

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В СТРУКТУРАХ Si-SiO₂ МЕТОДОМ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

И. Ю. Бутусов, Ю. Н. Перин

Воронежская государственная технологическая академия
Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 08.09.2010 г.

Аннотация: рассмотрено применение метода зонда Кельвина для определения параметров токопрохождения в структурах Si-SiO₂.

Ключевые слова: параметры токопрохождения, структура Si-SiO₂, кремниевая пластина, метод зонда Кельвина.

Abstract: application of Kelvin probe technique for determination of the current transit parameters in Si-SiO₂ structures is considered.

Key words: current transit parameters, Si-SiO₂ structures, silicon plate, Kelvin probe method.

Применение метода зонда Кельвина для исследования структур Si-SiO₂ — окисленных кремниевых пластин — обусловлено тем обстоятельством, что он является неразрушающим, бесконтактным методом измерения электрических потенциалов на поверхностях изучаемых образцов. При использовании этого метода для исследования электрических свойств тонкой пленки SiO₂ на кремниевой пластине поверхность пленки предварительно заряжается в коронном разряде положительными зарядами. После этого с помощью измерительного зонда Кельвина, находящегося над поверхностью пленки, производится измерение электрического потенциала V поверхности пленки относительно кремния пластины компенсационным способом, при котором потенциал вибрирующего в вертикальном направлении (перпендикулярно к пластине) зонда равен значению V и нет тока смещения в промежутке между зондом и поверхностью пленки (электрический потенциал зонда обеспечивается энергией от внешнего источника) [1]. В тонкой пленке SiO₂ на кремниевой пластине при наличии в ней электрического поля напряженностью E , создаваемого электрическими зарядами на поверхности пленки, возникает электрический ток разряда. Этот процесс эквивалентен разряду электрического плоского конденсатора, у которого одной обкладкой является положительно заряженная поверхность пленки SiO₂ и другой обкладкой является пластина кремния. Процесс разряда описывается уравнением

$$-\varepsilon \varepsilon_0 \dot{E} = J, \quad (1)$$

$$E = \frac{V}{d}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = 3,85$ (для пленки SiO₂), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м, d — толщина пленки SiO₂, J — плотность тока разряда.

Здесь и далее точкой над символом переменной величины обозначена операция дифференцирования на времени t .

Величина плотности тока разряда, направленного перпендикулярно к поверхности пленки SiO₂, имеет две составляющие [2]

$$J = J_1 + J_2. \quad (3)$$

Величина J_1 — это плотность туннельного тока электронов сквозь потенциальный барьер высотой ϕ , который существует на границе между кремниевой пластиной и пленкой SiO₂. При выполнении условия $E \geq 5 \cdot 10^6$ В/см электроны проходят сквозь потенциальный барьер, величина J_1 определяется следующими выражениями

$$J_1 = \alpha E^2 \exp\left(\frac{-\beta}{E}\right), \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{e^3}{8\pi h \phi}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{8\pi(2m^*)^{0.5} \phi^{0.5}}{3eh}, \quad (6)$$

где h — постоянная Планка, e — заряд электрона, m^* — эффективная масса электрона при

* © Бутусов И. Ю., Перин Ю. Н., 2010

его движении в пленке SiO_2 ($m^* = 0,48m$; m — масса электрона). Величины φ и d — это параметры токопрохождения применительно к туннельной проводимости.

Из (6) следует

$$\varphi = 3,53 \cdot 10^{-7} \beta^{2/3}. \quad (7)$$

Величина плотности тока J_2 в (3) зависит от наличия в пленке SiO_2 дефектов. При их наличии электроны движутся в сторону положительно заряженной поверхности пленки, переходя от одного энергетического уровня дефекта к другому. Проводимость по дефектам — это «прыжковая» составляющая общей проводимости. При постоянной температуре

$$J_2 = \gamma E, \quad (8)$$

где γ — величина постоянная для конкретной структуры Si-SiO_2 и является коэффициентом электропроводности и параметром токопрохождения применительно к «прыжковой» проводимости.

С использованием выражений (3), (4), (8) вместо (1) имеем

$$-\epsilon\epsilon_0 \dot{E} = \alpha E^2 \exp\left(\frac{-\beta}{E}\right) + \gamma E. \quad (9)$$

Начальное условие: $E = E_0$ при $t = t_0$.

Введем новую переменную

$$y = \frac{1}{E}. \quad (10)$$

Тогда вместо (9) получаем

$$\dot{y} = p \cdot \exp(-\beta \Delta y) + q + r \Delta y, \quad (11)$$

$$p = \left(\frac{\alpha}{\epsilon\epsilon_0}\right) \exp(-\beta y_0), \quad (12)$$

$$r = \frac{\gamma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad q = r y, \quad (13)$$

$$\Delta y = y - y_0, \quad \Delta t = t - t_0. \quad (14)$$

Для начального момента времени имеем

$$\Delta t = 0, \quad \Delta C = 0, \quad y_0 = \frac{1}{E_0}, \quad \dot{y} = p + q_0. \quad (15)$$

При условии $J_1 \gg J_2$ уравнение (11) приводится к виду:

$$\dot{y} = \dot{y}_0 \cdot \exp(-\beta^* \Delta y), \quad (16)$$

$$\beta^* = \frac{\beta p - r}{\dot{y}_0}. \quad (17)$$

Из (17) следует

$$\beta = \frac{\beta_0^* + r}{p}. \quad (18)$$

Уравнения (11) и (16) совпадают при линеаризации их правых частей. Решение уравнения (16) имеет вид:

$$\exp(\beta^* \Delta y) - 1 = \beta^* p \Delta t. \quad (19)$$

Эти выражения с использованием экспериментальных данных позволяет определить численные значения величин β^* , p .

Для начального момента времени ($t=t_0$, $E=E_0$) величина коэффициента электропроводности σ_0 структуры Si-SiO_2 определяется следующим выражением

$$\sigma = \epsilon\epsilon_0 \left(\beta p - r + \frac{2\dot{y}_0}{y_0} \right), \quad (20)$$

которое следует из общего определения величины σ :

$$\sigma = \frac{dJ}{dE},$$

При применении метода Кельвина для определения значения параметров токопрохождения обычно измеряется одиннадцать значений потенциалов V_k на поверхности пленки SiO_2 через равные промежутки времени τ ; после этого с использованием (2) и (10) определяются значения величин E_k и y_k . Массив величин y_k обрабатывается по методу наименьших квадратов. В результате этого определяются численные значения коэффициентов полинома

$$y(t) = C_0 + C_1 t + \dots + C_5 t^5. \quad (21)$$

При этом центральное значение времени определяется в качестве начального, тогда

$$t_k = k\tau, \quad k = 0, (\pm) 1, \dots, (\pm) 5;$$

и из (21) следует

$$\Delta y_k = (k\tau)C + (k\tau)^2 C_2 + \dots + (k\tau)^5 C_5,$$

$$y(t) = y_0 + \Delta y_{(c)}, \quad y_0 = y(0) = C_0, \quad \dot{y}_0 = C_1.$$

Для дальнейшего анализа экспериментальных данных используются численные значения следующих величин:

$$\tau, y_0, \dot{y}_0, t_4 = 4\tau, t_{-4} = -4\tau, \Delta y_4, \Delta y_{-4}.$$

Численное значение величины β^* определяется из уравнения, которое следует из (19) и которое легко решается методом подбора:

$$\exp(\beta^* \Delta y_4) - 1 = (1 - \exp(\beta^* \Delta y_{-4}))^{-1}. \quad (22)$$

После этого определяются численные значения следующих величин: p — из (19), q — из

(15), r — из (13), p — из (18), α — из (12), φ — из (7), σ_0 — из (20).

Ниже приведены результаты исследования окисленной пластины кремния марки КДБ-12 с толщиной пленки SiO₂ $d = 430 \cdot 10^{-10}$ м и с ориентацией $\langle 100 \rangle$ кристаллической решетки относительно поверхности.

В процессе исследования было произведено одиннадцать измерений электрического потенциала на поверхности пленки SiO₂ с постоянным шагом по времени 105 с на интервале 1050 с. В результате применения метода наименьших квадратов были получены следующие результаты:

$$y_0 = 16,84838 \cdot 10^{-10} \text{ м/В}; \dot{y}_0 = 4,7641 \cdot 10^{-14} \text{ м/(В·с)};$$
$$\Delta y_2 = 0,08913 \cdot 10^{-10} \text{ м/В}; \Delta y_{-2} = -0,11355 \cdot 10^{-10} \text{ м/В};$$
$$y_4 = 0,16252 \cdot 10^{-10} \text{ м/В}; y_{-4} = -0,27018 \cdot 10^{-10} \text{ м/В}.$$

С использованием этих данных получено:

$$E_0 = 5,94 \cdot 10^6 \text{ В/см}; \beta^* = 2,40 \cdot 10^{10} \text{ В/м},$$
$$\beta = 2,42 \cdot 10^{10} \text{ В/м};$$

$$p = 0,47329 \cdot 10^{-13} \text{ м/(В·с)};$$

Бутусов И. Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Воронежская государственная технологическая академия
E-mail: phys@vgta.vrn.ru
Tel.: +7 (4732) 55-63-47

Перин Ю. Н., ассистент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет
E-mail: kof-134@phys.vsu.ru
Tel.: (4732) 208-281

$$q = 0,00342 \cdot 10^{-13} \text{ м/(В·с)};$$

$$\tau = 2,02 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}; \varphi = 2,9678;$$

$$\alpha = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ (В·м)}^{-1};$$

$$\gamma = 6,9 \cdot 10^{-18} \text{ (Ом·м)}^{-1}; \tau_0 = 4,4 \cdot 10^{-14} \text{ (Ом·м)}^{-1}.$$

Таким образом, получены численные значения всех параметров токопрохождения для исследованной структуры Si-SiO₂. Численное значение высоты потенциального барьера хорошо согласуется с результатами, получаемыми другими методами.

Величина коэффициента электропроводности для «прыжковой» составляющей проводимости на четыре порядка меньше общей величины коэффициента электропроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарких Ю. С. Контроль результатов химических обработок кремния бесконтактными методами / Ю. С. Жарких, А. Д. Евдокимов // Микроэлектроника. — 1980. — № 1. — С. 82—85.

2. Барабан А. П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии / А. П. Барабан, В. В. Булавинов, П. П. Копоров. — Л.: Изд-во Ленинградского государственного университета. — 1988. — 304 с.

Butusov I. Yu., reader of chair of physics, Voronezh State Academy of Technology
E-mail: phys@vgta.vrn.ru
Tel.: +7 (4732) 55-63-47

Perin Yu. N., reader of chair of general physics, Voronezh State University
E-mail: kof-134@phys.vsu.ru
Tel.: +7 (4732) 208-281