

УДК 621.315.595

## Исследование вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе МЛЭ CdHgTe *n*- и *p*-типа

В. Н. Овсяк, А. В. Ярцев

Институт физики полупроводников, г. Новосибирск, Россия

*Исследованы активная и реактивная составляющие вольт-фарадной характеристики (ВФХ) МДП-структуры на основе МЛЭ HgCdTe. Показано, что граница раздела HgCdTe—SiO<sub>2</sub> содержит плотность состояний  $(2—4) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и не зависит от типа проводимости и наличия варизонного слоя. Обнаружено, что в *n*-HgCdTe время жизни определяется поверхностной рекомбинацией и составляет 0,6 мкс для неваризонного образца и 1,6 мкс — для варизонного.*

Твердые растворы кадмия-ртуть-теллура (КРТ) широко используются для изготовления фотоприемников среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Структуры металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) на основе этого материала применяют в качестве активных элементов фотоприемников, а также для исследования свойств приповерхностных слоев материала. В данной работе исследованы активная и реактивная составляющая ВФХ МДП-структуры на основе МЛЭ КРТ.

### Образцы и методика эксперимента

Использовались четыре типа образцов для измерения ВФХ, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Электрофизические свойства измеряемых образцов

| № образца | Тип проводимости | $N_{doped}$ , $\text{см}^{-3}$ | $\mu$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ | $\tau$ , с          | $d$ , мкм |
|-----------|------------------|--------------------------------|---|---------------------|-----------|
| 1         | <i>n</i>         | $3,5 \cdot 10^{14}$            | 70000   | $5 \cdot 10^{-6}$   | 8         |
| 2         | <i>n</i>         | $2,25 \cdot 10^{14}$           | 70000   | $2 \cdot 10^{-6}$   | 8,9       |
| 3         | <i>p</i>         | $4,1 \cdot 10^{15}$            | 490   | $< 8 \cdot 10^{-9}$ | 8,7       |
| 4         | <i>p</i>         | $7,5 \cdot 10^{15}$            | 585   | $< 8 \cdot 10^{-9}$ | 8,2       |

Схематический разрез МДП-структуры приведен на рис. 1.

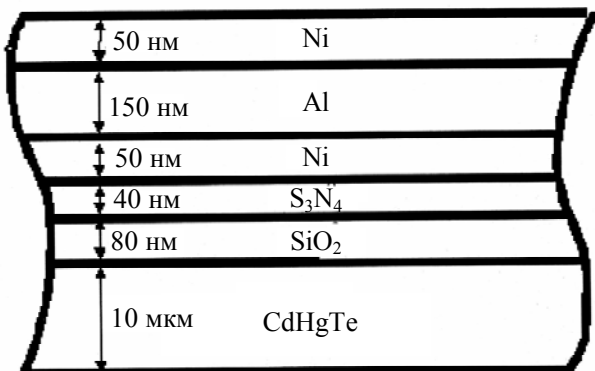


Рис. 1. Разрез МДП-структуры на основе КРТ

Эпитаксиальные слои КРТ выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из GaAs. Далее плазмохимическим методом были напылены диэлектрики SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> при 90 °С толщиной 80 и 40 нм, соответственно. Затем нанесли электрод, состоящий из последовательно напыленных слоев Ni, Al и Ni.

Все образцы имеют мольный состав  $x = 0,22$ , что соответствует краю поглощения  $\lambda = 10 \text{ мкм}$ . Образцы 1 и 3 имеют варизонный слой с линейно меняющимся с расстоянием мольным составом от  $x = 0,22$  в объеме до  $x = 0,5$  — на поверхности и толщиной 0,5 мкм.

Все полученные МДП-структуры имеют площадь  $A = 10^{-3} \text{ см}^2$ . Экспериментально измерялась активная и реактивная составляющие ВФХ с частотой модуляции 100 кГц, амплитудой переменной составляющей 2 мВ и частотой развертки  $\omega = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , при температуре  $T = 77 \text{ К}$ . Результаты измерений показаны на рис. 2.

### Результаты и обсуждение

Вычислим, какое напряжение необходимо приложить к полевому электроду для приведения образца из режима плоских зон в режим инверсии по формуле [1]:

$$U_g = w N_{leg} e / C_d + U_s.$$

Для уровня легирования образцов *n*- и *p*-типов получим  $U_g^{(n)} = 100 \text{ мВ}$  и  $U_g^{(p)} = 250 \text{ мВ}$ , соответственно. Однако по реальной ВФХ мы видим, что для приведения зон в режим инверсии нужно приложить напряжение как минимум  $dU = 1,5 \text{ В}$ , что обусловлено необходимостью зарядки поверхностных состояний. Отсюда можно получить плотность поверхностных состояний:

$$Nt = C_d (dU - U_g) / (Ae),$$

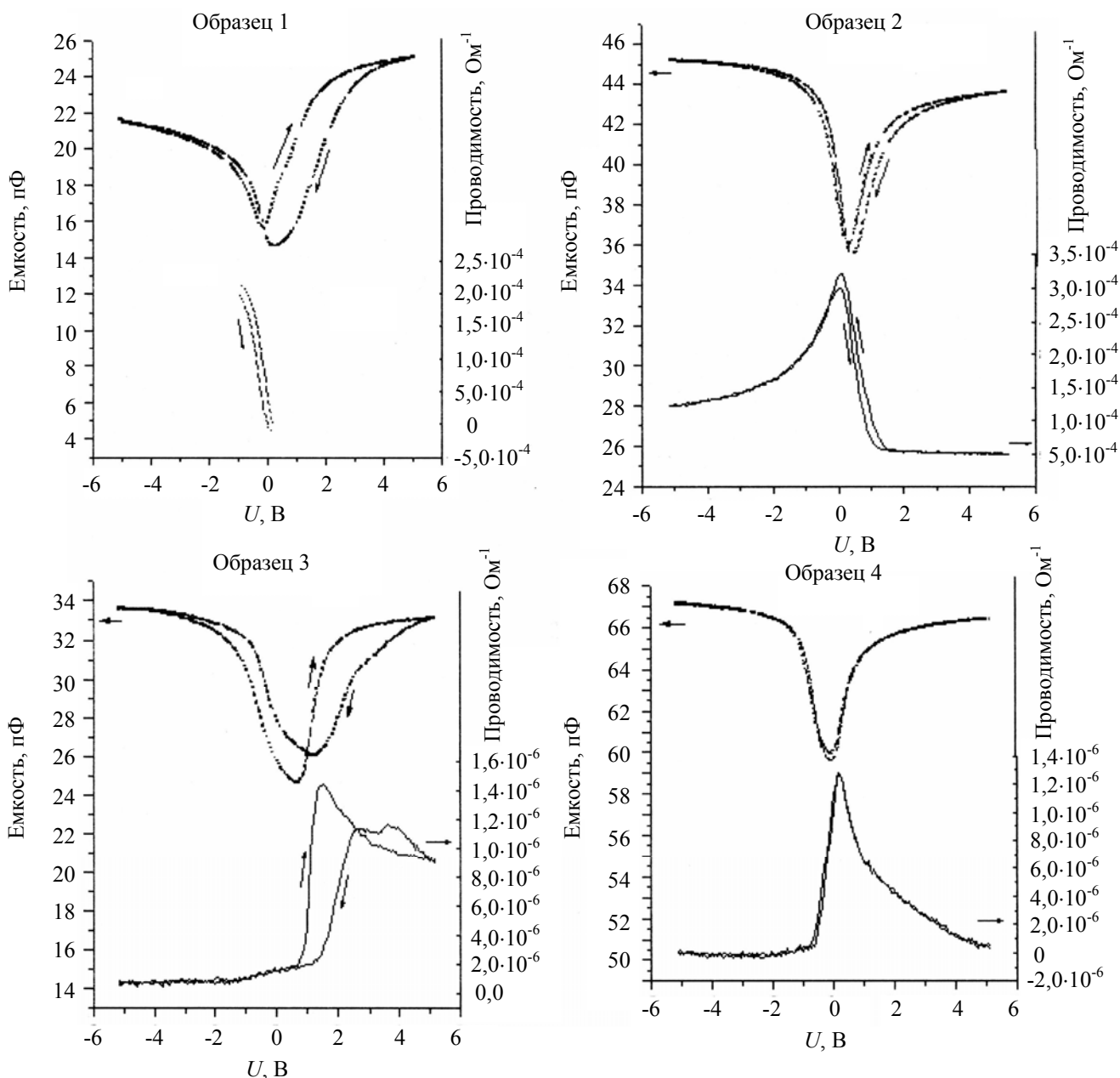


Рис. 2. Активная и реактивная составляющие ВФХ МДП-структур образцов 1—4

где  $C_d$  — емкость диэлектрика;

$A$  — площадь МДП-структуры.

Ниже приведены результаты расчета плотности поверхностных состояний для рассматриваемых образцов.

| № образца | $N_s, \text{см}^{-2}$ |
|-----------|-----------------------|
| 1.....    | $3,75 \cdot 10^{11}$  |
| 2.....    | $3,96 \cdot 10^{11}$  |
| 3.....    | $1,68 \cdot 10^{11}$  |
| 4.....    | $2,30 \cdot 10^{11}$  |

Видим, что плотность состояний не зависит от типа легирования и наличия варизонного слоя, что является свидетельством того, что качество границы раздела МЛЭ КРТ —  $\text{SiO}_2$  определяется качеством  $\text{SiO}_2$ .

На рис. 3 приведена электрическая схема замещения МДП-структуры в режиме инверсии [2]. Здесь  $C_1$  — емкость области пространственного заряда (ОПЗ);  $R_1$  — активное сопротивление, ответственное за скорость перезарядки инверсионного слоя.

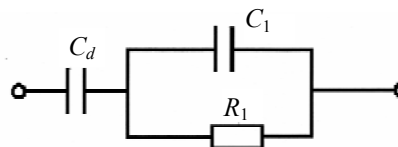


Рис. 3. Электрическая схема замещения МДП-структуры в режиме инверсии

При известных значениях  $C_1$  и  $C_d$  из активной составляющей ВФХ нетрудно найти значение  $R_1$ .

Значение активной составляющей необходимо брать в точке начала инверсии, для того, чтобы избежать эффектов в сильных электрических полях.

Существуют три основных механизма перезарядки инверсионного слоя: диффузия из объема, генерация в ОПЗ и генерация через поверхностные состояния.

Активное сопротивление, обусловленное этими механизмами, определяется через формулы (3)—(5) работы [3]:

$$\begin{aligned} R_{diff} &= L_d N_{D,A} / (n_i^2 e \mu_{e,p}); \\ R_{g-r} &= \tau U_s / (e n_i W); \\ R_s &= 2 k T / (e^2 S_0 n_i). \end{aligned} \quad (1)$$

Расчетные значения величины  $R_{diff}$  и  $R_{g-r}$  для всех типов образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Номер образца | $R_1$ , Ом | $R_{diff}$ , Ом | $R_{g-r}$ , Ом | $S_0$ , см/с | $E_{act}$ , мЭВ | $\tau$ , мкс |
|---------------|------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1             | 11         | 140             | $\infty$       | 304          | 46              | 1,6          |
| 2             | 4          | 140             | 470            | 837          | 44              | 0,6          |
| 3             | 7,6        | 24              | $\infty$       | 314          | 52              | 1,4          |
| 4             | 1,5        | 21              | 8,5            | 1500         | 53              | 0,3          |

Видим, что эти сопротивления много больше экспериментальных значений для всех типов образцов, что свидетельствует об определяющем механизме генерации-рекомбинации через поверхностные состояния. Из температурной зависимости  $R_1$  найдена энергия активации  $E_{act}$ , которая близка к половине ширины запрещенной зоны 60 мВ (см. табл. 2), что также свидетельствует о доминирующем механизме генерации через поверхностные состояния.

Учитывая, что для неваризонных образцов 2 и 4 при  $x = 0,22$  собственная концентрация  $n_i = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , из (1) можно определить скорость поверхностной рекомбинации  $S_0$ , а по нижеприведенной формуле (2) — вычислить, какое время жизни было бы в материале, если бы определяющим механизмом была рекомбинация через поверхностные состояния.

$$\tau = d / (2 S_0). \quad (2)$$

Заметим, что для варизонных образцов 1 и 3 сопротивления  $R_1$  примерно одинаковы, и их величина не может быть объяснена моделью рекомбинации на поверхности, так как собственная концентрация на поверхности  $n_i = 10^2 \text{ см}^{-2}$ . Следовательно, необходимо сделать предположение о наличии рекомбинационных центров на границе объемного и варизонного слоев.

Из табл. 2 видим, что для  $n$ -КРТ время жизни с варизонным слоем и без него близко к ранее измеренным значениям [4] (0,6 и 1,6 мкс, соответственно) с помощью релаксации фотопроводимости. Это говорит о том, что определяющим механизмом рекомбинации в  $n$ -КРТ является поверхностная рекомбинация независимо от наличия варизонного слоя. Для  $p$ -КРТ  $\tau$  много больше ранее измеренных значений, что свидетельствует о пренебрежимо малом вкладе механизма поверхностной рекомбинации во время жизни в материале.

### Заключение

Исследованы активная и реактивная составляющие ВФХ МДП-структуры на основе МЛЭ КРТ. Показано, что граница раздела CdHgTe—SiO<sub>2</sub> содержит плотность состояний  $2\text{—}4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , ее величина зависит только от качества напыления SiO<sub>2</sub>. Обнаружено, что в  $n$ -КРТ время жизни определяется поверхностной рекомбинацией и составляет 0,6 мкс для неваризонного образца и 1,6 мкс — для варизонного. Показано наличие центров генерации на стыке объемного и варизонного материалов в  $n$ - и  $p$ -МЛЭ КРТ.

### Л и т е р а т у р а

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Кн. 1/ Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.
2. Yang M. J. // Semicond. Sci. Tech. 1990. V. 5. P. 118.
3. Nemirovsky Y. // J. Vac. Sci. Tech. A. 1988. V. 6. № 4. P. 2710.
4. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

## Analysis of voltage-capacitance curve of MIS-structure based on $n$ - and $p$ -MBE HgCdTe

V. N. Ovsyuk, A. V. Yartsev

Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

*The active and reactive part of C-V curve of MIS structure based on MBE HgCdTe is analyzed. It's shown, that HgCdTe – SiO<sub>2</sub> confine has a surface states density equal to  $2\text{—}4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . This value is not depended from conductivity type and graded-band gap presence. The  $n$ -HgCdTe has surface recombination as dominant mechanism.*

