УДК 621.315.592

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СТРУКТУР $Si{-}SiO_2$ МЕТОДОМ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

И. Ю. Бутусов*, М. В. Гречкина

Воронежский государственный университет
**Воронежская государственная технологическая академия*

Рассмотрен метод определения коэффициентов электропроводности в плоских структурах $Si{-}SiO_2$ при измерении потенциалов на поверхности пленки SiO_2 зондом Кельвина.

Изучение электропроводности структур $Si{-}SiO_2$ позволяет определить коэффициенты электропроводности для различных механизмов проводимости. Результаты таких исследований имеют научное и практическое значение. В качестве структур $Si{-}SiO_2$ рассматриваются тонкие пленки SiO_2 на кремниевых пластинах, применяемых при производстве полупроводниковых приборов. При наличии в пленке SiO_2 электрического поля, когда свободная поверхность пленки имеет положительный потенциал по отношению к кремнию, электроны туннелируют из кремния через пленку SiO_2. При величине напряженности электрического поля E, которая больше значения $5{\cdot}10^6$ В/см, электроны проходят через потенциальный барьер высотой φ_B, существующий в структуре $Si{-}SiO_2$. Зависимость величины плотности туннельного тока I_F от величины напряженности E электрического поля в пленке SiO_2 следующая [1]:

$$I_F = \alpha E^2 \exp(b/E), \qquad (1)$$

где

$$\alpha = e^3/(8\pi h \varphi_B), \qquad (2)$$

$$\beta = [8\pi(2m)^{1/2}\varphi_B{}^{3/2}]/(3eh), \qquad (3)$$

e — заряд электрона, m — эффективная масса электрона при движении в пленке SiO_2, h — постоянная Планка.

Из (3) следует

$$\varphi_B = 3{,}536 \cdot 10^{-7}\beta^{2/3}. \qquad (4)$$

Ток, соответствующий указанному механизму проводимости, называется туннельным по Фаулеру—Нордгейму.

При наличии в пленке SiO_2 электрического поля через нее кроме тока с плотностью I_F могут протекать и другие токи. Эти токи обусловлены прохождением электронов через пленку SiO_2 при наличии в ней дефектов; электроны проходят от одного электронного уровня дефекта к другому. В случае диэлектрика с широкой запрещенной зоной и значительным числом дефектов при не слишком большой температуре основной вклад в процессы переноса дает перенос по хаотически расположенным дефектам в запрещенной зоне. Проводимость по дефектам называют прыжковой проводимостью и при постоянной температуре соответствующая плотность электрического тока I_R через пленку SiO_2 пропорциональна напряженности электрического поля E в ней [1]:

$$I_R = \gamma E. \qquad (5)$$

Прыжковая проводимость имеет характеристику омического вида и постоянная величина γ — это коэффициент электропроводности, соответствующий рассматриваемому механизму проводимости.

При неразрушающем методе исследования проводимости тонкой пленки SiO_2 на кремниевой пластине с применением зонда Кельвина поверхность пленки предварительно заряжается (в коронном разряде) положительным зарядом, который потом с течением времени уменьшается из-за существования в пленке SiO_2 механизмов переноса электрических зарядов. Уменьшение заряда приводит к уменьшению величины потенциала поверхности пленки относительно потенциала пластины кремния, который принят за нуль. Значения потенциалов поверхности пленки V_{ki}, измеряются в последовательные моменты времени t_i специальным прибором — измерителем потенциала поверхности (ИПП) с помощью вибрирующего зонда, находящегося на небольшом расстоянии над поверхностью пленки SiO_2 [2]. Интервал времени $\tau = t_{i+1} - t_i$ между соседними измерениями постоянен. Для анализа экспериментальных данных обычно используется одиннадцать последовательных значений V_{ki} ($i = 1, 2, ..., 11$).

Тонкая диэлектрическая пленка SiO_2 на кремниевой пластине может рассматриваться в качестве конденсатора. Одной обкладкой этого конденсатора является положительно заряженная свободная поверхность пленки SiO_2, второй обкладкой является пластина кремния. Толщина d диэлектрического слоя в конденсаторе — толщина пленки — значительно меньше геометрических размеров (длина, ширина, диаметр) поверхности этого конденсатора. Уменьшение величины V_k на поверхности пленки SiO_2 приводит к уменьшению напряженности электрического поля E в пленке. В соответствии с такой моделью изменение (уменьшение) величины E описывается следующим уравнением:

$$-\varepsilon\varepsilon_0 \dot{E} = I_F + I_R, \tag{6}$$

где $E = V_k / d$, $\varepsilon = 3,85$ (для пленки SiO_2), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; точкой обозначена первая производная величины E по времени, знак «−» учитывает уменьшение во времени величины E.

С учетом (1) и (5) уравнение (6) принимает вид:

$$-\varepsilon\varepsilon_0 \dot{E} = \alpha E^2 \exp(-\beta / E) + \gamma E. \tag{7}$$

Начальное условие: $E = E_0$ при $t = t_0$. Введем величины $y = 1/E$, $\Delta y = y - y_0$, $\Delta t = t - t_0$, тогда вместо (7) получим

$$\dot{y} = p \exp(-\beta \Delta y) + q + r \Delta y, \tag{8}$$

где

$$p = (\alpha / \varepsilon\varepsilon_0) \exp(-\beta y_0), \tag{9}$$

$$q = r y_0, r = \gamma / \varepsilon\varepsilon_0, \tag{10}$$

$$p + q = \dot{y}_0. \tag{11}$$

Начальное условие: $y = y_0$ при $t = t_0$.

Уравнение (8) не имеет точного решения в элементарных функциях. Далее получим две формы для приближенного решения уравнения (8) с учетом того обстоятельства, что при проведении измерений выполняется условие $\Delta y / y_0 < 1$.

Первая форма решения получается на основе следующего разложения $\exp(-\beta \Delta y) = 1 - \beta \Delta y + \ldots$. Тогда уравнение (8) приводится к виду

$$\dot{y} = \dot{y}_0 \exp(-\beta_э \Delta y), \tag{12}$$

где

$$\beta_э = (\beta p - r) / \dot{y}_0. \tag{13}$$

Из (12) следует

$$\Delta y \beta_э = \ln[1 + (\beta p - r) \Delta t]. \tag{14}$$

Отсюда можно определить значения $\beta_э$ и $(\beta p - r)$ с использованием величины y_i, которые определяются по значениям V_{ki}: $E_i = V_{ki} / d$, $y_{ki} = 1 / E_i$. После обработки величин y_{ki} по методу наименьших квадратов обычно получается одиннадцать значений $y_i = 1, 2, \ldots, 11$ через равные промежутки времени τ; в качестве центрального значения используется значение y_6 и t_6, они же выбираются в качестве начальных значений уравнения (8). Для расчетов используются значения $\Delta y_2 = y_2 - y_6$, $\Delta y_{10} = y_{10} - y_6$, $\Delta t_2 = t_2 - t_6 = -4\tau$, $\Delta t_{10} = t_{10} - t_6 = 4\tau$.

Из (14) получаем:

$$\exp(\Delta y_{10} \beta_э) - 1 = (\beta p - r) 4\tau, \tag{15}$$

$$1 - \exp(\Delta y_2 \beta_э) = (\beta p - r) 4\tau, \tag{16}$$

$$\frac{\exp(\Delta y_{10} \beta_э) - 1}{1 - \exp(\Delta y_2 \beta_э)} = 1. \tag{17}$$

Из алгебраического уравнения (17) определяется численное значение величины $\beta_э$. Из (15) или (14) с заданной величиной t определяется значение величины $(\beta p - r)$. Из (13) вычисляется значение величины $\dot{y}_6$, которое определяется и после обработки по наименьшим квадратам величин y_{ki}.

Другое представление для решения уравнения (8) имеет вид

$$(1 - 0,5 r \Delta t) \Delta y \beta = \\ = \ln[\exp z + \beta p (\exp z - 1) / (\beta q)], \tag{18}$$

где $z = \beta q \Delta t$.

Можно показать, что это выражение и выражение (14) достаточно хорошо совпадают, различие между ними проявляются (при разложении по степеням Δt) в членах, содержащих Δt^3.

Для дальнейших преобразований используем представление $\exp z = 1 + z + 0,5z^2$. Тогда выражение (18) принимает вид:

$$\exp\beta\Delta y = 1 + \beta\dot{y}_6\Delta t + 0,5\beta\dot{y}_6(\beta y_6 + 1)\Delta t^2. \quad (19)$$

Здесь в качестве начальных величин приняты t_6, y_6 и соответственно $\dot{y}_6$. Для расчетов используются значения $\Delta y_2 = y_2 - y_6$, $\Delta y_4 = y_4 - y_6$, $\Delta y_{10} = y_{10} - y_6$, $\Delta t_2 = t_2 - t_6 = -4\tau$, $\Delta t_4 = t_4 - t_6 = -2\tau$, $\Delta t_{10} = t_{10} - t_6 = 4\tau$.

Из (19) получаем:

$$\exp\beta\Delta y_2 = 1 - 4\beta\dot{y}_6\tau + 8\beta\dot{y}_6(\beta y_6 + 1)r\tau^2,$$

$$\exp\beta\Delta y_4 = 1 - 2\beta\dot{y}_6\tau + 2\beta\dot{y}_6(\beta y_6 + 1)r\tau^2,$$

$$\exp\beta\Delta y_{10} = 1 + 4\beta\dot{y}_6\tau + 8\beta\dot{y}_6(\beta y_6 + 1)r\tau^2.$$

Отсюда следует:

$$\exp\beta\Delta y_{10} - \exp\beta\Delta y_2 = 8\beta\dot{y}_6\tau, \quad (20)$$

$$3 + \exp\beta\Delta y_{10} - 4\exp\beta\Delta y_4 = 12\beta\dot{y}_6\tau, \quad (21)$$

$$\frac{3 + \exp\beta\Delta y_{10} - 4\exp\beta\Delta y_4}{\exp\beta\Delta y_{10} - \exp\beta\Delta y_2} = 1,5. \quad (22)$$

Из алгебраического уравнения (22) по значениям $\Delta y_2, \Delta y_4, \Delta y_{10}$ вычисляется значение β и из (4) значение φ_B; после этого из (20) или (21) определяется величина $\dot{y}_6$.

Ниже приведены экспериментальные данные, полученные в результате измерений с применением зонда Кельвина для одной пластины кремния марки КДБ-12 с ориентацией кристаллической решетки относительно поверхности <100>. Окисление проведено в производственных условиях по технологии термического пирогенного окисления при T = 1000 °C в течение 19 мин. Толщина пленки SiO$_2$ $d = 1080\cdot10^{-10}$ м (0,108 мкм). Интервал времени измерения равен 200 с, центральная точка t_6 = 100 с. Ошибки при измерении потенциалов не превышают 0,08 %. Экспериментальные данные и результаты их обработки по методу наименьших квадратов представлены в таблице; $\tau = 20$ с, $\dot{y}_6 = 2,90340\cdot10^{-13}$ м/(В·с). Из этих данных следует $\Delta y_{10} = 0,21023\cdot10^{-10}$ м/В, $\Delta y_4 = -0,12846\cdot10^{-10}$ м/В, $\Delta y_2 = -0,27102\cdot10^{-10}$ м/В.

Из (17) получаем $\beta_э = 1,061\cdot10^{10}$ В/м, $\beta p - r = 3,12378$ с$^{-1}$ и $\dot{y}_6 = (\beta p - r)/\beta_э = 2,94419\cdot10^{-13}$ м/(В·с) (отличие от данных по методу наименьших квадратов составляет 1,4 %).

Таблица

N	t, с	V_k, В	y, 10^{-10} м/В
1	0	64,16	16,83103
2	20	63,85	16,91373
3	40	63,57	16,98960
4	60	63,31	17,05629
5	80	63,07	17,12392
6	100	62,84	17,18475
7	120	62,64	17,24212
8	140	62,45	17,29439
9	160	62,27	17,34371
10	180	62,08	17,39498
11	200	61,92	17,44205

Из (22), (4) и (21) получаем $\beta = 2,401\cdot10^{10}$ м/В, $\varphi_B = 2,94$ эВ и $\dot{y}_6 = 2,98301\cdot10^{-13}$ м/(В·с).

Определение величин r и γ производится с помощью соотношений (13) и (10) (с заменой $\dot{y}_0$ на $\dot{y}_6$): $\gamma = \varepsilon\varepsilon_0(\beta - \beta_э)\dot{y}_6/(\beta y_6 + 1) = 322,28\cdot10^{-17}$ (ом·м)$^{-1}$. Суммарная величина коэффициента электропроводности определяется выражением $\sigma = dI/dE$. На основании этого из (7) и (8) для суммарной величины коэффициента электропроводности получаем следующее значение: $\sigma = \varepsilon\varepsilon_0[(\beta p - r) + 2\dot{y}_6/y_6] = 11811\cdot10^{-17}$ (ом·м$^{-1}$) (E_6 = 5,813·10^6 В/см). Коэффициент электропроводности для прыжкового механизма проводимости составляет 2,73 % от суммарного значения коэффициента электропроводности. Такой большой вклад прыжковой составляющей в общую составляющую проводимости можно объяснить тем обстоятельством, что для анализа был выбран образец структуры Si–SiO$_2$, полученный после длительного простоя оборудования. Таким образом, изложенный метод дает возможность удовлетворительно определять высоту потенциального барьера в структурах Si–SiO$_2$, показатели проводимости и вклада прыжковой проводимости в общую проводимость плоских структур Si–SiO$_2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. — 456 с.

2. *Бутусов И.Ю., Крячко В.В., Лобов И.Е., Котов В.В.* // Электронная промышленность. — 1994. — № 4—5. — С. 104—105.