

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОМУ РАЗРЯДУ МДП КОНДЕНСАТОРА

Антоненко В. И., Ждан А. Г., Сульженко П. С.

Для современных методов спектроскопии электронных состояний в области границы раздела (ГР) полупроводник—диэлектрик характерен общий недостаток — невозможность пространственной локализации состояний, обуславливающих их наблюдаемый энергетический спектр $N_{ss}(E)$ [1]. Иными словами, известные подходы к определению функции плотности состояний $N_{ss}(E)$ не позволяют различать состояния, расположенные собственно на ГР (пограничные состояния — ПС) от объемных уровней (ОУ) в полупроводнике, выходящих к этой границе. Между тем решение такого рода задачи принципиально для спектроскопии ГР. Покажем, что метод термостимулированного разряда МДП конденсатора (ТРК) [2, 3] в его новой модификации [4] позволяет решать эту задачу. Модификация опытов с [4] состоит в том, что малосигнальная вы-

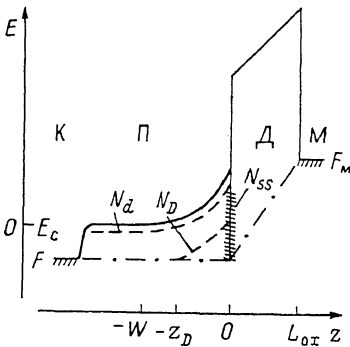


Рис. 1. Зонная диаграмма МДП структуры.

z — нормальная ГР координата, W — толщина обедненного слоя, L_{ox} — толщина диэлектрика, N_d , N_D — концентрации легирующей примеси и ОУ; E — отсчитанная от $E_c=0$ энергия; F , F_m — уровни Ферми в полупроводнике и металле. ОУ пересекает F на расстоянии z_D от ГР.

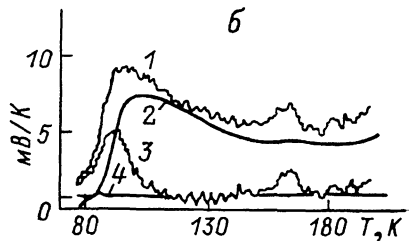
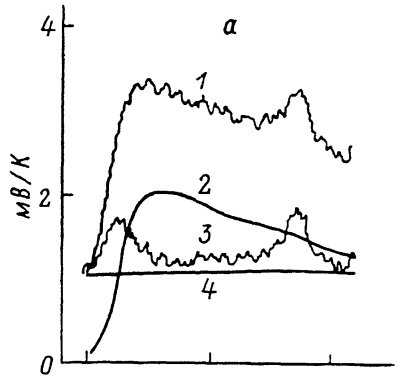


Рис. 2. Термоактивационные спектры МОП структур.

a — структура типа 1, b — структура типа 2.
1 — dV_g/dT , 2 — I/bC_{ox} , 3 — $(dV_g/dT) - (I/bC_{ox})$,
4 — $(1/q)(dF/dT)$.

сокачтотная емкость МДП структуры в процессе измерений тока ТРК поддерживается постоянной за счет изменения напряжения V_g на металлическом электроде [5]. Это эквивалентно постоянству толщины обедненного слоя W полупроводника [6]. Зонная диаграмма (рис. 1) поясняет эту ситуацию.

Вследствие постоянства W вытекающий из МДП конденсатора ток ТРК I тождественно равен производной по времени заряда, связанного на ПС и ОУ,

$$I = \frac{d}{dt} (Q_{ПС} + Q_{ОУ}), \quad (1)$$

причем $d/dt = \beta (d/dT)$, где β — скорость нагрева, T — текущая температура. С другой стороны, в случае идеального диэлектрика

$$I = \frac{\epsilon_{ox}}{4\pi L_{ox}} A \frac{d}{dt} (V_g + \varphi_E - \varphi_S), \quad (2)$$

где A — площадь структуры, $\kappa_{\text{ок}}$ и $L_{\text{ок}}$ — диэлектрическая проницаемость и толщина изолирующего слоя, $\varphi_{\text{к}}$ — контактная разность потенциалов полупроводник—полевой электрод, φ_s — потенциал ГР полупроводника. Считая, что температурная зависимость $\varphi_{\text{к}}$ определяется в основном температурным смещением уровня Ферми в полупроводнике, из (1) и (2) получаем

$$\frac{dV_g}{dT} - \frac{I}{\beta C_{\text{ок}}} = -\frac{1}{q} \frac{dF}{dT} + \frac{d\varphi_s}{dT}, \quad (3)$$

где q — элементарный заряд, $T = T_0 + \beta t$, T_0 — начальная температура опыта.

Из (3) вытекает идея разделения сигналов ТРК от ПС и ОУ. Суть ее состоит в том, что в режиме постоянной емкости при наличии в системе только ПС поверхностный потенциал φ_s в процессе термостимуляции не изменяется (т. е. $d\varphi_s/dT = 0$), поскольку неизменен объемный заряд в слое обеднения полупроводника W . При термостимулированном же опустошении ОУ заряд слоя обеднения изменяется, что при постоянстве W , поддерживаемом стабилизатором емкости, сопровождается соответствующими изменениями φ_s (т. е. $d\varphi_s/dT \neq 0$).

Из уравнения Пуассона следует

$$\frac{d\varphi_s}{dT} = \frac{2\pi q}{\kappa} z_D^2 \frac{dN}{dT}, \quad (4)$$

где κ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, z_D определено на рис. 1, а N — заполнение ОУ.

Уравнения (3) и (4) описывают ток ТРК при наличии как ПС, так и ОУ. В частности, для обусловленной ОУ составляющей тока, сравнивая с (4) очевидное выражение $I_{\text{ОУ}} = \beta q A z_D (dN/dT)$, получим

$$I_{\text{ОУ}} = 2\beta C_{\text{ок}} \frac{\kappa}{\kappa_{\text{ок}}} \frac{L_{\text{ок}}}{z_D} \frac{d\varphi_s}{dT}. \quad (5)$$

Из сказанного явствует, что задача разделения сигналов от ПС и ОУ сводится к нахождению функции $d\varphi_s/dT$. Для этого [см. уравнение (3)] необходимо найти независимо значения $I/\beta C_{\text{ок}}$, dV_g/dT и $(1/q)(dF/dT)$. Первые две величины легко измеряются экспериментально в опытах по ТРК [4], а последняя в большинстве важных случаев достаточно точно рассчитывается на основании формулы $F = kT \ln(N_a/N_c)$ при известном уровне легирования полупроводника N_a (N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости полупроводника, k — постоянная Больцмана). Затем из (3) определяется искомая зависимость $d\varphi_s/dT$. Заметим, что проведенный анализ справедлив при условиях $N_a^D \ll N_a$ и $\delta z_D \ll z_D$, $W - z_D$, где δz_D — приращение величины z_D , обусловленное температурным смещением уровня Ферми в интервале температур δT , отвечающем опустошению данного дискретного ОУ. Величину δz_D можно оценить из соотношения

$$\delta z_D = \frac{1}{2} \frac{\delta T}{T_m} \frac{|F|}{F + E_D} (W - z_D), \quad (6)$$

где

$$z_D = W - \sqrt{\frac{\kappa}{2\pi q^2 N_a} (F + E_D)}, \quad (7)$$

а T_m — температура максимума пика ТРК.

Таким образом, отличие $d\varphi_s/dT$ от нуля однозначно указывает на опустошение ОУ в пограничной области полупроводника.

Уравнения (4) и (5) показывают, что, как и ранее [2-4], температурная зависимость $I_{\text{ОУ}}$ имеет вид обычной кривой ТРК (с максимумом), определяемой параметрами ОУ. Для их нахождения по экспериментальным зависимостям $I_{\text{ОУ}}(T)$ следует использовать стандартные приемы, развитые в методике ТРК [2, 7].

На рис. 2 и в табл. 1, 2 приведены параметры образцов и экспериментальные результаты по термоактивационной спектроскопии ОУ в Si МОП структурах, полученные в соответствии с [5] по рассмотренному выше алгоритму. Зависи-

Таблица 1

№ образца	Структура	Площадь металлизации A, мм	C _{ок} , L _{ок}	Ориентация подложки	N _d , см ⁻³
1	Si-KЭФ-20 M ₀ -SiO ₂ -Si-n ⁺ -Si-Al	1.0	332 пФ, 1000 А	(100)	1.05 · 10 ¹⁴
2	Si-KЭФ-1.5 Al-SiO ₂ -Si-n ⁺ -Si-Al	0.49	173 пФ, 1000 А	(111)	1.8 · 10 ¹⁵

мости $I(T)$ и $V_g(T)$ измерялись экспериментально, а функция dV_g/dT находилась численным дифференцированием кривой $V_g(T)$. Величина стабилизируемой емкости МДП структуры $C_{ст}$ составляла 43.5 пФ. Ток представлен в единицах $I/\beta C_{ок}$ с размерностью мВ/К. Шумы на кривых I, \mathcal{E} обусловлены численным дифференцированием. Ярво выраженные пики в окрестности температур 95 и 170 К, выходящие за пределы погрешности экспериментов, свидетельствуют о наличии в системе ОУ. Результаты обработки пиков в соответствии с [2, 7] сведены в табл. 2. Полученные данные позволяют проверить выполнимость принятых в расчетах предположений. Как явствует из сопоставления данных табл. 1, 2, N_D действительно много меньше N_d . Подставляя теперь в формулы (6) и (7) известные значения параметров образца, на примере низкотемпературного пика [рис. 2, а, $\delta T = 20$ К, $T_m = 95$ К, $F = -88$ мЭВ, $\kappa_{Si} = 11.7$, $W = \frac{\kappa A}{4\pi} \times \left(\frac{1}{C_{ст}} - \frac{1}{C_{ок}} \right) = 2.2 \cdot 10^{-4}$ см] находим $z_D \approx 1.0 \cdot 10^{-4}$ см, $\delta z_D \approx 0.9 \cdot 10^{-5}$ см, т. е. действительно $\delta z_D \ll z_D$, ($W - z_D$).

Таблица 2

№ образца	T _m , К	E _D , эВ	z _D , мкм	N _D , см ⁻³	σ, см ²
1	95	0.2	1.0	7 · 10 ¹²	10 ⁻¹⁶
	170	0.43	0.35	5 · 10 ¹³	10 ⁻¹⁴
2	95	0.21	1.0	1.3 · 10 ¹⁴	10 ⁻¹⁶
	170	0.43	0.35	5 · 10 ¹⁴	10 ⁻¹⁴

Интересно отметить, что имеются сведения о наличии в Si, подвергнутом термической или радиационной обработке, ОУ — дивакансий глубиной $E_D = 0.23-0.25$ и $0.39-0.47$ эВ [8, 9]. Поэтому естественно полагать, что обнаруженные нами в Si МОП структурах ОУ могут возникать в ходе технологического цикла производства МОП структур. Сечения захвата σ на эти ОУ определены, по-видимому, впервые.

Авторы выражают признательность Е. Г. Сальману, В. Б. Сандомирскому, А. Н. Пономареву и В. Г. Приходько за полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Schulz M. — Surf. Sci., 1983, v. 132, p. 422—455.
- [2] Ждан А. Г., Сандомирский В. Б., Ожередов А. Д. — ФТП, 1968, т. 2, с. 1, с. 11—18.
- [3] Simmon J. G., Tam M. C., Tayler G. W. — Phys. Rev. B, 1973, v. 7, N 8, p. 3714—3718.
- [4] Антоненко В. И., Ждан А. Г., Минченко А. И., Сульженко П. С. — ФТП, 1986, т. 20, в. 2, с. 208—213.
- [5] Антоненко В. И., Ждан А. Г. — ПТЭ, 1986, № 4, с. 161—163.
- [6] Блад П., Ортон Дж. Б. — Зарубежн. радиоэлектрон., 1981, № 1, с. 3—50; № 2, с. 3—19.
- [7] Парфянович И. А. — ЖЭТФ, 1954, т. 26, в. 4, с. 696.
- [8] Васильев А. В., Смирнов Л. С., Шаймеев С. С. — ФТП, 1986, т. 20, в. 4, с. 737—739.
- [9] Ткачев В. Д., Макаренко Л. Ф., Маркевич В. П., Мурын Л. И. — ФТП, 1984, т. 18, в. 3, с. 526—531.