

Мягкий пробой как причина спада тока в туннельной МОП структуре

© А.Ф. Шулекин[¶], С.Э. Тягинов, R. Khilil*, A. El Hdiy*, М.И. Векслер

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

* LASSI/DTI, CNRS-UMR 6107, UFR Sciences BP 1039,
F-51687, Reims cedex 2, France

(Получена 10 ноября 2003 г. Принята к печати 11 ноября 2003 г.)

Изучено влияние электрического стресса на вольт-амперные характеристики МОП диодов Al/SiO₂/p⁺-Si с туннельно-тонким диэлектриком (2.5–3.0 нм). Проведены испытания образцов при постоянном токе и при постоянном напряжении. В процессе стресса при постоянном напряжении, наряду с увеличением тока, связанным с мягким пробоем, в некоторых случаях отмечено скачкообразное уменьшение тока. Подобный срыв тока имеет место преимущественно при высоких напряжениях и может быть обусловлен специфическим проявлением мягкого пробоя. При сильной пространственной дисперсии толщины SiO₂ данный эффект играет существенную роль, даже если пробой локализован в достаточно малой области.

1. Введение

Процесс миниатюризации полевых МОП транзисторов требует все более тонких слоев диоксида кремния в качестве подзатворного диэлектрика. В современных транзисторах (MOSFETs) используются диэлектрики толщиной 3–4 нм и подложки с легированием $\sim 10^{18}$ см⁻³ [1], однако исследование транзисторов, имеющих более тонкий диэлектрик или большую степень легирования, вызывает также существенный интерес [2].

В данной работе проводилось исследование мягкого пробоя МОП диодов с туннельно-тонким SiO₂, изготовленных на подложках из p-кремния с уровнем легирования $N_A = 2 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Качественно разрушение тонкого окисла часто рассматривается как процесс, состоящий из трех стадий [3]: вызванное перегрузкой образца увеличение тока при фиксированном напряжении, мягкий пробой (soft breakdown) и, наконец, жесткий пробой. Мягким пробоем [4] называется локальный пробой диэлектрика без последующего расширения пробитой области, в отличие от жесткого (катастрофического) пробоя, при котором локальное повреждение может распространиться на всю площадь прибора.

Резкое увеличение тока представляется естественным и безальтернативным следствием мягкого пробоя [3–6]. Однако в данной работе будет показано, что наряду с увеличением тока может и должен наблюдаться также его скачкообразный спад, хотя это и выглядит несколько неожиданно.

2. Модель спада тока после мягкого пробоя

Для простоты примем, что область мягкого пробоя представляет собой часть площади МОП структуры, локальная вольт-амперная характеристика которой близ-

ка к омической, в отличие от неповрежденных частей, где она туннельная (грубо — экспоненциальная [7], рис. 1).

При малых напряжениях V на приборе общий ток в структуре после мягкого пробоя скачком растет из-за вклада дефектной области. Однако туннельное сопротивление резко уменьшается с увеличением напряжения, и при любых параметрах туннелирования оно, в конце концов, оказывается меньше, чем любое омическое. Другими словами, туннельная экспонента рано или поздно пересечет линейную зависимость тока от напряжения для области пробоя ($V = V^*$ на рис. 1). Таким образом, из достаточно простых соображений следует, что при $V > V^*$ должен наблюдаться спад, а не рост тока после мягкого пробоя.

Естественно предположить [6], что размеры проводящей области, формирующейся благодаря мягкому пробую, (breakdown spot) достаточно малы. Поэтому возникают сомнения в реальности экспериментального наблюдения спада тока. Действительно, если плотность

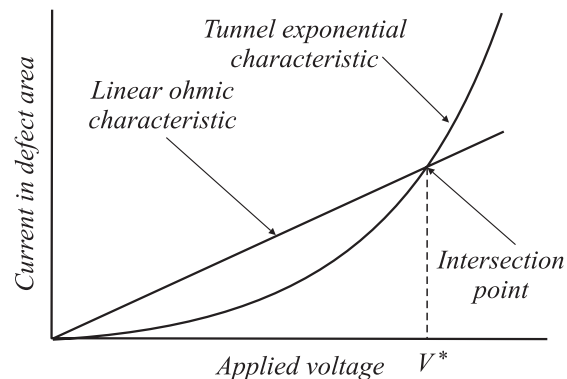


Рис. 1. Схематические вольт-амперные характеристики неповрежденной части площади МОП структуры (экспоненциальная зависимость) и области мягкого пробоя (линейная зависимость). При высоких напряжениях ($|V| > |V^*|$) туннельное сопротивление становится меньше омического.

[¶] E-mail: shulekin@pop.ioffe.rssi.ru

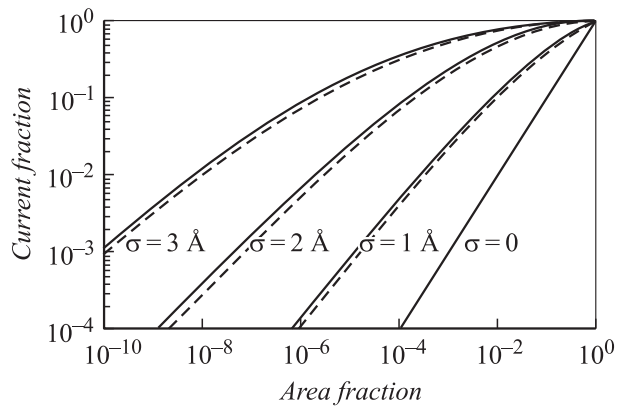


Рис. 2. Зависимость доли тока, текущей через наиболее тонкую область прибора, от относительной площади данной области при различных значениях среднеквадратичного отклонения толщины окисла σ . Номинальная толщина SiO_2 25 Å, уровень легирования $p\text{-Si}$ $N_A = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Температура $T = 300 \text{ К}$. Напряжение $V = -2 \text{ В}$ (сплошная линия) и -3 В (штриховая).

тока однородна, то даже полное исключение области пробоя из переноса заряда не приведет к измеримому уменьшению тока через прибор. Однако, поскольку всегда имеется неоднородность распределения толщины окисла по площади, а пробиваются всегда самые тонкие участки, влияние дефектной области на величину тока радикально возрастает.

На рис. 2 приведена зависимость доли тока, протекающей через наиболее тонкую область структуры, от относительной площади данной области для разных значений среднеквадратичного отклонения толщины SiO_2 от ее номинального значения (σ). Данная зависимость была получена в рамках модели, аналогичной [8]. Видно, что уже при $\sigma \approx 0.1 \text{ нм}$ (заметим, что в лучших промышленных образцах σ составляет $\sim 0.15 \text{ нм}$ [9]) 10^{-4} полного тока проходит через 10^{-6} общей площади прибора.

Получается, что наличие (или искусственное создание) существенной пространственной дисперсии толщины SiO_2 делает возможным заметный спад тока в результате мягкого пробоя даже при весьма малой площади поврежденной области образца.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для измерений использовались туннельные МОП диоды, изготовленные на подложке из легированного бором $p^+\text{-Si}$ кристаллической ориентации (111). Тонкий окисел (SiO_2) был выращен в сухой смеси O_2 (20%) и N_2 при температуре 700°C ; средняя толщина окисла составляла $\sim 2.7 \text{ нм}$, а $\sigma \approx 0.3 \text{ нм}$. Круглые Al-контакты (площадь $S = 1.26 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$) наносились при 200°C .

Достаточно большое значение параметра σ проявляется в том, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) наших образцов очень хорошо совпадают с теоретически

рассчитанными [10] для несколько меньших толщин диэлектрика, 2.2–2.3 нм.

Образцы подвергались испытаниям при постоянном токе (constant current stress — CCS) и при постоянном напряжении (constant voltage stress — CVS). В CCS-режиме постоянный ток поддерживался на уровне $5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, а в режиме CVS напряжение фиксировалось в диапазоне 1.0–3.5 В. Одновременно записывались изменения со временем соответственно напряжения и тока. После каждой серии испытаний измерялись вольт-амперные характеристики. Все измерения проводились при температуре $T = 300 \text{ К}$ в темноте (для исключения влияния фотоэффекта).

Характерные примеры эволюции тока со временем для CVS-измерений показаны на рис. 3. Плавные изменения возникают обычно сразу после подачи напряжения на структуру и связаны с захватом носителей ловушками на границе раздела. Скачкообразный срыв тока может происходить как в сторону больших значений (рис. 3, а), так и в сторону меньших (рис. 3, б). Новым в данной работе является обнаружение спада тока. Он отчетливо выражен на рис. 3, б ($> 1\text{--}3\%$) и наблюдался на многих исследованных приборах. Заметим, что при одном и том же напряжении (или при близких напряжениях) могут наблюдаться скачки тока как вверх, так и вниз. Сформулированную в разд. 2 модель можно согласовать с данным экспериментальным фактом, если допустить

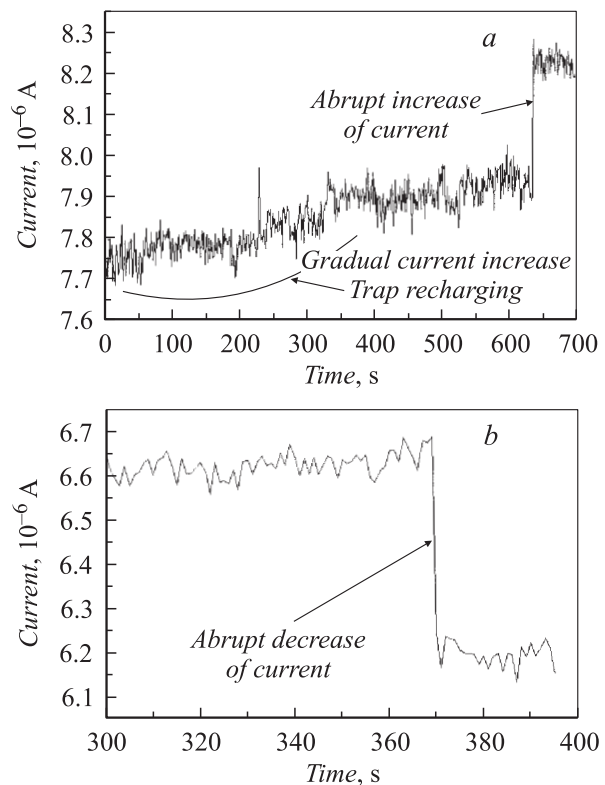


Рис. 3. Изменения тока в ходе испытаний при постоянном напряжении: а — плавное и скачкообразное увеличение тока, $V = -3.5 \text{ В}$; б — скачкообразное уменьшение тока, $V = -3 \text{ В}$.

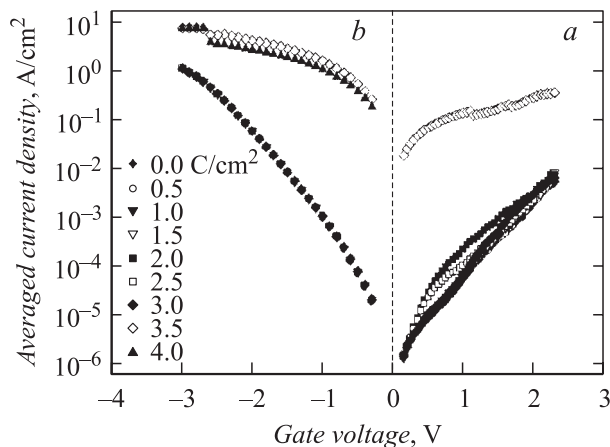


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики после серии стрессов при инжекции электронов из подложки (*a*) и из металла (*b*). Приведены средние по площади значения заряда, прошедшего через структуру до записи соответствующей кривой. *a, b* — разные образцы.

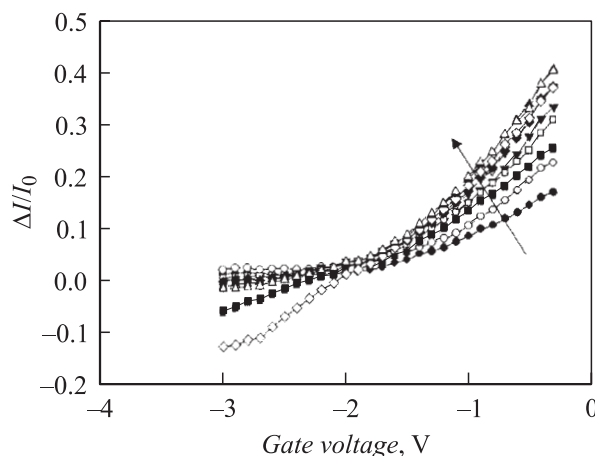


Рис. 5. Отношение $\Delta I/I_0 = (I_{st} - I_0)/I_0$ как функция напряжения на структуре в наиболее типичном случае: ΔI положительно в области низких напряжений и отрицательно при высоких $|V|$. Стрелка показывает эволюцию характеристик в ходе испытаний.

разброс величины V^* для различных актов пробоя в одном образце и между образцами.

Рассмотрим теперь изменение вольт-амперной характеристики в целом (рис. 4). Для небольших по величине напряжений $|V|$ наблюдается увеличение тока, в то время как в области больших значений напряжения происходит отчетливое его уменьшение. Рис. 5 дополняет информацию о подобном поведении: построена зависимость $(I_{st} - I_0)/I_0 = \Delta I/I_0$ от прикладываемого напряжения (I_{st} было записано после, а I_0 до стресса) для еще одного образца. Приведенные на рис. 4, 5 результаты хорошо объясняются в рамках предложенной модели. Сопротивление дефектной области при больших напряжениях ($|V| > |V^*|$) становится больше, чем туннельное сопротивление (см. рис. 1), что приводит к уменьшению

тока. В области малых напряжений возникает противоположная ситуация, поэтому ток увеличивается.

На некоторых приборах наблюдался только рост тока, но следует подчеркнуть, что он был значительным лишь при малых напряжениях, а при больших почти незаметным. Такое поведение также говорит в пользу обсуждаемой модели спада тока. По-видимому, в таких структурах напряжение V^* не достигается, хотя ослабление роста тока и свидетельствует о приближении к нему.

Располагая данными рис. 2, можно оценить снизу (предполагая полное отсутствие тока в пробитой области) характерный размер дефектной области l_{def} . В наших образцах, где $\sigma \approx 0.3$ нм, 1% тока течет всего лишь через 10^{-8} площади прибора. Считая, что спад тока составляет 1%, получаем оценку минимального размера $l_{def} \approx (10^{-8}S)^{1/2} \approx 40$ нм.

Таким образом, в данной работе впервые удалось зарегистрировать спад тока через туннельную МОП структуру после мягкого пробоя. Следует заметить, что при дальнейшей миниатюризации полевых транзисторов обнаруженный эффект может стать более существенным, так как при уменьшении размеров прибора относительная площадь дефектной области увеличивается.

4. Заключение

Проведены исследования поведения туннельных МОП диодов $Al/SiO_2/p^+-Si$ с толщиной SiO_2 2.5–3.0 нм при перегрузке в режимах постоянного тока и постоянного напряжения. Обнаружено нетривиальное скачкообразное уменьшение тока, проявляющееся преимущественно в области высоких напряжений, что трактуется как одно из следствий мягкого пробоя. Еще более существенным эффектом спада тока должен быть в образцах малой площади и (или) с существенным пространственным разбросом толщины окисла, что повышает относительную роль пробитой области в формировании полного тока.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации НШ-758.2003.2 ведущих научных школ; авторы выражают благодарность программе ФТНС-2003.

Список литературы

- [1] SEMATECH. *The international technology roadmap for semiconductors*. <http://public.itrs.net/home.htm> (2001).
- [2] B. Yuwono, T. Schloesser, A. Gschwandtner, G. Innertsberger, A. Grassl, A. Olbrich, W.H. Krautschneider. *Microelectron. Eng.*, **48**, 51 (1999).
- [3] R. Degraeve. *Reliability of Ultra-Thin Oxide Gate Dielectrics, 9th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (Tutorial)*, (Leuven, IMEC, 1998).
- [4] M. Depas, T. Nigam, M.M. Heyns. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-43** (9), 1499 (1996).
- [5] F. Crupi, R. Degraeve, G. Groeseneken, T. Nigam, H.E. Maes. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-45** (11), 2329 (1996).

- [6] E. Miranda, J. Suñé, R. Rodríguez, M. Nafria, X. Aymerich. Jap. J. Appl. Phys., **38** (1), 80 (1999).
- [7] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 2, гл. 9.
- [8] M.I. Vexler, A.F. Shulekin, Ch. Dieker, V. Zaporozhchenko, H. Zimmermann, W. Jaeger, I.V. Grekhov, P. Seegebrecht. Sol. St. Electron., **45** (1), 19 (2001).
- [9] H.S. Momose, S. Nakamura, T. Ohguro, T. Yoshitomi, E. Morifuji, T. Morimoto, Y. Katsumata, H. Iwai. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-45** (3), 691 (1998).
- [10] J.P. Shiely. *Simulations of tunneling in MOS devices* (Duke University, 1999).

Редактор Л.В. Шаронова

The soft breakdown causing a current decrease in MOS tunnel structures

A.F. Shulekin, S.E. Tyaginov, R. Khlii*, A. El Hdiy*, M.I. Vexler

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* LASSI/DTI, CNRS-UMR 6107,
UFR Sciences BP 1039,
F-51687, Reims cedex 2, France

Abstract An influence of electric stress on the current–voltage characteristics of Al/SiO₂/p⁺-Si MOS diodes with the tunnel-thin (2.5–3.0 nm) dielectric has been studied. Conventional tests of specimens have been made in the constant-current and constant-voltage regimes. Along with the soft-breakdown-related increase in current, unusual abrupt drops in current have been observed during the constant voltage stress. Such a reduction of current appeared predominately under high bias condition and may be considered as a peculiar consequence of the same soft breakdown events. In the case of the substantial spatial oxide thickness non-uniformity, this effect is important even if it is localized inside a fairly small volume.