

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА СТРУКТУР Si–SiO₂ МЕТОДОМ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

И. Ю. Бутусов, Е. А. Татохин, Е. А. Тутов*

*Воронежский государственный университет
Воронежская государственная технологическая академия

Рассмотрено применение метода зонда Кельвина для исследования электрического разряда структур Si–SiO₂. Разработан метод анализа результатов измерений. Проведено исследование и определены значения электрических параметров двух окисленных кремниевых пластин.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве структур Si–SiO₂ рассматриваются окисленные кремниевые пластины, применяемые в производстве полупроводниковых приборов. Для исследования электрических свойств тонких пленок SiO₂, которые образованы на пластинах кремния в результате технологических процессов, использован метод зонда Кельвина. При применении этого метода поверхность пленки SiO₂ предварительно заряжается в коронном разряде положительными электрическими зарядами и на заряженной поверхности создается положительный потенциал относительно кремниевой пластины. Измерение этого потенциала производится компенсационным методом с помощью специально созданного прибора — измерителя потенциалов поверхности (ИПП). Прибор оснащен зондом, который устанавливается над поверхностью пленки SiO₂ и вибрирует в направлении, перпендикулярном к поверхности. На зонд от ИПП подается потенциал V . Если в зазоре между торцом зонда и поверхностью напряженность электрического поля не равна нулю, то через этот зазор течет ток смещения. В момент времени, когда потенциал V оказывается равным потенциалу поверхности, ток смещения становится равным нулю и величина V фиксируется прибором [1, 2]. Метод измерений с зондом Кельвина является неразрушающим. Результатом измерений является ряд значений V_p , которые образуют монотонно убывающую во времени последовательность. Для анализа этой информации с целью определения значений электрофизических параметров плен-

ки SiO₂ нужны аналитические методы и специальная методика обработки результатов измерений.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Уменьшение со временем потенциала поверхности происходит потому, что в пленке SiO₂ существуют механизмы переноса электрических зарядов в направлении, перпендикулярном к поверхности. Причиной движения зарядов является электрическое поле в пленке SiO₂, созданное зарядами на поверхности.

В сильных электрических полях ($E > 10^6$ В/см) при комнатной температуре электроны из кремния переходят в пленку SiO₂ через потенциальный барьер высотой φ , существующий в структуре Si–SiO₂ [3]. Зависимость величины плотности тока I_F (ток Фаулера—Нордгейма при переходе электронов через потенциальный барьер) от величины напряженности электрического поля E в пленке SiO₂ следующая:

$$I_F = \alpha E^2 \exp(-\beta / E), \quad (1)$$

где

$$\alpha = e^3 / (8\pi h \varphi), \quad (2)$$

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

e — заряд электрона, m — эффективная масса электрона при движении в пленке SiO₂, h — постоянная Планка.

Из (3) следует

$$\varphi = 3,535 \cdot 10^{-7} \beta^{2/3}. \quad (4)$$

При наличии дефектов в пленке SiO₂ возможна прыжковая проводимость [4]. В этом случае электроны продвигаются, переходя от одного электронного уровня дефекта к другому. Величина плотности тока I_R при прыжковой

© Бутусов И. Ю., Татохин Е. А., Тутов Е. А., 2007

проводимости пропорциональна величине напряженности электрического поля в пленке SiO₂:

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

Прыжковая проводимость имеет характеристику омического вида; величина γ — коэффициент электропроводности этого механизма проводимости.

Уменьшение с течением времени потенциала поверхности V при наличии токов I_F и I_R , эквивалентно разряду плоского электрического конденсатора одной обкладкой которого является положительно заряженная поверхность пленки, другой обкладкой служит пластина кремния. Толщина d пленки SiO₂ — это толщина диэлектрического слоя в этом конденсаторе. При суммарной плотности тока $I_F + I_R$ разряд конденсатора описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\epsilon \epsilon_0 \dot{E} = \alpha E^2 \exp(-\beta / E) + \gamma E, \quad (6)$$

где $\epsilon = 3,85$ (для пленки SiO₂), $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м, $E = V / d$. Точкой обозначено дифференцирование по времени, знак «-» указывает на уменьшение величины E . Начальное условие $E = E_0$, $t = t_0$. Величины α, β, γ являются параметрами уравнения (8), которые связаны с электрофизическими параметрами структуры Si-SiO₂. Задача заключается в определении их значений с использованием экспериментальных данных — значений V . Для решения этой задачи надо решить уравнение (6). С этой целью введем величины $y = 1 / E$, $y_0 = 1 / E_0$, $\Delta y = y - y_0$, $\Delta t = t - t_0$. Тогда вместо (6) получим:

$$\dot{y} = p \exp(-\beta \Delta y) + q + r \Delta y, \quad (7)$$

где $p = \alpha / (\epsilon \epsilon_0) \cdot \exp(-\beta y_0)$, $r = \gamma / (\epsilon \epsilon_0)$, $q = r y_0$, $\dot{y}_0 = p + q$.

Начальное условие $y = y_0$, $t = t_0$.

Решение этого уравнения может быть представлено в двух видах:

$$\begin{aligned} \beta \Delta y (1 - 0,5 r \Delta t) &= \\ &= \ln[1 + \beta \dot{y}_0 \Delta t (\exp(u) - 1) / u], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \beta \Delta y (1 - 0,5 r \Delta t) &= \\ &= \ln[1 + \beta p \Delta t (1 - \exp(-u)) / u] + u, \end{aligned} \quad (9)$$

где $u = \beta q \Delta t$ является малой величиной ($|u| < 0,32$).

Для практического применения преобразуем эти выражения. Вместо (8) и (9) получаем соответственно:

$$\exp(\beta \Delta y) - 1 = \beta \dot{y}_0 \Delta t / [1 - 0,5(\beta y_0 + 1)r \Delta t], \quad (10)$$

$$\Delta y / \Delta t = \dot{y}_0 (1 + 0,5 \beta q \Delta t) / [1 + 0,5(\beta \dot{y}_0 - r) \Delta t]. \quad (11)$$

Эти выражения получены с использованием следующих приближенных представлений:

$$\exp(u) = (1 + 0,5u) / (1 - 0,5u),$$

$$\ln(1 + x) = x / (1 + 0,5x).$$

При $|u| < 0,32$ и $|x| < 0,32$ ошибка не превышает 0,28 %. Выражение (11) следует применять при больших скоростях разряда.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При выполнении измерений определяется последовательно одиннадцать значений V_i через равные промежутки времени τ . Среди этих значений выбирается центральное (с порядковым номером «6») и соответствующее значение времени t , которые становятся, таким образом, начальными условиями для уравнений (6) и (7). После этого исходными данными для выполнения анализа результатов измерений являются следующие значения: $V_{-5}, V_{-4}, V_{-3}, V_{-2}, V_{-1}, V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ и $t_{-5}, t_{-4}, t_{-3}, t_{-2}, t_{-1}, t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$. При таком выборе начальных условий в расчетах по методу наименьших квадратов уменьшаются ошибки, упрощаются формулы. Количество точек может быть и больше. Практически установлено, что достаточно одиннадцати. Для каждого момента времени t_i определяются значения $E_i = V_i / d$, $y_{i0} = 1 / E_r$. После этого значения y_{i0} обрабатываются по методу наименьших квадратов и определяется функциональная зависимость $\Delta y = f(\Delta t)$ в виде полинома пятой степени и определяются значения y_0, \dot{y}_0 . С использованием этого полинома вычисляются все значения y_i . В дальнейших расчетах используются значения $\Delta t_2 = t_2 - t_0$, $\Delta t_{-2} = t_{-2} - t_0$, $\Delta t_4 = t_4 - t_0$, $\Delta t_{-4} = t_{-4} - t_0$ ($\Delta t_2 = 2\tau$, $\Delta t_{-2} = -2\tau$, $\Delta t_4 = 4\tau$, $\Delta t_{-4} = -4\tau$) и $\Delta y_2 = y_2 - y_0$, $\Delta y_{-2} = y_{-2} - y_0$, $\Delta y_4 = y_4 - y_0$, $\Delta y_{-4} = y_{-4} - y_0$.

Следующий этап анализа основан на применении выражений (10) и (11). Выражение (10) преобразуется в следующие уравнения:

$$(N_2 + M_2) / (N_4 + M_4) = 2, \quad (12)$$

$$M_2 / N_2 = [1 + (\beta y_0 + 1)r\tau] / [1 - (\beta y_0 + 1)r\tau], \quad (13)$$

где $(k = 2, 4)$, $N_k = 1 / [\exp(\beta \Delta y_k) - 1]$, $M_k = 1 / [1 - \exp(\beta \Delta y_{-k})]$.

Алгебраическое уравнение (12) служит для определения значения β и ϕ согласно (4). После определения значения β с помощью

выражения (13) вычисляется значение r и после этого q и p .

Выражение (11) используется при быстром разряде структур Si-SiO₂, что указывает на значительный вклад прыжковой проводимости. Запишем (11) в следующем виде:

$$Z = (1 + A\Delta t)/(1 + B\Delta t), \quad (14)$$

где

$$A = 0,5\beta q, \quad B = 0,5(\beta\dot{y}_0 - r), \quad Z = \Delta y(\dot{y}_0\Delta t). \quad (15)$$

Отсюда следует

$$\left. \begin{aligned} z_4 + z_4\Delta t_4 B &= 1 + \Delta t_4 A, \\ z_{-4} - z_{-4}\Delta t_4 B &= 1 - \Delta t_4 A, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где

$$z_4 = \Delta y_4 / (\dot{y}_0\Delta t_4), \quad z_{-4} = \Delta y_{-4} / (\dot{y}_0\Delta t_{-4}). \quad (17)$$

Из (16) получаем

$$\left. \begin{aligned} A &= [2z_4 \cdot z_{-4} - (z_4 + z_{-4})] / [\Delta t_4(z_{-4} - z_4)], \\ B &= [z_4 + z_{-4} - 2] / [\Delta t_4(z_{-4} - z_4)]. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

После исключения из выражений (15) для A и B величины r , получаем следующее квадратное уравнение:

$$(\beta y_0)^2 + 2B \frac{y_0}{\dot{y}_0} (\beta y_0) - 2A \frac{y_0}{y_0} = 0, \quad (19)$$

решение его дает значение β :

$$\beta = \frac{B}{\dot{y}_0} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2Ay_0}{B^2\dot{y}_0}} \right]. \quad (20)$$

Последовательность расчетов следующая. С помощью выражений (17) вычисляются z_4 и z_{-4} , далее из (18) определяются значения A и B , после этого из (20) определяется значение β . На основе вычислительных значений A и B определяются значения r и q , после этого определяется значение p_i ; согласно (4) определяется значение φ .

Величина электропроводности пленки SiO₂ определяется из отношения \dot{E} / \dot{E} ; при использовании переменной y она равна

$$\delta = \varepsilon\varepsilon_0(\beta p - r + 2\dot{y}_0 / y_0). \quad (21)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Здесь приводятся результаты измерений и результаты их анализа для двух образцов. Экспериментальные данные и результаты их обработки по методу наименьших квадратов приведены в табл., которая состоит из четырех столбцов и двадцати двух строк. Первые одиннадцать строк содержат данные для образца № 1, следу-

ющие одиннадцать строк содержат данные для образца № 2. Для каждого из образцов приведены следующие данные: в первом столбце — номера по порядку; во втором столбце — условные номера, которые отсчитываются от центрального значения времени; в третьем столбце — последовательные значения времени; в четвертом столбце — измененные значения потенциалов поверхности пленки; в пятом столбце — значения величин y , полученные по методу наименьших квадратов.

Таблица

№	N_z	t, c	V, B	$y, 10^{-10} м/В$
1	-5	0	27,29	15,20706
2	-4	120	26,59	15,60817
3	-3	240	26,26	15,80118
4	-2	360	26,05	15,92956
5	-1	480	25,90	16,02592
6	0	600	25,77	16,10310
7	1	720	25,67	16,16751
8	2	840	25,58	16,22276
9	3	960	25,50	16,27120
10	4	1080	25,44	16,31425
11	5	1200	25,38	16,35305
1	-5	0	64,18	16,83103
2	-4	20	63,85	16,91373
3	-3	40	63,56	16,98960
4	-2	60	63,30	17,05629
5	-1	80	63,07	17,12392
6	0	100	62,84	17,18475
7	1	120	62,64	17,24212
8	2	140	62,45	17,29439
9	3	160	62,26	17,34371
10	4	180	62,09	17,39498
11	5	200	61,92	17,44205

Образец № 1. Кремниевая пластина марка КДБ-12 с ориентацией кристаллической решетки <100>. Окислена в производственных условиях по технологии термического сухого окисления при $T = 1000$ °С в течение 40 минут. Толщина пленки SiO₂ равна $4,15 \cdot 10^{-10}$ м ($0,0415$ мкм). Ошибки при измерениях потенциалов не превышают $0,04$ %. Для анализа использованы следующие исходные данные: $y_0 = 16,10310 \cdot 10^{-10}$ м/В; $\dot{y}_0 = 0,58352 \cdot 10^{-13}$ м/(В·с); $\Delta t_2 = 240$ с; $\Delta t_{-2} = -240$ с; $\Delta t_4 = 480$ с, $\Delta t_{-4} = -480$ с; $\Delta y_2 = 0,11966 \cdot 10^{-10}$ м/В; $\Delta y_{-2} = -0,17351 \cdot 10^{-10}$ м/В; $\Delta y_4 = 0,21115 \cdot 10^{-5}$ м/В; $\Delta y_{-4} = 0,49493 \cdot 10^{-10}$ м/В. В результате расчетов получено: $\varphi = 3,09$ эВ; $\alpha = 2,20 \cdot 10^{-6}$ (В·Ом)⁻¹; $\beta = 2,58 \cdot 10^{10}$, $\gamma = 0,681 \cdot 10^{-17}$ (Ом·м)⁻¹; при $E_0 = 6,21 \cdot 10^6$ В/см, $\delta_0 = 5,34 \cdot 10^{-14}$ (Ом·м)⁻¹; $I_0 = I_F + I_R = 0,77 \cdot 10^{-10}$ А/см²; $I_R = 0,423 \cdot 10^{-12}$ А/см²; $I_R / I_0 = 0,55$ %.

Образец № 2. Кремниевая пластина марки КДБ-12 с ориентацией кристаллической решетки

ки $\langle 100 \rangle$ окислена в производственных условиях по технологии термического пирогенного окисления при $T = 1000$ °С в течение 19 минут. Толщина пленки SiO_2 равна $1080 \cdot 10^{-10}$ м (0,108 мкм). Ошибки при измерениях потенциалов не превышают 0,02 %. Для анализа использованы следующие исходные данные: $y_0 = 17,18475 \cdot 10^{-10}$ м/В; $\dot{y}_0 = 2,9034 \cdot 10^{-13}$ м/(В·с); $\Delta t_4 = 80$ с; $\Delta t_{-4} = -80$ с; $\Delta y_4 = 0,21023 \cdot 10^{-10}$ м/В; $\Delta y_{-4} = -0,27102 \cdot 10^{-10}$ м/В. В этом образце время разряда мало. Необходимо использовать выражение (11), (17)–(20). В результате расчетов получено: $\varphi = 2,94$ эВ; $\alpha = 3,70 \cdot 10^{-6}$ (В·Ом) $^{-1}$; $\beta = 2,402 \cdot 10^{10}$, $\gamma = 313,2 \cdot 10^{-17}$ (Ом·м) $^{-1}$; при $E_0 = 5,813 \cdot 10^6$ В/см, $\delta_0 = 11,34 \cdot 10^{-14}$ (Ом·м) $^{-1}$; $I_0 = I_F + I_R = 3,306 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 ; $E_R = 1,824 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 ; $I_R / I_0 = 55,16$ %. Из полученных результатов анализа экспериментальных данных следует, что образец № 1 имеет очень малую долю тока с прыжковым механизмом проводимости. У образца № 2 доля тока с прыжковым механизмом проводимости составляет более 50 % от общего тока. Этот образец получен после длительного простоя технологического оборудования. При простое оборудования в его рабочих частях происходит сорбция газов и паров из атмосферы. Сразу после включения оборудования происходит десорбция газов и паров, и они ухудшают качество пленки SiO_2 на кремниевых пластинах.

ВЫВОДЫ

1. Проведен теоретический анализ электрического разряда плоских структур Si–SiO $_2$.
2. Разработана методика обработки результатов измерений потенциалов поверхности пленки SiO $_2$ на кремниевых пластинах с применением зонда Кельвина.
3. Проведены исследования процесса электрического разряда двух окисленных кремниевых пластин, определены значения электрофизических параметров пленок SiO $_2$ и значения плотностей токов разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейников Н.М., Лихолет А.Н., Мудров А.К. Прибор для контроля состояния поверхности полупроводников методом контактной разности потенциалов // Приборы и техника эксперимента. — 1974. — №6. — С. 188–190.
2. Бутусов И.Ю., Крячко В.В., Лобов И.Е., Котов В.В. // Измерение потенциала поверхности кремниевых пластин в процессе производства БИС // Электронная промышленность. — 1994. — № 4–5. — С. 104–105.
3. Свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник / Под ред. А. В. Ржанова — М.: Наука, 1976. — 276 с.
4. Иоффе А.В. Процессы переноса в неорганических диэлектриках // Известия ВУЗов. Физика. — 1979. — № 1. — С. 40–55.