось учитывать. Так как измерения ВФХ проводили с помощью измерителя импеданса VM-507, приходилось также следить за выполнением условия малости тестирующего сигнала. Тестирующая частота была выбрана равной 100 кГц. При более высоких частотах слишком существенным становилось влияние продольного сопротивления, а при более низких частотах нарушалось условие малости тестирующего сигнала. Частота развертки составляла  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$ ; вид ВФХ мало зависел от частоты, по крайней мере, в диапазоне, когда указанная величина увеличивалась в три раза или уменьшалась в 10 раз.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны ВФХ, измеренные при температуре 80 К в темноте и при освещении световым потоком от лампы накаливания с пониженным напряжением питания с интенсивностью около  $1 \cdot 10^{16} \text{ фот/см}^2 \cdot \text{с}$  с использованием техники, описанной в [3], а также измеренные при двух более высоких температурах. Так как полевой электрод был непрозрачным, фотоэффект определялся периферийными фотоэлектронами. При выбранной частоте тестирующего сигнала фаза комплексного сопротивления всего образца (включая базовое сопротивление) была везде (по модулю) не менее  $75^\circ$ . При этом условии базовое сопротивление оказывало достаточно слабое влияние на величину модуля импеданса, а также на величину его емкостной составляющей. Поэтому записанная самописцем величина  $(\omega Z)^{-1}$ , где  $\omega$  — циклическая тестирующая частота;  $Z$  — модуль импеданса, близка к емкости  $C$  МДП-структуры.

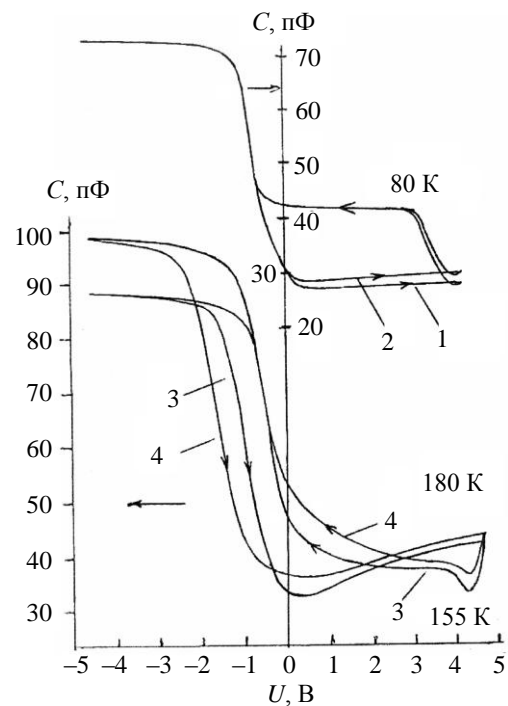


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики при трех температурах:

1, 2 — 80 К; 3 — 155 К; 4 — 180 К.

1 — темновые характеристики, 2 — при освещении

Отметим основные особенности ВФХ для температуры 80 К:

1) при прямом ходе развертки ВФХ имеет высокочастотный вид, однако при инверсии заметно некоторое возрастание емкости с увеличением напряжения;

2) в самом начале обратного хода развертки емкость немного убывает, прежде чем начать возрастать;

3) фоточувствительность наблюдается, как и должно быть, при инверсии, однако при обратном ходе на полочке она отсутствует;

4) отсутствует обычный гистерезис в области обеднения.

При температурах 155 и 180 К имеем следующее:

- резче проявляются особенности, указанные в пунктах 1 и 2;
- появляется обычный гистерезис;
- емкость обогащения возрастает.

Наиболее заметной из всех перечисленных особенностей является наличие протяженной полочки при обратном ходе развертки. Необычным также является эффект первоначального уменьшения емкости после поворота хода развертки.

Отметим прежде всего, что гистерезис, похожий на наш, может наблюдаться у однородных полупроводников при неравновесном обеднении [4]. В случае неравновесного обеднения емкость структуры становится ниже равновесной, так как не обеспечивается приток необходимого количества неосновных носителей заряда к поверхности. Это может происходить либо при высокой скорости развертки, либо при низких температурах, когда слабая генерация неосновных носителей. При прямом ходе развертки емкость стабилизируется, т. е. перестает уменьшаться за счет дополнительной, так называемой аномальной или полевой генерации. При обратном ходе возникают трудности с оттоком неосновных носителей от поверхности; это приводит к тому, что область пространственного заряда сжимается, барьер для оттока неосновных носителей заряда в объем уменьшается, емкость структуры увеличивается. В нашем случае вид ВФХ существенно отличается от того, что наблюдается при полевой генерации у однородных полупроводников, например отсутствует достаточно протяженный участок начального плавного уменьшения емкости при прямом ходе развертки.

Для объяснения хода ВФХ рассмотрим зонную диаграмму варизонной структуры [5]. На рис. 2, а кривые 1, 2 показывают начальное положение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, которое характеризует состояние, свойственное отдельным слоям структуры.

Определим длину экранирования Дебая  $L_D$ :

$$L_D = (2\epsilon\epsilon_0 kT/q^2 N_A)^{0,5}$$

Считая  $N_A = 9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $\epsilon = 18$ , имеем  $L_D = 0,038 \text{ мкм}$ , что в 13 раз меньше толщины варизонного слоя. При этом условии положение потолка валентной зоны в варизонной области будет мало отличаться

от его положения в однородной части образца, и зонная диаграмма примет вид, показанный на рис. 2, а кривыми 3, 4. Оценим максимальную толщину обедненного слоя  $\Delta z$ , который возникнет в МДП-структуре при инверсии. Будем считать, что толщина ОПЗ перестанет увеличиваться, когда на поверхности дно зоны проводимости опустится от первоначального значения до уровня Ферми  $E_F$ . Указанное изменение положения дна зоны проводимости определится электростатическим потенциалом слоя  $\Delta z$ :

$$\phi = N_A q (\Delta z)^2 / 2\epsilon\epsilon_0.$$

Вычисления дают  $\Delta z = 0,30 \text{ мкм}$ , однако полученная оценка не согласуется с экспериментальной величиной емкости.

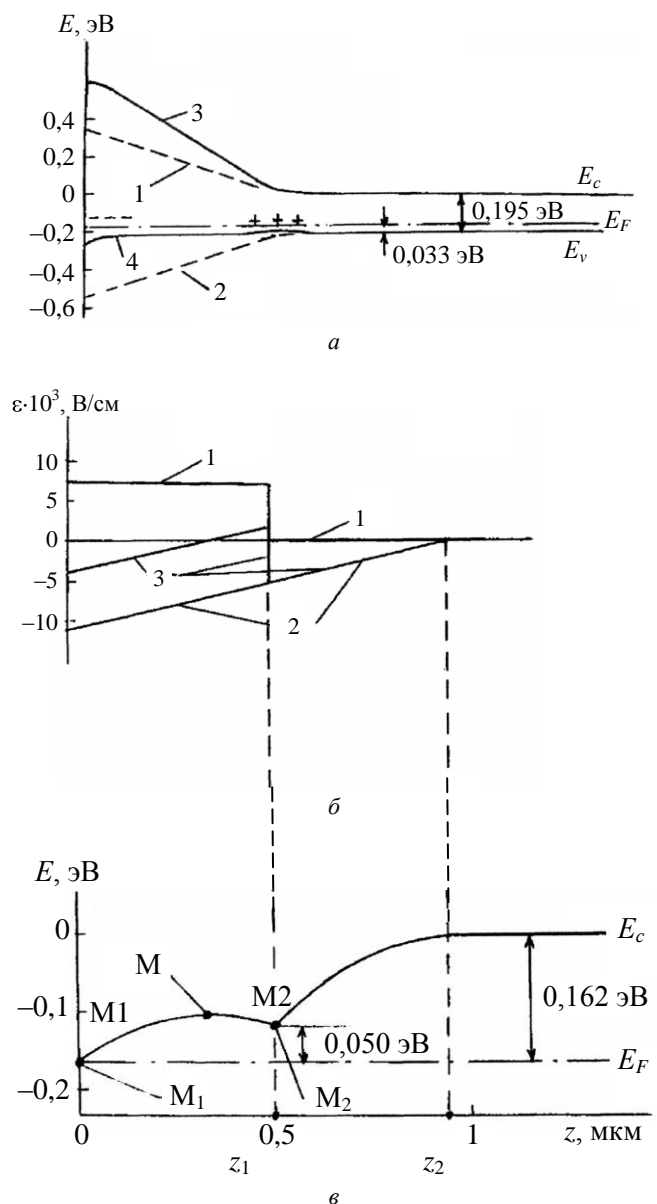


Рис. 2. Зонные диаграммы варизонной МДП-структуры: а — при нулевом смещении; б, в — при положительном заряде на полевом электроде; а: 1, 2 — начальное положение

дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, соответственно; 3, 4 — то же, в варизонном кристалле *p*-типа; *b* — диаграмма напряженности поля, действующего на электрон, находящийся в зоне проводимости: 1 — напряженность встроенного поля; 2 — напряженность электростатического поля зарядов; 3 — суммарная напряженность; *v* — диаграмма энергетического положения дна зоны проводимости для суммарной напряженности: M1, M2 — минимумы энергии; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M — характерные точки; z<sub>1</sub> — граница варизонной области, z<sub>2</sub> — граница ОПЗ

Взяв из рис. 1, *a* минимальную емкость 27 пФ и емкость диэлектрика 74 пФ, получаем Δz<sub>max</sub> = 0,94 мкм. Будем в дальнейших оценках исходить из этого значения Δz, считая, что большее значение Δz обусловлено меньшей величиной концентрации неподвижных зарядов в ОПЗ. Отметим, что вопрос о распределении концентрации подвижных носителей по толщине эпитаксиальной пленки КРТ остается в настоящее время открытым.

Таким образом, в нашем случае область сильного обеднения заходит в однородную часть. Изобразим диаграмму сил, действующих на электрон (см. рис. 2, *b*): 1 — это сила встроенного поля, она постоянна по величине вследствие линейного изменения состава по толщине и равна 7·10<sup>3</sup> В/см; 2 — электростатическая сила, она, как это следует из уравнения Пуассона, изменяется линейно от координаты, так как мы по-прежнему предполагаем, что концентрация неподвижных зарядов в ОПЗ постоянна; 3 — суммарная сила. Потенциальная энергия электрона, т. е. энергия дна зоны проводимости, определяется интегралом от суммарной силы.

Используя максимальное значение электростатической силы как подгоночный параметр, добьемся, чтобы дно зоны проводимости на поверхности совпало бы с E<sub>F</sub>. Тогда будем иметь диаграмму, показанную на рис. 2, *b* и *v*. Величина максимальной силы даст нам новую концентрацию акцепторов: N<sub>A</sub> = 1,5·10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>.

Таким образом, зонная диаграмма имеет два минимума: 1-й (M1) — обычный инверсионный минимум на поверхности, 2-й (M2) — на границе варизонной области.

Проследим, как будет в этой ситуации изменяться заряд ОПЗ под действием тестирующего сигнала. Известно, что для однородного КРТ с x = 0,27 на частоте 100 кГц ВФХ заведомо высокочастотная. Вследствие этого заряд ΔQ<sup>~</sup>, затекающий в МДП-структуру и вытекающий из нее под действием тестирующего сигнала, будет располагаться только на границе обедненной области. Вместе с этим возникает возможность перетекания электронов внутри ОПЗ из M2 в M1 и обратно, так как заряд ΔQ<sup>~</sup> создает между слоями, в которых

расположены минимумы, переменную разность потенциалов. В результате пространство между M1 и M2 окажется частично или полностью экранированным от действия поля тестирующего сигнала, и емкость структуры увеличится.

Оценим величину этого эффекта. Так как заряд Q<sub>2</sub> в M2 много меньше заряда Q<sub>1</sub> в M1, справедливо выражение:

$$Q_2 = KQ_1 \exp(-\Delta E/kT), \quad (1)$$

где ΔE = E<sub>2</sub> - E<sub>1</sub> — разность энергий в точках M2 и M1;

K — некоторый коэффициент, определяемый количеством электронных состояний в минимумах M1 и M2.

Если выделить из ΔE переменную составляющую ΔE<sup>~</sup> и считать ее малой по сравнению с kT, то для переменной составляющей заряда Q<sub>2</sub> будем иметь:

$$Q_2^{\sim} = Q_2 \Delta E^{\sim} / kT. \quad (2)$$

Учтем далее, что

$$\Delta E^{\sim} = q \Delta \phi^{\sim}, \quad (3)$$

где Δφ<sup>~</sup> — разность потенциалов, создаваемая зарядом ΔQ<sup>~</sup> между точками M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub>, а

$$\Delta \phi^{\sim} = (\Delta Q^{\sim} - Q_2^{\sim}) z_1 / A \epsilon \epsilon_0, \quad (4)$$

где A — площадь структуры.

Так как при сильной инверсии большая часть заряда МДП-структуры сосредоточена в инверсионной области, можно определить Q<sub>1</sub> через емкость диэлектрика и напряжение на структуре:

$$Q_1 = C_D U. \quad (5)$$

Комбинируя (1)–(5), получаем:

$$Q_2^{\sim} / \Delta Q^{\sim} = B / (1 + B),$$

$$\text{где } B = C_D U z_1 K q \exp(-\Delta E/kT) / A k T \epsilon \epsilon_0. \quad (6)$$

Отношение Q<sub>2</sub><sup>~</sup>/ΔQ<sup>~</sup> как раз и характеризует степень экранировки слоя между минимумами. Сделаем вычисления для нашего случая, положив K = 1, U = 4 В и взяв ΔE из рис. 2, *v*. Имеем Q<sub>2</sub><sup>~</sup>/ΔQ<sup>~</sup> = 0,23, т. е. получается заметная величина.

Итак, небольшое происходящее по линейному закону возрастание инверсионной емкости можно объяснить эффектом экранирования. Факт линейной зависимости эффекта от напряжения находится в соответствии с выражением (6). Если взять экспериментальную величину приращения емкости при напряжении 4 В и объяснить ее уменьшением эффективной толщины слоя 0z<sub>1</sub>, мы получим для относительного уменьшения этой толщины

значение 16 %, что находится в соответствии с оценкой, сделанной выше.

На эффект экранирования влияет освещение. Видно, что свет примерно в три раза увеличивает эффект экранирования. Этот факт можно объяснить следующим образом. При освещении возникает дополнительный поток электронов, идущих из M2 в M1; чтобы его скомпенсировать, барьер M1M2 для обратного потока из M1 в M2 должен уменьшиться, вследствие чего произойдет перераспределение общего количества электронов в пользу M2, что и приведет к увеличению эффекта (смотри также выражение (6)).

При повороте хода развертки сначала наблюдается небольшое уменьшение емкости. Этот эффект можно приписать ослаблению эффекта экранирования за счет уменьшения заряда  $Q_2$ , которое происходит вследствие того, что приток электронов в ОПЗ сменяется их оттоком. Затем емкость начинает возрастать и выходит на полочку. Для объяснения полочки мы будем исходить из того, что в образце кроме мелкого акцепторного уровня имеются еще донорные уровни. При нулевом напряжении на МДП-структуре, когда имеет место зонная диаграмма, показанная на рис. 2, а, кривые 3 и 4, донорные уровни свободны от электронов и суммарная плотность отрицательного неподвижного заряда близка по величине к минимально возможной. При обеднении вся зонная диаграмма будет понижаться, вследствие чего должна происходить перезарядка донорных уровней. Однако этот процесс в нашем случае оказывается сильно затрудненным из-за дефицита электронов. В широкозонной части генерация слаба, а диффузии электронов из объема препятствует высокий потенциальный барьер. Поэтому в процессе обеднения суммарная плотность неподвижных зарядов будет оставаться на низком уровне и граница обедненной области уйдет далеко. Только когда зонная диаграмма приблизится к той, что изображена на рис. 2, в, барьер для электронов, идущих из узкозонной области, исчезнет и произойдет формирование слоя свободных электронов, а также заполнение донорных уровней в ОПЗ и состояний на границе раздела с диэлектриком.

Перезарядка донорных уровней приведет к тому, что суммарная плотность неподвижного заряда в ОПЗ может оказаться в несколько раз выше первоначальной. Посмотрим, как это скажется на зонной диаграмме. Вкладом свободных электронов в формировании зонной диаграммы мы пренебрежем, поверхностные заряды вообще не влияют на электрическое поле внутри ОПЗ. На рис. 3, эквивалентном рис. 2, б, в, рассмотрен ряд зависимостей, соответствующих либо однородному распределению неподвижного заряда (1а, 2а, 3а), либо распределению, в котором имеется

слой с втрое большей концентрацией (1, 2, 3). Видно, что слой с большой концентрацией способствует появлению у поверхности потенциальной ямы, которая не исчезает при подъеме зонной диаграммы вверх. Задержка электронов в этой потенциальной яме при обратном ходе и приведет к появлению полочки, которая начнется, когда барьер для ухода электронов в объем или барьер для прихода дырок из объема станет достаточно низким.

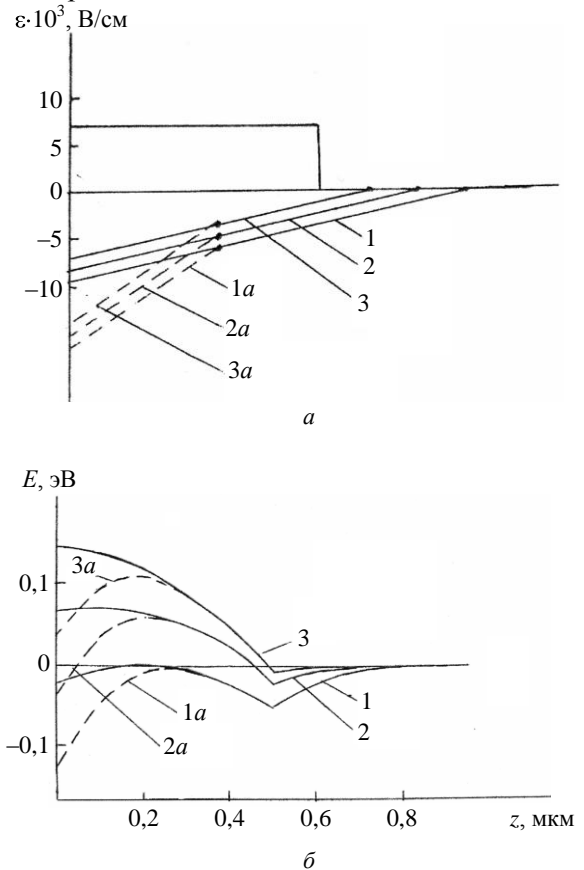


Рис. 3. Диаграмма силы (а) и зонная диаграмма для ряда случаев (б)

Протяженность полочки  $\Delta U = 0,35$  В позволяет определить величину заряда  $\Delta Q$ , скопившегося в приповерхностной области. Используя выражение (5), в которое мы вместо  $U$  подставим  $\Delta U$ , а также переходя к поверхностной плотности заряда, получаем:  $\Delta Q/Aq = 6,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Определение эффективной толщины ОПЗ для полочки, исходя из величины емкости на ней, дает значение, равное 0,4 мкм.

При повышенных температурах вид ВФХ становится более сложным. Резче проявляется эффект возрастания инверсионной емкости при прямом ходе развертки, а затем его убывание с началом обратного хода, что легко объяснить усилением эффекта экранирования за счет температурного увеличения числа электронов в M2 (см. рис. 2, в). Полочка уже не выражена так резко. Это можно объяснить тем, что, во-первых, яма у поверхности

не так прочно удерживает неравновесные электроны и, во-вторых, момент отпираания барьеров для электронов или дырок становится не столь критичным. Появляется обычный гистерезис в области обеднения, связанный, скорее всего, с захватом зарядов на границе раздела с диэлектриком или в самом диэлектрике. Еще один эффект — возрастание емкости диэлектрика с повышением температуры — хорошо известен для диэлектриков, выращенных при низкой температуре подложки [1]. Фоточувствительность становится совсем незаметной.

### Заключение

Таким образом, в данной работе на варизонных образцах CdHgTe *p*-типа обнаружен гистерезис, свойственный неравновесным ВФХ. Подробно рассмотрены две особенности:

- линейное возрастание инверсионной емкости при прямом ходе развертки и ее резкое уменьшение в начале обратного хода;
- наличие протяженной полочки при обратном ходе развертки. Первую особенность мы объясняем эффектом частичного экранирования варизонной части ОПЗ, а полочку связываем с процес-

процессом нейтрализации отрицательного заряда, скопившегося у поверхности в потенциальной яме. Созданию этой потенциальной ямы способствует перезарядка донорных уровней.

Благодарим В. Н. Овсяку за ценные замечания.

Работа поддержана в рамках комплексного интеграционного проекта СО РАН.

### Литература

1. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
2. Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 956.
3. Овсяк В. Н., Васильев В. В., Машуков Ю. П. // ФТП. 2000. Вып. 7. С. 822.
4. Руденко Т. Е., Садовничий А. А., Назаров А. Н., Лысенко В. С. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. № 6. С. 61.
5. Ковалевская Т. Е., Овсяк В. Н. // Автометрия. 2004. № 4. С. 57.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## Hysteresis of the capacitance-voltage characteristics of *p*-Cd<sub>0.27</sub>Hg<sub>0.73</sub>Te structures with wide graded gap layer on the surface

V. V. Vasilyev, Yu. P. Mashukov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Division, Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

*It is discovered, that capacitance-voltage characteristics (CVC) of p-Cd<sub>0.27</sub>Hg<sub>0.73</sub>Te MIS structures with wide graded gap layer on the surface is demonstrated a specific hysteresis: at the straight direction (from minus to plus) CVC is close to usual high-frequency one, whereas at opposite direction it has a long plateau, on which a capacitance of the space charge region (SCR) is become approximately twice large. For explanation of the CVC motion is considered the zone structure particularities of the wide graded gap semiconductor.*

\* \* \*