

Определение характерного пространственного масштаба флуктуаций толщины туннельно-тонкого диэлектрика в МДП структурах на основе данных электрических измерений

© С.Э. Тягинов[¶], М.И. Векслер, И.В. Грехов, V. Zaporozhchenko*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Technische Fakultät der Universität Kiel,
D-24143 Kiel, Deutschland

(Получена 1 марта 2007 г. Принята к печати 12 марта 2007 г.)

Предложены и опробованы методики определения „корреляционной длины“ для флуктуаций толщины тонкого диэлектрика с использованием данных измерений электрических характеристик туннельных МДП структур, т.е. без применения средств микроскопии. Один из предложенных подходов основан на статистической обработке результатов измерений тока для случайной выборки образцов. Другой метод базируется на анализе скачков тока в сторону уменьшения, происходящих при испытании приборов на достаточно высоком постоянном напряжении. Апробация методов проведена на туннельных структурах Al/SiO₂/Si. Полученные оценки пространственного масштаба флуктуаций толщины сопоставляются с результатами непосредственного измерения этого масштаба для тех же слоев окисла.

PACS: 61.72.Hh, 68.35.Ct, 68.37.Ps, 73.40.Qv, 73.40.Gk

1. Введение

В пленке любого материала неизбежно имеют место локальные флуктуации толщины от ее номинального значения d_n . Их проявления зависят от типа структуры, в которой используется конкретная пленка, и могут быть весьма существенными. Так, в современных полевых транзисторах наличие неоднородности толщины подзатворного окисла приводит к разбросу порогового напряжения и паразитных токов затвора между отдельными образцами [1]. Ясно, что роль флуктуаций резко возрастает при уменьшении величины d_n , и поэтому задача выработки методов диагностики их параметров особенно актуальна применительно к „туннельному“ диапазону толщин окисла. В последнее время проблемам, связанным с флуктуациями толщины в полевых транзисторах и в других МДП приборах с туннельно-тонким диэлектриком, уделяется все большее внимание в литературе (см., например, [2–5]).

При проведении анализа влияния неоднородностей принято считать, что локальная толщина диэлектрика d распределена по нормальному закону со средним значением d_n и стандартным отклонением σ_d [4–6]. При этом понятно, что изменения толщины всегда происходят плавно: например, на расстояниях порядка межатомных нереальны изменения, значительно превосходящие толщину монослоя. Поэтому наряду с d_n и σ_d для количественного описания флуктуаций используется еще один параметр — характерный пространственный масштаб неоднородностей λ , который следует понимать как наименьшее расстояние в плоскости пленки, на котором локальные толщины являются некоррелиро-

ванными. Далее будет дано более точное определение. Величина λ , так же как и σ_d , служит показателем качества слоя диэлектрика. Для практических целей следует стремиться снизить значение λ в формируемых пленках, так чтобы выполнялось условие $L \gg \lambda$ (L — линейный размер прибора), позволяющее уменьшить разброс характеристик структур при любом σ_d .

В данной работе мы представим два новых метода оценки параметра λ , основанных на обработке результатов измерений электрических характеристик туннельных МДП структур. Первый из методов использует данные статистического разброса тока в выборке приборов совместно с рассчитанными нами в [7] зависимостями дисперсии тока от отношения L/λ . Второй метод базируется на использовании эффекта спада тока при мягком пробое МДП структуры с конечным значением σ_d . Такой спад наблюдается при высоких напряжениях [8] и обусловлен срывом тока в наиболее тонкой области прибора, имеющей размер порядка λ^2 .

2. Тестовые образцы

В работе исследуются туннельные МДП структуры Al/SiO₂/Si, выполненные на p - и n -пластинах ($N_A \approx 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Точное значение концентрации легирующей примеси для наших целей несущественно. Слой туннельно-тонкого окисла со средней толщиной $d_n = 2.70 \text{ нм}$ формировался в сухой смеси кислорода (20%) и азота при 700°C. Алюминиевые контакты наносились через маску при температуре 180°C в вакууме. Большинство контактов имело площадь $S = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$.

[¶] E-mail: shulekin@mail.ioffe.ru
Fax: +7(812)2927123

Выбор именно системы Al/SiO₂/Si в качестве тестовой объясняется тем, что характеристики туннельных барьеров для нее известны надежнее, чем для многих других комбинаций материалов в силу ее широкого применения.

Для каждой пластины стандартное отклонение толщины выращенного окисла σ_d тщательно измерялось при помощи атомно-силового микроскопа (Atomic Force Microscope — AFM), а в некоторых случаях и просвечивающего электронного микроскопа (Transmission Electron Microscope — TEM). Во всех случаях значение σ_d находилось в диапазоне 0.20–0.30 нм, что существенно больше, чем в приборах с SiO₂, изготавливаемых в современных промышленных условиях [1]. Однако для нашей работы относительно большая величина дисперсии толщины обеспечивает преимущество, так как эффекты неоднородности при этом становятся значительно более выраженными.

Помимо результатов, полученных на изготовленных нами образцах, используются данные измерений для структур с малыми размерами, заимствованные из статьи [9].

3. Определение и непосредственное измерение параметра λ

Пусть имеется зависимость локальной толщины диэлектрика d от координаты, достаточно подробно измеренная вдоль некоторой оси x в плоскости пленки в широком диапазоне изменения x . Можно рассчитать функцию корреляции между толщинами в точках, отстоящих друг от друга на расстояние l , как

$$\text{cov}(l) \equiv \frac{\langle (d(x) - d_n)(d(x+l) - d_n) \rangle}{\sigma_d^2}. \quad (1)$$

Очевидно, что в пределе $l \rightarrow 0$ величина cov будет стремиться к 1, что отражает полную корреляцию между толщинами в двух бесконечно близких точках. В противоположном пределе, когда l очень велико, значения $d(x)$ и $d(x+l)$ независимы, средняя величина произведения в (1) превращается в произведение средних величин, каждая из которых равна нулю. Что же касается всего диапазона $l > 0$, то естественно предположить, что $\text{cov}(l)$ представляет собой монотонно убывающую функцию (левая вставка на рис. 1).

Параметр λ можно определить как расстояние l между точками, для которого величина, получаемая по формуле (1), снижается до некоторого значения cov_{crit} , считаемого малым. Другой вариант состоит в том, что в области небольших длин l экспериментальная кривая $\text{cov}(l)$ аппроксимируется подходящей функцией l и λ ; это позволяет экстрагировать λ . Обычно здесь используется закон Гаусса ($\sim \exp(-l^2/\lambda^2)$) или спадающая экспонента

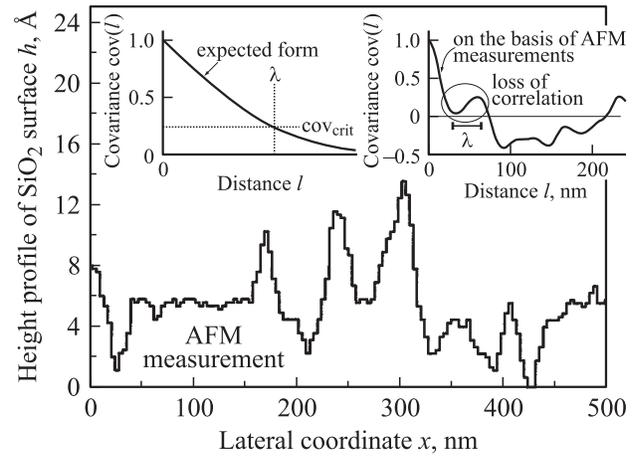


Рис. 1. Рельеф поверхности SiO₂ вдоль некоторого направления, измеренный при помощи атомно-силового микроскопа. На вставке — вид функции корреляции толщин окисла в точках, отстоящих на расстояние l (слева — ожидаемый, справа — из эксперимента).

($\sim \exp(-l/\lambda)$) [3]. С учетом сказанного приходится констатировать, что пока не существует однозначного соглашения об определении „корреляционной длины для флуктуаций“, или характерного пространственного масштаба неоднородности, хотя физический смысл этого параметра совершенно очевиден.

В общем случае получение профилей толщины $d(x)$ с необходимой достоверностью может быть весьма затруднительным.

Однако для наших образцов такие зависимости удалось измерить — с точностью до постоянного слагаемого — с помощью атомно-силового микроскопа. Сначала была изучена топография поверхности SiO₂ (вне алюминиевых контактов), а затем, после травливания Al и окисла, — топография поверхности Si. Поскольку во втором случае шероховатость оказалась незначительной по сравнению с первым, мы считали, что флуктуации толщины диэлектрика непосредственно отражаются формой рельефа его поверхности. Пример записанного рельефа $h(x)$ приведен на рис. 1. Для вычисления корреляционной функции достаточно воспользоваться выражением (1), работая с $h(x)$ так, как если бы это было $d(x)$, и подставляя $\langle h \rangle$ на место d_n . Полученная зависимость $\text{cov}(l)$ приведена на правой вставке. Мы видим, что при малых значениях l она имеет ожидаемый убывающий характер, но с увеличением l появляются хаотические изменения вверх и вниз. Это обусловлено узостью диапазона координат x , в котором выполнена диагностика рельефа. Тем не менее имеющиеся данные вполне позволяют оценить пространственный масштаб неоднородности λ . Он составляет 30–60 нм. Некоторая неопределенность связана с произволом в выборе cov_{crit} , упомянутым выше.

4. Оценка параметра λ из электрических измерений

По нашему мнению, в качестве дополнения или альтернативы применению средств микроскопии, для целей диагностики флуктуаций толщины туннельно-прозрачного диэлектрика могут быть использованы предлагаемые далее электрические методы.

Сначала заметим, что стандартное отклонение толщины σ_d достаточно точно оценивается по среднему наклону вольт-амперных кривых МДП структур [7]: чем сильнее разброс толщины, тем меньше этот наклон.

В работе [7] нами была предложена модель неоднородного слоя окисла. В этой модели принимается, что локальная толщина диэлектрика d является постоянной в пределах каждой ячейки размером $\lambda \times \lambda$ (рис. 2). Количество задействованных в структуре ячеек зависит от отношения L/λ ($L = S^{1/2}$), а средняя плотность тока I/S находится суммированием токов через ячейки с последующим делением на площадь структуры. Значительная часть полного тока I всегда концентрируется в какой-то одной ячейке. Если протекание тока в такой ячейке почему-либо сорвется, то произойдет заметное снижение тока I при заданном напряжении. Далее мы пользуемся описанной моделью.

4.1. Анализ данных разброса тока

При конечных значениях величин σ_d , λ и L ток должен изменяться от прибора к прибору. Статистические параметры подобного разброса для любого отношения L/λ могут быть предсказаны теоретически.

Среднеквадратичные отклонения величины I/S , а конкретнее зависимости $\sigma_{I/S} = \sigma_{I/S}(L/\lambda)$, были рассчитаны в упомянутой работе [7]. Используя их, можно оценить масштаб λ , если располагать гистограммами тока для выборки образцов из исследуемой партии. Но на практике удобнее оперировать не с $\sigma_{I/S}$, а с величиной $\mu = \sigma_{I/S}/(I/S)$, которая менее чувствительна к изменениям напряжения V , номинальной толщины d_n и сопротивления подложки. Единственным параметром, заметно влияющим на величину $\mu(L/\lambda)$, является σ_d . На рис. 3 показаны зависимости μ от L/λ для двух различных значений σ_d и двух напряжений V . Как видно, рост дисперсии толщины вызывает существенный подъем и деформацию кривой $\mu = \mu(L/\lambda)$, а вырывание V при фиксированной величине σ_d приводит лишь к небольшому сдвигу. Следовательно, при проведении оценки пространственного масштаба флуктуаций λ равенство уровней легирования, напряжений смещения и средних толщин d_n в эксперименте и в расчете не очень принципиально.

Параметр λ , экстрагируемый в рамках описанной модели квадратов с постоянной толщиной d , может не совсем соответствовать величине, введенной при обсуждении выражения (1). Однако это не следует считать внутренним противоречием предлагаемого подхода, так

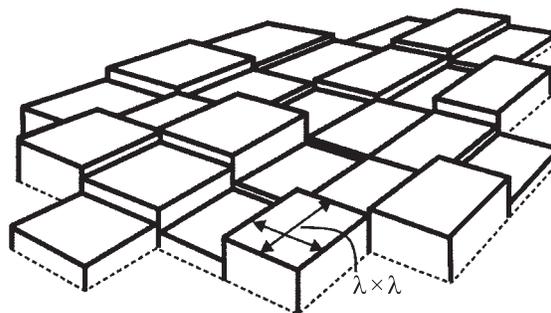


Рис. 2. Модель пленки диэлектрика с неоднородно распределенной толщиной. В пределах каждой ячейки размером $\lambda \times \lambda$ толщина d считается постоянной.

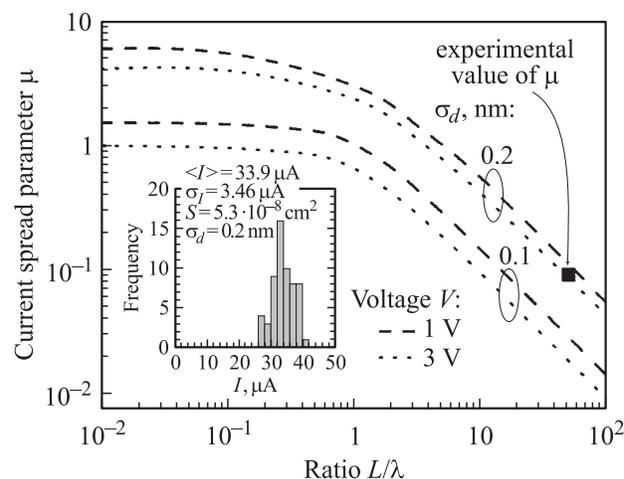


Рис. 3. Зависимости параметра разброса тока $\mu = \mu(L/\lambda)$, рассчитанные для двух значений среднеквадратичного отклонения толщины окисла σ_d и двух напряжений V . На вставке — данные статистического разброса тока из статьи [9], использованные в работе.

как все равно имеется некоторая свобода в выборе критерия корреляции, оговаривавшаяся в разд. 3.

Не располагая собственными образцами малых размеров, отвечающих условию $L \approx \lambda$, для иллюстрации статистического метода оценки величины λ мы заимствовали данные по разбросу токов из статьи [9] (см. вставку на рис. 3). Из этих данных, экспериментальное значение μ оказывается равным 0.102. Считая, что $L = 2.3$ мкм (квадратный корень из площади затвора в [9]) и что $\sigma_d \approx 0.2$ нм, мы находим $L/\lambda \approx 50$, а значит, $\lambda \approx 40$ нм. Случайным образом, эта величина почти повторяет результат измерений в предыдущем разделе, хотя в какой-то мере такое совпадение может являться отражением сходства условий окисления в [9] и в нашей работе.

4.2. Анализ данных мониторинга пробоя

Как продемонстрировано в работе [8], при определенных условиях мягкой пробой диэлектрика в туннельной МДП структуре может сопровождаться скачком тока

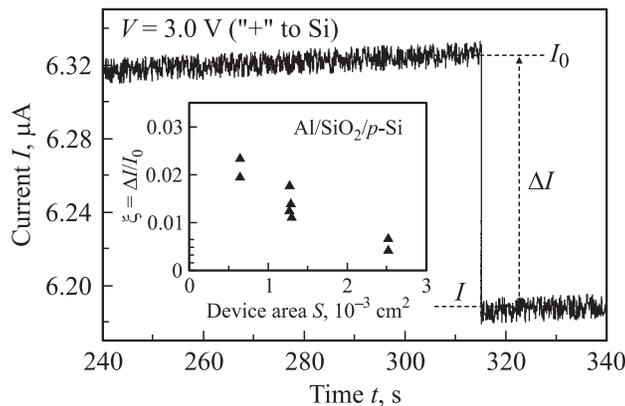


Рис. 4. Резкое уменьшение тока в процессе испытания туннельной МДП структуры на достаточно высоком постоянном напряжении ($S = 1.26 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$). На вставке — величина относительного спада тока при мягком пробое структур различной площади.

не вверх, а вниз. Действительно, если принять, что локальная вольт-амперная характеристика неповрежденной части структуры является экспоненциальной, а зоны пробоя — омической, то, какими бы ни были параметры туннелирования, при достаточно больших напряжениях $|V| > V^*$ сопротивление шунта окажется выше сопротивления той же области до ее повреждения, вследствие чего полный ток снизится. При электрической перегрузке образца первыми пробиваются его самые тонкие участки, т.е. — в нашей модели — ячейка с минимальной толщиной диэлектрика. С учетом сказанного, при $|V| > V^*$ эта ячейка фактически исключается из токопереноса, поскольку ток в ней увеличивается с напряжением $|V|$ гораздо медленнее, чем в неповрежденных частях прибора.

Предлагаемый метод оценки параметра λ предполагает проведение измерений относительного спада тока при акте мягкого пробоя, т.е. величины

$$\xi = \frac{|I - I_0|}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0},$$

где I_0 и I обозначают токи до и непосредственно после пробоя. Далее, если известна величина среднеквадратичного отклонения толщины σ_d , то можно вычислить совокупную долю площади наиболее тонких участков η , на которые приходится доля тока ξ . После этого величина λ находится как $\lambda \approx (\eta S)^{1/2}$.

На рис. 4 приведена типичная эпюра тока через туннельную МДП структуру, записанная при $|V| > V^*$, а на врезке — результаты измерений величины ξ в образцах различной площади S . Предварительно было установлено, что для серии структур, использованных для получения рис. 4, параметр σ_d составлял 0.30 нм (ТЕМ-измерения). Как видно, в случае, представленном на рис. 4, относительное уменьшение тока ξ равно $\sim 10^{-2}$. При этом для случая $\sigma_d = 0.3 \text{ нм}$ расчет показывает, что 1% полного тока должен протекать через 10^{-8}

($\eta = 10^{-8}$) площади структуры S (см. [8]). Отсюда получаем $\lambda \approx (10^{-8} S)^{1/2} \approx 40 \text{ нм}$. Исследования пробоя приборов различных размеров (см. вставку на рис. 4) позволяют убедиться в независимости этого результата от площади: значения ξ и, следовательно, η примерно обратно пропорциональны S , как это и должно быть при $\Delta I \ll I_0$.

Заметим, что оцененная новым способом величина пространственного масштаба λ оказалась весьма близкой к значениям, полученным на наших образцах с применением микроскопа атомных сил, что свидетельствует о состоятельности методики.

5. Заключение

В работе было предложено и опробовано два новых метода оценки характерного пространственного масштаба λ („длины корреляции“) флуктуаций толщины туннельно-тонкого диэлектрика. Знание параметра λ для изучаемых слоев весьма важно, поскольку этот параметр наряду со среднеквадратичным отклонением толщины пленки диэлектрика σ_d является интегральным показателем уровня технологии.

Оба метода базируются на обработке результатов измерений электрических характеристик туннельных МДП структур. Первый предполагает проведение анализа данных статистического разброса тока в случайной выборке приборов. Второй основан на использовании особенностей мягкого пробоя МДП структур при достаточно высоких напряжениях. Для демонстрации методов использовались туннельные диоды Al/SiO₂/Si с относительно большой для слоев SiO₂ неоднородностью распределения толщины.

Основное преимущество новых способов оценки величины λ — их простота. Однако при малых значениях дисперсии толщины диэлектрика применение этих методов может стать невозможным. Поэтому представляется, что они потенциально более интересны в приложении не к тонким слоям SiO₂ в полевых транзисторах, а к пленкам, для которых предельно малые значения σ_d пока технологически недостижимы.

Авторы признательны РФФИ за поддержку (грант 05-02-17827).

Список литературы

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors (<http://www.itrs.net>).
- [2] A. Asenov, S. Kaya, J.H. Davies. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-49** (1), 112 (2002).
- [3] A. Petru. Ph. D. Dissertation, Univ. of Maryland, USA (2004).
- [4] M. Houssa, T. Nigam, P.W. Mertens, M.M. Heyns. Sol. St. Electron., **43** (1), 159 (1999).
- [5] M.I. Vexler, A.F. Shulekin, Ch. Dieker, V. Zaporozhchenko, H. Zimmermann, W. Jäger, I.V. Grekhov, P. Seegebrecht. Sol. St. Electron., **45** (1), 19 (2001).

- [6] B. Majkusiak, A. Strojwas. J. Appl. Phys., **74** (9), 5638 (1993).
- [7] S.E. Tyaginov, M.I. Vexler, A.F. Shulekin, I.V. Grekhov. Sol. St. Electron., **49** (7), 1192 (2005).
- [8] R. Khlil, A. El Hdiy, A.F. Shulekin, S.E. Tyaginov, M.I. Vexler. Microel. Reliab., **44** (3), 543 (2004).
- [9] M. Koh, K. Iwamoto, W. Mizubayashi, H. Murakami, T. Ono, M. Tsuno, T. Mihara, K. Shibahara, S. Yokoyama, S. Miyazaki, M.M. Miura, M. Hirose. IEDM Tech. Dig., 919 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Extraction of the characteristic length of thickness fluctuation for a tunnel-thin insulator in MIS structures from the data of electrical measurements

*S.E. Tyaginov, M.I. Vexler, I.V. Grekhov,
V. Zaporozhchenko**

Ioffe Physicotechnical Institute
of the Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Technische Fakultät der Universität Kiel,
D-24143 Kiel, Deutschland

Abstract The novel methods for estimation of the „correlation length“ of thickness fluctuations in a thin insulator film from the data of measurements of the electrical characteristics of MIS tunnel structures, i.e. without using any microscopy techniques, have been put forward and verified. One of the methods proposed for such estimation relies on the statistical treatment of results of current measurements for a random selection of samples. Another method is based on the analysis of current jumps down, occurring under the constant-voltage stress of samples at a sufficiently high bias. These methods are tested with the Al/SiO₂/Si tunnel structures. Estimated values of characteristic length of thickness fluctuations are compared to the results of the direct measurement of this length for the same oxide layers.