

Особенности высокочастотных измерений импеданса структур металл–диэлектрик–полупроводник со сверхтонким окислом

© Е.И. Гольдман, А.И. Левашова, С.А. Левашов, Г.В. Чучева[†]

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук,
141190 Фрязино, Россия

(Получена 4 сентября 2014 г. Принята к печати 23 сентября 2014 г.)

Рассмотрены возможности использования данных высокочастотных измерений импеданса структур металл–окисел–полупроводник со сверхтонким изолирующим слоем для определения параметров полупроводника и туннельных характеристик диэлектрика. Если точность эксперимента позволяет фиксировать и активную, и реактивную части импеданса, то толщина приповерхностного слоя обеднения, сопротивление базовой части полупроводника, дифференциальная туннельная проводимость изолирующего слоя и дифференциальный, стимулированный туннелированием ток генерации электронно-дырочных пар вычисляются через измеренные на двух частотах значения емкости и проводимости структуры. В случае, когда значения активной части импеданса лежат за пределами точности измерений, анализ параметров возможен при 4-частотной организации опыта по значениям только емкостей при повышенной точности их измерений. Сформулирован тест для необходимой точности данных такого опыта. Если тест не исполняется, то можно определить только емкость поверхностного слоя обеднения в полупроводнике, и при этом достаточно одночастотного опыта.

В структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) напряжение в цепи полевой электрод–подложка распределяется между диэлектриком, заряженным поверхностным слоем полупроводника и базой (электронейтральный слой полупроводника вплоть до контакта). В случае „толстых“ окислов, с толщинами > 5 нм, активное сопротивление диэлектрика гораздо больше сопротивления базы и падением напряжения на ней можно пренебречь. Измерение поверхностного изгиба зон полупроводника производится по значению высокочастотной емкости структуры [1]. Разность потенциалов на границах диэлектрика получается вычитанием измеренного падения напряжения на полупроводнике из поданного на структуру напряжения. В тонких и особенно сверхтонких (< 4 нм) изолирующих слоях туннельная проводимость окисла достаточно велика — она сравнима или может превосходить проводимость базы, плюс дополнительно возникают токи, обусловленные рождением электронно-дырочных пар основными носителями заряда, протуннелировавшими в полупроводник из полевого электрода (ПЭ), с энергиями больше ширины запрещенной зоны. В зависимости от туннельной проводимости изолирующего слоя активные токи в цепи ПЭ–подложка могут быть как меньше емкостных, так и превосходить их. Представляется интересным попытаться определить из высокочастотных измерений импеданса МДП структуры не только толщину слоя обеднения в полупроводнике, но и параметры туннельных и генерационных процессов. Анализ этих возможностей и посвящена данная работа.

На пути решения поставленной задачи возникает несколько трудностей. Во-первых, чисто технически сложно измерить на высокочастотном сигнале доста-

точно высокие сопротивления, поскольку даже малые паразитные добавки к ним, но реактивной природы, существенно изменяют результат детектирования. Во-вторых, данных о высокочастотных емкости и проводимости структуры, измеренных на единственной частоте, недостаточно для определения „мгновенных“ значений поверхностного изгиба зон, туннельной проводимости тонкого изолирующего слоя и сопротивления базовой области полупроводника, так как неизвестных больше, чем известных. Эта трудность преодолевается использованием значений активной и емкостной составляющих на нескольких высоких частотах, тем самым увеличивается число измеряемых параметров. Теоретически для определения сопротивления базы, туннельной проводимости, поверхностного изгиба зон и стимулированного туннелированием тока рождения электронно-дырочных пар данных измерений при двух частотах должно быть достаточно. В принципе, если в полупроводнике или изоляторе возникают дополнительно к указанным еще какие-либо быстрые реакции на приложенное напряжение и они дают вклад в импеданс, то можно проводить высокочастотные измерения на большом количестве частот. Отметим, что ранее двухчастотный подход использовался для определения сопротивления базы МДП структуры по измерениям ее высокочастотной емкости на двух частотах [2,3]. Данные об активной составляющей при этом не использовались. Возможная причина данного обстоятельства будет обсуждена далее.

Рассмотрим малосигнальный импеданс МДП структуры с базой — полупроводником n -типа проводимости в состоянии неравновесного обеднения. Далее Δ обозначает малую высокочастотную добавку, все временные зависимости величин с данным знаком пропорциональны $\exp(i\omega t)$, где ω — угловая частота, t — время. Падение напряжения на дырочном слое учитывать не будем.

[†] E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Будем считать положительным направление тока из подложки в ПЭ. Тогда приложенное напряжение имеет направление роста от ПЭ к подложке. Имеем систему уравнений:

$$\Delta V_g = \Delta V_i + \Delta V_s + \Delta V_b, \quad (1)$$

$$\Delta V_b = \rho_b \Delta J, \quad (2)$$

V_g — внешнее напряжение, поданное на ПЭ, V_i , V_s и V_b — падения внешнего напряжения на окисле, полупроводнике и базе, ρ_b — сопротивление базы, J — ток в цепи ПЭ–подложка;

$$\Delta J = \sigma_t \Delta V_i + \frac{d\Delta Q}{dt} = \sigma_t \Delta V_i + i\omega \Delta Q, \quad (3)$$

$$C_i \Delta V_i = \Delta Q = qS(\Delta p_s + N_d \Delta W),$$

$$qSN_d \Delta W = C_s \Delta V_s, \quad (4)$$

$$qS \frac{d\Delta p_s}{dt} = i\omega qS \Delta p_s = g_t \Delta V_i. \quad (5)$$

Здесь σ_t — дифференциальная туннельная проводимость изолирующего слоя, Q — поверхностный заряд полупроводника, q — элементарный заряд, S — площадь ПЭ, N_d — концентрация доноров, W — толщина слоя обеднения Шоттки, p_s — поверхностная концентрация дырок, C_i и C_s — емкости изолирующего слоя и поверхностного заряженного слоя полупроводника, g_t — производная по напряжению на окисле стимулированного туннелированием тока рождения электронно-дырочных пар [4]. Поскольку задача о высокочастотных токах рассматривается вдали от состояния равновесия, то медленные процессы натекания неосновных носителей заряда из периферии и их генерацию через центры захвата под ПЭ у границы полупроводник–диэлектрик можно не учитывать.

Импеданс Z определяется из соотношения $\Delta J = Z \Delta V_g$. Из уравнений (3) и (4) имеем

$$\Delta J = (\sigma_t + i\omega C_i) \Delta V_i,$$

а из выражений (4) и (5) получаем

$$\Delta V_i (i\omega C_i - g_t) = \Delta V_s i\omega C_s.$$

Таким образом, из формул (1) и (2) находим:

$$\Delta V_g = \Delta V_i \left[1 + \frac{(i\omega C_i - g_t)}{i\omega C_s} + \rho_b (\sigma_t + i\omega C_i) \right].$$

Окончательно для импеданса получаем:

$$Z = \frac{\omega^2 C_i C_s - i\omega \sigma_t C_s}{g_t + \omega^2 \rho_b C_i C_s - i\omega [C_i + C_s (1 + \sigma_t \rho_b)]}. \quad (6)$$

Выделим действительную и мнимую части импеданса $Z = \Omega + i\omega C$:

$$\Omega = \frac{\omega^2 C_i C_s (g_t + \omega^2 \rho_b C_i C_s) + \omega^2 \sigma_t C_s [C_i + C_s (1 + \sigma_t \rho_b)]}{(g_t + \omega^2 \rho_b C_i C_s)^2 + \omega^2 [C_i + C_s (1 + \sigma_t \rho_b)]^2},$$

$$C = \frac{\omega^2 C_i C_s (C_i + C_s) - \sigma_t g_t C_s}{(g_t + \omega^2 \rho_b C_i C_s)^2 + \omega^2 [C_i + C_s (1 + \sigma_t \rho_b)]^2}.$$

Итак, общая зависимость импеданса от напряжения V_g и времени t определяется тремя функциями этих переменных C_s , σ_t , g_t и двумя константами C_i , ρ_b . Обозначим минимальную частоту измерений ω_1 и запишем выражения для импеданса в безразмерном виде: $x = C_s/C_i$, $k_b = \omega_1 \rho_b C_i$ (практически не зависит от времени и приложенного напряжения), $z = \sigma_t/\omega_1 C_i$, $u = g_t/\omega_1 C_i$ — это неизвестные, $A(\vartheta) = \Omega(\vartheta)/\omega_1 C_i$, $B(\vartheta) = C(\vartheta)/C_i$ — измеряемые величины, $\vartheta = \omega/\omega_1$ — задаваемые в эксперименте параметры. Для двухчастотного опыта получаем систему из 4 уравнений:

$$\frac{x\{(u + k_b x) + z[1 + x(1 + k_b z)]\}}{(u + k_b x)^2 + [1 + x(1 + k_b z)]^2} = A_1;$$

$$\frac{x[(1 + x) - zu]}{(u + k_b x)^2 + [1 + x(1 + k_b z)]^2} = B_1;$$

$$\frac{\vartheta^2 x\{(u + \vartheta^2 k_b x) + z[1 + x(1 + k_b z)]\}}{(u + \vartheta^2 k_b x)^2 + \vartheta^2 [1 + x(1 + k_b z)]^2} = A_2;$$

$$\frac{x[\vartheta^2(1 + x) - zu]}{(u + \vartheta^2 k_b x)^2 + \vartheta^2 [1 + x(1 + k_b z)]^2} = B_2. \quad (7)$$

Деля в этой системе первое уравнение на второе, а третье на четвертое, приходим к двум соотношениям, из которых выражаем u и k_b через x и z :

$$u = \vartheta^2(1 + x)$$

$$\times \left[\left(\frac{A_1}{B_1} - z \right) (\vartheta^2 + z^2) - \left(\frac{A_2}{B_2} - z \right) (1 + z^2) \right] /$$

$$\left[\left(1 + \frac{A_1}{B_1} z \right) \vartheta^2 (\vartheta^2 + z^2) - \left(\vartheta^2 + \frac{A_2}{B_2} z \right) (1 + z^2) \right], \quad (8)$$

$$k_b = (1 + x)$$

$$\times \left[\vartheta^2 \left(\frac{A_2}{B_2} - z \right) \left(1 + \frac{A_1}{B_1} z \right) - \left(\frac{A_1}{B_1} - z \right) \left(\vartheta^2 + \frac{A_2}{B_2} z \right) \right] /$$

$$x \left[\left(1 + \frac{A_1}{B_1} z \right) \vartheta^2 (\vartheta^2 + z^2) - \left(\vartheta^2 + \frac{A_2}{B_2} z \right) (1 + z^2) \right]. \quad (9)$$

Таким образом, задача решения системы (7) свелась к решению двух уравнений — первого и третьего системы (7), с двумя неизвестными x и z . Их решение имеет вид

$$z = \frac{B_1(\vartheta^2 B_2^2 + A_2^2) - \vartheta^2 B_2(B_1^2 + A_1^2)}{A_2(B_1^2 + A_1^2) - A_1(\vartheta^2 B_2^2 + A_2^2)}; \quad (10)$$

$$\frac{1}{x} = \frac{\vartheta^2 [B_2(B_1 + A_1 z)(\vartheta^2 + z^2) - (B_1^2 + A_1^2)(B_2 \vartheta^2 + A_2 z)]}{(\vartheta^2 - 1)(B_1^2 + A_1^2)(B_2 \vartheta^2 + A_2 z)}$$

$$+ \frac{(B_2 \vartheta^2 + A_2 z)[(B_1^2 + A_1^2) - B_1(1 + z^2)]}{(\vartheta^2 - 1)(B_1^2 + A_1^2)(B_2 \vartheta^2 + A_2 z)}. \quad (11)$$

Итак, теоретически, измерения полного импеданса МДП структуры на двух частотах дают ответ о параметрах, идущих в ней процессов. Однако оказывается, что такой подход не всегда удается реализовать в эксперименте. Опыты проводились на частотах от 100 кГц до 1 МГц на автоматизированной установке [5] с использованием прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A в процессе перехода структуры $n^+ \text{-Si-SiO}_2 \text{-}n \text{-Si}$ с толщиной окисла 39 Å и площадью ПЭ $1.6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ к стационарному состоянию после подачи на образец обедняющего напряжения $V_g = -3.2 \text{ В}$. В едином цикле измерений за время 0.3с можно было фиксировать значения импеданса для 4 различных частот. Для экспериментальной структуры в состоянии глубокого обеднения характерны значения емкости $10^{-12} \text{--} 10^{-11} \text{ Ф}$. При этом проводимость лежит в диапазоне $10^{-7} \text{--} 10^{-6} \text{ См}$. Однако при таких емкостях измеряемые значения проводимости находятся за пределами точности измерений на данном приборе [6]. Более того, контрольные измерения параллельной цепочки из емкости и сопротивления с номиналами 470 пФ и 10 МОм показывают, что фиксируемая прибором Agilent E4980A проводимость при переходе от частоты 0.1 к частоте 1 МГц увеличивается почти на порядок. Следовательно, для реализации расчетных формул при измерениях на двух частотах активной составляющей импеданса структур с толщиной окисла $\sim 4 \text{ нм}$ требуется на порядок повысить точность инструментов, обеспечивающих эти измерения. Естественно, с уменьшением толщины изолирующего слоя туннельные токи резко нарастают и данные об активной части импеданса становятся экспериментально достижимыми.

Другой вывод, который следует из рассмотрения ситуации с измерениями импеданса МДП структуры с толщиной окисла $\sim 4 \text{ нм}$, — слабая зависимость емкости от частоты измерений. Фактически это связано с тем, что емкостные токи существенно превышают активные. На рис. 1 представлены зависимости от времени t активной

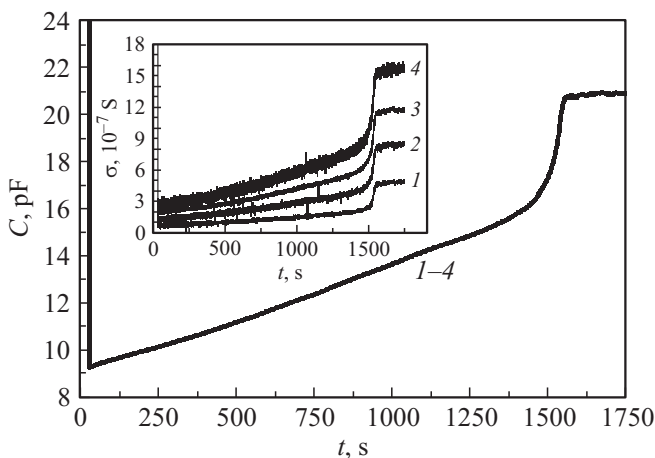


Рис. 1. Высокочастотные емкость и проводимость (на вставке) МДП структуры на основе Si с толщиной окисла 39 Å в процессе ее релаксации к состоянию инверсии при $V_g = -3.2 \text{ В}$. Частота измерений: 500 (1), 700 (2), 850 кГц (3) и 1 МГц (4).

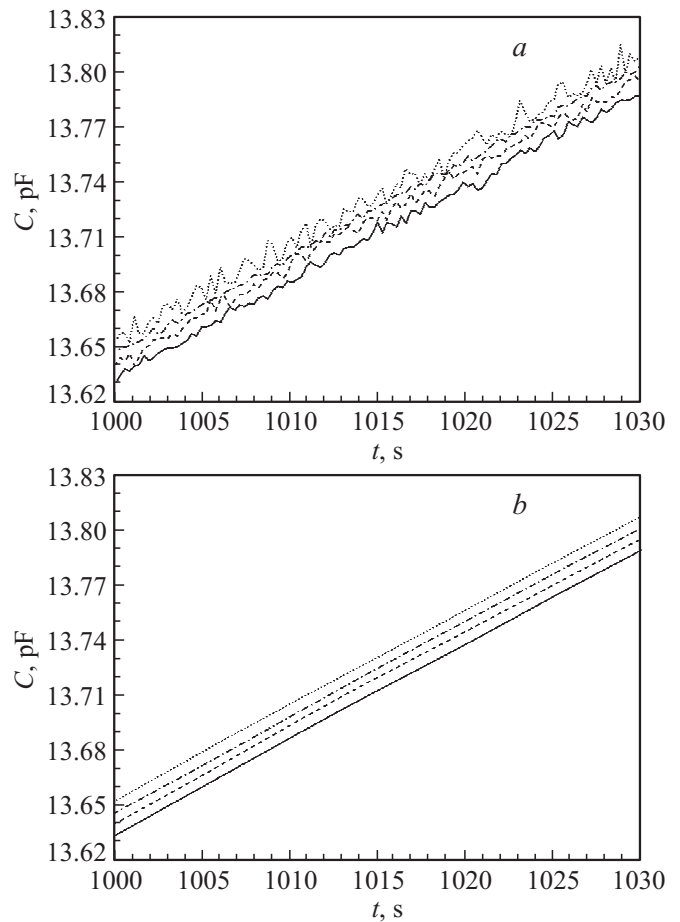


Рис. 2. Фрагмент емкостных характеристик рис. 1: *a* — экспериментальные кривые, *b* — сглаженные от шума кривые, $\varepsilon = 5 \text{ с}$. Частота измерений: 500 (сплошная линия), 700 (штриховая), 850 кГц (штрихпунктирная), 1 МГц (пунктирная).

и емкостной составляющих импеданса описанной выше структуры $n^+ \text{-Si-SiO}_2 \text{-}n \text{-Si}$ в процессе ее перехода из состояния равновесия при $V_g = 0 \text{ В}$ к стационарному состоянию инверсии при $V_g = -3.2 \text{ В}$. Измерения в процессе релаксации проводились на 4 частотах 0.5, 0.7, 0.85 и 1 МГц в едином цикле. Приведенные на вставке к рис. 1 кривые проводимости МДП структуры, как уже указывалось, не точны и носят иллюстративный характер. Видно, что на масштабе изменения характеристик за время переходного процесса все 4 емкостные кривые сливаются. На рис. 2, *a* представлен фрагмент емкостных характеристик на узком участке переходного процесса. Из него следует, что изменения значений емкостей с ростом частоты измерений, несмотря на шум, фиксируются прибором Agilent E4980A в пределах экспериментальной погрешности. Последняя, по данным контрольных измерений (см. выше), составляет 0.01%. Таким образом, можно попытаться определить неизвестные параметры релаксационного процесса только по измерениям реактивной части импеданса МДП структуры. Поскольку в экспериментальных условиях превалируют

емкостные токи, то $(1+x) \gg (k_b x)$, u, z . Эти неравенства позволяют разложить выражение для четвертого уравнения системы (7) в ряд по малым параметрам $(k_b x)/(1+x)$, $z/(1+x)$ и $u/(1+x)$. С точностью до 4-го порядка малости имеем

$$\begin{aligned} \left(\frac{x+1}{x}\right)B(\omega) &\approx 1 - \left[2(k_b x z) + \frac{z u}{\vartheta^2}\right] / (1+x) \\ &- \left\{\left(\frac{u}{\vartheta} + \vartheta k_b x\right)^2 - (k_b x z)\left[3(k_b x z) + 2\frac{z u}{\vartheta^2}\right]\right\} / (1+x)^2 \\ &+ \left[\left(\frac{u}{\vartheta} + \vartheta k_b x\right)^2 \left(4k_b x z + \frac{z u}{\vartheta^2}\right)\right] / (1+x)^3 \\ &+ \left(\frac{u}{\vartheta} + \vartheta k_b x\right)^4 / (1+x)^4. \end{aligned}$$

Обозначая $B_1 = B(\omega_1)$, $B_2 = B(\omega_2)$, $B_3 = B(\omega_3)$, $B_4 = B(\omega_4)$, $\vartheta_1 = \omega_2/\omega_1$, $\vartheta_2 = \omega_3/\omega_1$, $\vartheta_3 = \omega_4/\omega_1$, имеем с точностью до основного слагаемого

$$\frac{x}{(1+x)} \approx \frac{1}{4} (B_1 + B_2 + B_3 + B_4). \quad (12)$$

Составим три комбинации разностей измеряемых величин:

$$\begin{aligned} \frac{(1+x)^2 \vartheta_1^2}{x(\vartheta_1^2 - 1)} (B_2 - B_1) &= z u - \frac{[2z u(k_b x z) - u^2 + (k_b x)^2 \vartheta_1^2]}{(1+x)} \\ &- \frac{1}{(1+x)^2} \left[4(k_b x z)u^2 + 2(k_b x z)u^2 - 4(k_b x)^3 z \vartheta_1^2\right. \\ &+ \left.\frac{z u^3(1 + \vartheta_1^2)}{\vartheta_1^2}\right] - \frac{1}{(1+x)^3} \left[4u^3 k_b x + \frac{u^4(1 + \vartheta_1^2)}{\vartheta_1^2}\right. \\ &- \left.4u(k_b x)^3 \vartheta_1^2 - (k_b x)^4 \vartheta_1^2(1 + \vartheta_1^2)\right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(1+x)^2 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2}{x(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} (B_3 - B_2) &= z u - \frac{[2z u(k_b x z) - u^2 + (k_b x)^2 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2]}{(1+x)} \\ &- \frac{1}{(1+x)^2} \left[4(k_b x z)u^2 + 2(k_b x z)u^2 - 4(k_b x)^3 z \vartheta_1^2 \vartheta_2^2\right. \\ &+ \left.\frac{z u^3(\vartheta_2^2 + \vartheta_1^2)}{\vartheta_1^2 \vartheta_2^2}\right] - \frac{1}{(1+x)^3} \left[4u^3 k_b x + \frac{u^4(\vartheta_2^2 + \vartheta_1^2)}{\vartheta_1^2 \vartheta_2^2}\right. \\ &- \left.4u(k_b x)^3 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2 - (k_b x)^4 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2(\vartheta_2^2 + \vartheta_1^2)\right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{(1+x)^2 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2}{x(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} (B_4 - B_3) &= z u - \frac{[2z u(k_b x z) - u^2 + (k_b x)^2 \vartheta_3^2 \vartheta_2^2]}{(1+x)} \\ &- \frac{1}{(1+x)^2} \left[4(k_b x z)u^2 + 2(k_b x z)u^2 - 4(k_b x)^3 z \vartheta_3^2 \vartheta_2^2\right. \\ &+ \left.\frac{z u^3(\vartheta_2^2 + \vartheta_3^2)}{\vartheta_3^2 \vartheta_2^2}\right] - \frac{1}{(1+x)^3} \left[4u^3 k_b x + \frac{u^4(\vartheta_2^2 + \vartheta_3^2)}{\vartheta_3^2 \vartheta_2^2}\right. \\ &- \left.4u(k_b x)^3 \vartheta_3^2 \vartheta_2^2 - (k_b x)^4 \vartheta_3^2 \vartheta_2^2(\vartheta_2^2 + \vartheta_3^2)\right]. \end{aligned}$$

Видно, что в них фигурируют члены как второго, так и четвертого порядков малости. Поэтому с точностью до второго порядка малости имеем

$$\begin{aligned} u \left[z + \frac{u}{(1+x)}\right] &\approx \frac{\vartheta_2^2 \vartheta_1^2 (1+x)^2}{(\vartheta_2^2 - 1)x} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)}\right] \\ &\approx \frac{(1+x)^2 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2 \vartheta_3^2}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)x(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)}\right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} k_b^2 &\approx \frac{(1+x)^3}{x^3(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)}\right] \\ &\approx \frac{(1+x)^3}{x^3(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)}\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Исключим из комбинаций разностей измеряемых величин члены второго порядка малости:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)}\right] &- \frac{1}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} - \frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)}\right] \\ &= \frac{x(\vartheta_3^2 - 1)}{(1+x)^4} \left\{\frac{u^3}{\vartheta_1^2 \vartheta_2^2 \vartheta_3^2} \left[z + \frac{u}{(1+x)}\right] + \frac{(k_b x)^4}{(1+x)}\right\}. \end{aligned}$$

Итак, выражения для неизвестных принимают вид (12), (14) и

$$u = (1+x) \left[\frac{Q}{\Lambda} - \frac{(1+x)(\vartheta_3^2 - 1)L^2}{x\Lambda}\right]^{(1/2)}, \quad (15)$$

$$z = \frac{(1+x)^2 \vartheta_1^2 \vartheta_2^2 \vartheta_3^2 \Lambda}{x(\vartheta_3^2 - 1)u} - \frac{u}{(1+x)}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} Q &= \left\{\frac{1}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)}\right]\right. \\ &- \left.\frac{1}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} - \frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)}\right]\right\}, \end{aligned}$$

$$\Lambda = \frac{(\vartheta_3^2 - 1)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right]$$

$$\approx \frac{(\vartheta_3^2 - 1)}{\vartheta_3^2(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right],$$

$$L = \frac{1}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right]$$

$$\approx \frac{1}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right].$$

Для применения полученных выражений к результатам эксперимента нужно прежде всего отфильтровать измеренные кривые от шума. Из соображений удобства мы использовали свертку с ядром Гаусса:

$$\bar{B}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi\varepsilon}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-t')^2}{\varepsilon^2}\right] B(t') dt'.$$

Здесь $\bar{B}(t)$ — сглаженная измеренная величина, ε — разрешение сглаживания. Присутствующий в результатах измерений шум (см. рис. 2, а) имеет характерные времена изменения порядка скважности фиксации ~ 0.3 с. Характерные времена переходного процесса > 100 с, поэтому наилучшие представления должны быть в условиях $0.3 \ll \varepsilon \ll 100$ с. Систематическую ошибку от сглаживания можно оценить как

$$\Delta_{\text{сист}} A = \bar{A}(t) - \bar{A}(t),$$

где

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi\varepsilon}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-t')^2}{\varepsilon^2}\right] \bar{A}(t') dt'$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\varepsilon}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t''-t)^2}{2\varepsilon^2}\right] A(t'') dt''.$$

На рис. 2, b представлен сглаженный при $\varepsilon = 5$ с фрагмент емкостных характеристик, приведенных на рис. 2, а. Из него видно, что в один и тот же момент времени соответствующие разным частотам значения емкостной составляющей различаются более, чем на экспериментальную погрешность. Тем не менее оказывается, что точности результатов опытов не хватает для использования выражений (14), (15) и (16).

На рис. 3 представлены экспериментальные временные зависимости левых и правых частей приближенных равенств (13) и (14). В соответствии с проведенным расчетом они попарно должны быть близки. Однако, как видно из рис. 3, разброс данных порядка самих значений велик и, следовательно, говорить об использовании выражений (15) и (16), получающихся из (13) и (14), нельзя. Поэтому для условий нашего опыта можно лишь

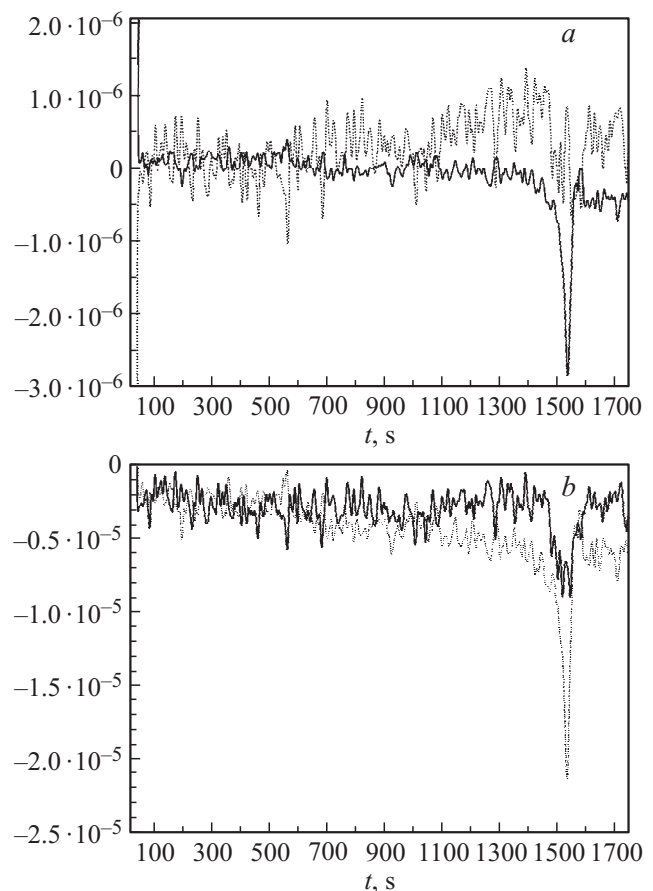


Рис. 3. Временные зависимости комбинаций (13) и (14) разностей измеряемых величин.

а: пунктирная кривая — $\frac{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right];$

сплошная кривая — $\frac{\vartheta_3^2}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right].$

б: сплошная кривая — $\frac{1}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right];$

пунктирная кривая — $\frac{1}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right].$

с помощью формулы (12) определить временную зависимость емкости приповерхностного слоя обеднения полупроводника (см. рис. 4).

В заключение сформулируем общую картину возможностей применения данных измерений высокочастотного импеданса МДП структуры со сверхтонким изолятором для определения параметров процессов, идущих в обедненном полупроводнике. Если точность эксперимента позволяет регистрировать и активную, и реактивную части импеданса, то толщина приповерхностного слоя обеднения, сопротивление базовой части полупроводника, дифференциальная туннельная проводимость изолирующего слоя и дифференциальный, стимулированный туннелированием ток генерации электронно-дырочных пар вычисляются в рамках двухчастотного подхода по формулам (8)–(11). В случае, когда значения активной части импеданса лежат за пределами точности измере-

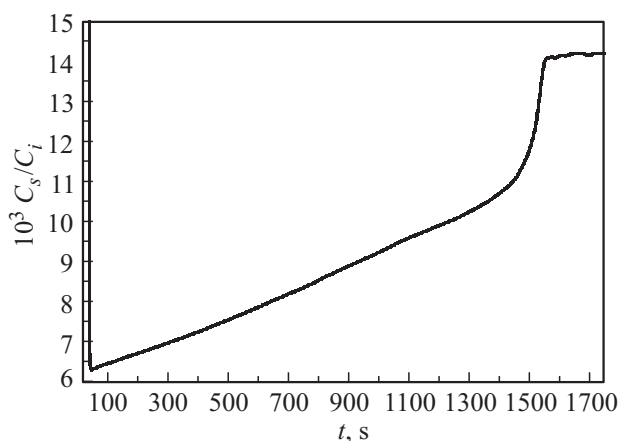


Рис. 4. Временная зависимость емкости приповерхностного слоя обеднения полупроводника.

ний, анализ параметров возможен по данным высокочастотных емкостей при четырехчастотной организации опыта. Здесь также могут быть два варианта. Если точность измерений достаточно высока и позволяет оперировать с комбинациями разностей емкостей, отвечающих различным частотам, то результаты вычисляются по формулам (12), (14)–(16). При этом тестом на точность является необходимость выполнения условия близости значений

$$\frac{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right] \\ \approx \frac{\vartheta_3^2}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right]$$

и

$$\frac{1}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_1^2)} \left[\frac{\vartheta_1^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} - \frac{\vartheta_3^2(B_4 - B_3)}{(\vartheta_3^2 - \vartheta_2^2)} \right] \\ \approx \frac{1}{(\vartheta_2^2 - 1)} \left[\frac{(B_2 - B_1)}{(\vartheta_1^2 - 1)} - \frac{\vartheta_2^2(B_3 - B_2)}{(\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2)} \right].$$

Если указанные соотношения в эксперименте не выполняются, то точность измерений недостаточна, и можно определить только емкость поверхностного слоя обеднения по формуле (12). В этом случае достаточно одночастотного опыта.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 12-07-00662-а, 13-07-00782-а) и программы фундаментальных исследований президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] S.M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of semiconductor devices* (N.J., John Wiley and Sons, Inc., 2007).
- [2] L.F. Lonnum, J.S. Johannessen. *Electron. Lett.*, **22** (9), 456 (1986).

- [3] J.Y. Kevin, H. Chenming. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **46** (7), 1500 (1999).
- [4] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. *ФТП*, **40** (2), 195 (2006).
- [5] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Г.В. Чучева. *ПТЭ*, № 6, 110 (1997).
- [6] *Прецизионный измеритель LCR Agilent E4980A. Руководство для пользователя*. Изд. 5 (2007) p. 32.

Редактор Л.В. Шаронова

Particularities of high-frequency impedance measurements of metal–insulator–semiconductor structures with ultrathin oxide

E.I. Goldman, A.I. Levashova, S.A. Levashov, G.V. Chucheva

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, 141190 Fryazino, Russia

Abstract The possibility of using of high-frequency measurements of impedance of metal–oxide–semiconductor structures with a ultrathin isolating layer are considered for the determination of semiconductor parameters and tunnel characteristics of the dielectric. If the experiment accuracy allows to fix both active and reactive impedance parts, the thickness of the semiconductor surface depletion layer, the resistance of the semiconductor basic part, the differential tunnel conductivity of the isolating layer and the differential, stimulated by tunneling generation current of electron–hole pairs are calculated through the values of the capacity and the conductivity of the structure, measured at two frequencies. The analysis of parameters is possible at the 4-frequency organization of the experiment for values only capacities with an increased accuracy of their measurements in the case, when of the active part of impedance values lie outside the accuracy of measurements. The test for the necessary accuracy of data of such experience is formulated. If the test is not performed, it is possible to determine only the capacity of the depletion layer of the semiconductor surface and, thus the single-frequency experiment is sufficient.