

Деградация туннельных МОП структур при высокой плотности тока

© И.В. Грехов, А.Ф. Шулекин, М.И. Векслер

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

(Получена 17 июля 1997 г. Принята к печати 29 июля 1997 г.)

Исследована стойкость туннельно-тонких ($2 \div 3$ нм) пленок SiO_2 к длительному протеканию токов высокой плотности ($10^2 \div 10^3$ А/см²). Обнаружено резкое возрастание заряда, который туннельная МОП структура способна пропустить через себя без деградации при переходе от инжекции Фаулера–Нордгейма к прямому туннелированию (соответственно 10^3 Кл/см² и 10^7 Кл/см²). Исследование деградации пленок SiO_2 проводилось с использованием тиристорных структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}/p^+\text{-Si}$ при положительном смещении на полупроводнике, т.е. при обратном смещении МОП структуры. Это позволило обеспечить однородность распределения тока по площади, а также контролировать состояние диэлектрического слоя путем измерения усиления прибора в фототранзисторном режиме.

Введение

Возросший интерес к МДП структурам с туннельно-тонкими ($\approx 1.5 \div 3$ нм) пленками диоксида кремния (SiO_2) определяется тем, что толщина подзатворного диэлектрика в полевых транзисторах вплотную приблизилась к туннельной [1–5], и более того, становится ясно, что применение туннельных слоев SiO_2 в качестве подзатворного диэлектрика не только вполне возможно, но и позволяет существенно улучшить основные параметры приборов [6]. Возможность такого использования туннельных МОП структур делает более реальным их применение и в других областях, в частности, в качестве эффективных инжекторов носителей заряда в Si в транзисторах и тиристорах с туннельным МОП эмиттером, тем более, что в этой области накоплен существенный объем материала [7–14].

Указанные применения туннельных МОП структур предполагают функционирование последних в режиме обратного смещения с протеканием тока достаточно высокой плотности (до 10^3 А/см² [8,11–13] при использовании в качестве инжектора). Поэтому становится актуальным исследование "стойкости" туннельно-тонкого окисла к протеканию тока, так как систематических исследований деградации туннельных МОП структур при переносе заряда (которая давно и интенсивно изучается для более толстых (≥ 3 нм) пленок SiO_2 [3–5]) пока не предпринималось. Имеющиеся данные по деградации туннельных структур крайне ограничены: они охватывают лишь диапазон токов менее 1 А/см² [6,15], и, почти исключительно, режим прямого смещения МОП структуры [1,15].

В настоящей работе делается попытка определить "стойкость" туннельных МОП структур, т.е. предельный прошедший заряд, не вызывающий деградацию, а также физические причины, определяющие величину указанного заряда при высоких ($10^2 \div 10^3$ А/см²) плотностях тока и обратном смещении.

Факторы, определяющие деградацию МОП структуры с "толстым" и туннельно-тонким диэлектриком при протекании тока

В изучении деградации относительно толстых (> 4 нм) пленок SiO_2 при протекании тока накоплен значительный объем материала [1–5]. В таких структурах заметные токи начинают протекать только при поле в диэлектрике порядка 10^7 В/см. При инжекции Фаулера–Нордгейма электроны (дырки) попадают в разрешенную зону окисла в результате их туннелирования через треугольный барьер (см., например, рис. 1, а), а затем переносятся по ней. Такой перенос опасен, с точки зрения деградации, возможностью энергетической релаксации (рекомбинации носителей зона–зона, а также через уровни внутри запрещенной зоны SiO_2) этих электронов непосредственно в слое окисла. В процессе такой релаксации могут

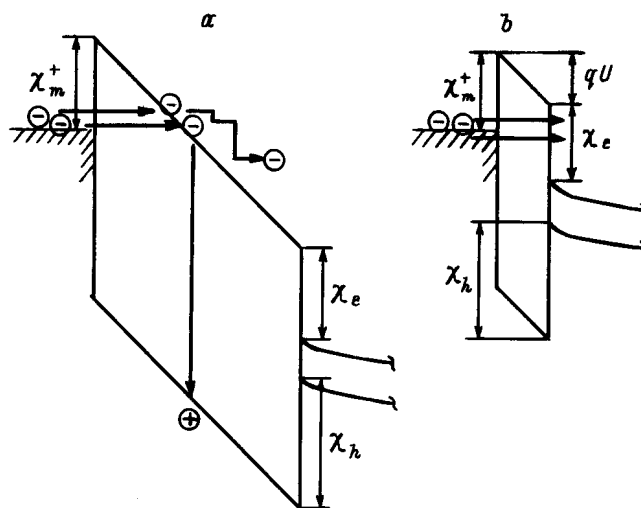


Рис. 1. Перенос заряда в МОП структурах со слоем SiO_2 : а — "толстым", б — туннельно-тонким.

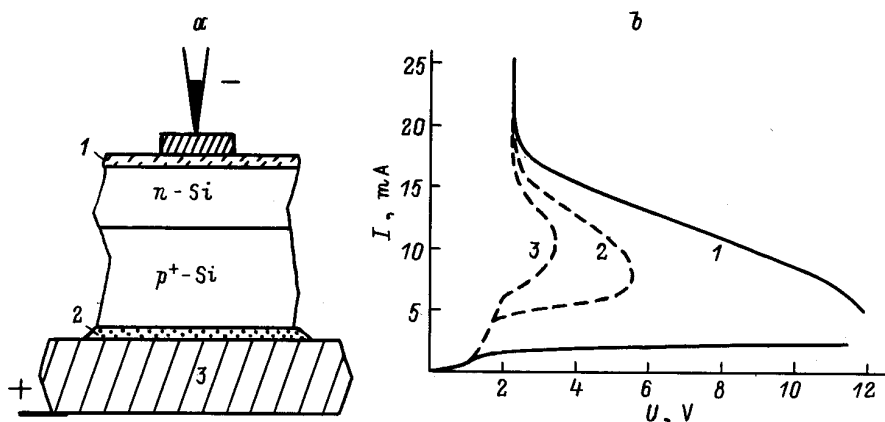


Рис. 2. Схема тиристорной структуры Al/SiO₂/n-Si/p⁺-Si, использованной для изучения стойкости туннельно-тонких пленок SiO₂ (а) и типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) такой структуры (при толщине SiO₂ $t = 2.5$ нм) в диапазоне относительно малых плотностей тока (б). На рис. а: 1 — туннельно-тонкий окисел, 2 — жидкий сплав In-Ga, 3 — хладопровод из Cu. На рис. б — ВАХ: 1 — в темноте; 2, 3 — при разных уровнях интенсивности внешнего освещения. Площадь прибора $1.26 \cdot 10^{-3}$ см².

одномоментно выделяться большие порции энергии, что сопровождается генерацией новых дефектов.

В противоположность описанному, в МОП структурах с более тонким слоем SiO₂ (тоньше 3 нм) заметный перенос заряда начинается уже при значительно меньших полях в диэлектрике (например 10^6 В/см), когда преобладающим механизмом переноса электронов является прямое туннелирование (рис. 1, б). Вследствие этого, вплоть до определенного напряжения, соответствующего трансформации туннельного барьера из трапециoidalного в треугольный, протекание тока не сопровождается появлением в разрешенной зоне диэлектрика инжектированных носителей.

Поэтому для туннельных структур можно ожидать, во-первых, существенного роста "стойкости" к протеканию тока (количественно характеризуемой величиной полного перенесенного заряда, вызывающего деградацию), а также катастрофического снижения этой стойкости при определенном напряжении на окисле, соответствующем переходу к инжекции Фаулера-Нордгейма. Такая особенность МОП структур при прямом смещении наблюдалась в работе [1] для образцов с относительно толстым слоем диэлектрика в $3 \div 4$ нм (изменение механизма переноса заряда имело место при плотности тока $10^{-2} \div 10^{-4}$ А/см²).

Что касается функционирования туннельного прибора в режиме прямого туннелирования, то при полном отсутствии в запрещенной зоне окисла уровней, на которые бы могли быть захвачены электроны (при отсутствии возможности энергетической релаксации с выделением значительной энергии), его "ресурс" представляется неограниченным. Действительно, в работе [15] обнаружено, что критический заряд, вызывающий деградацию туннельной МОП структуры, очень велик (более 10^6 Кл/см²); испытания проводились при плотности тока менее 1 А/см².

Постановка эксперимента по исследованию деградации туннельных МОП структур. Изготовление образцов

В эксперименте исследовались структуры Al/(туннельно-тонкий SiO₂)/n-Si/p⁺-Si (рис. 2, а) в режиме положительного смещения на полупроводнике.

В этом случае структура представляет собой тиристор с "верхним" туннельным МОП эмиттером, с индуцированной p-базой (инверсным слоем на границе окисел/Si), объемом Si, играющим роль n-базы, и "нижним" p⁺-эмиттером. Вольт-амперная характеристика такой структуры S-образна (рис. 2, б). Прибор может работать как в активном режиме (режим относительно малых токов), так и переключаться в самоподдерживающееся включенное состояние с равномерным распределением тока по площади [12]. Поддержание включенного состояния обеспечивается, во-первых, за счет обычной "тиристорной" положительной обратной связи [10,16], а, во-вторых, за счет оже-ионизации атомов Si [8,12], осуществляемой горячими электронами, инжектируемыми из металла в полупроводник туннельным МДП переходом.

В режимах до переключения величина тока через структуру определяется поставкой основных носителей в базу тиристора (в особенности, в инверсную p-базу), а также усилением "верхнего" (туннельной МОП секции) и "нижнего" транзисторов. Управлять тиристором в этом режиме можно как подачей базового тока, так и освещением структуры. Деградация слоя SiO₂ приводит к резкому снижению усиления туннельного МОП транзистора (из-за роста утечки дырок из инверсного слоя в металл), т.е. ток через прибор в активном режиме оказывается сильно зависящим от состояния туннельно-тонкого окисла.

Приборы (рис. 2, а) изготавливались на основе эпитаксиальной структуры: подложка *p*-типа с удельным сопротивлением $\rho = 0.005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ с эпитаксиальным *n*-слоем ($\rho = 0.3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) толщиной 9 мкм; общая толщина пластины — 300 мкм. Туннельно-тонкий окисел выращивался термическим окислением в сухом кислороде при $T = 700^\circ\text{C}$; толщина пленки SiO_2 составляла около 2.5 нм. Диаметр "верхнего" алюминиевого электрода составлял 400 мкм. При проведении измерений надлежащий тепловой контакт с медным радиатором обеспечивался за счет слоя жидкого эвтектического сплава In-Ga , находившегося между тыльной стороной подложки и радиатором.

Результаты эксперимента

Измерения заключались в том, что прибор вводился в режим "включенного" состояния, которому соответствует равномерное распределение тока, и выдерживался в таком режиме длительное время — вплоть до начала деградации SiO_2 . В процессе испытаний напряжение (и ток через прибор) периодически кратковременно уменьшалось и осуществлялся контроль величины усиления в активном режиме при фиксированной величине приложенного напряжения и интенсивности внешней подсветки. Кроме того, об изменении свойств структуры можно было судить по изменению параметров *S*-образной тиристорной вольт-амперной характеристики (ВАХ). Для определенности было принято, что "деградация" — это заметное снижение коэффициента усиления структуры в фототранзисторном режиме (примерно на 10%).

Диапазон токов через образец, в котором время деградации изменялось от десятков часов до нескольких секунд, составлял от 0.5 до 1.5 А (плотность тока от $4 \cdot 10^2$ до $1.3 \cdot 10^3 \text{ А}/\text{см}^2$), а типичная величина падения напряжения на приборе при этом была в пределах 3 ÷ 4 В.

Проведенные оценки возможного нагрева образца за счет протекания тока показали, что, ввиду небольшого размера верхнего электрода, разность температур ΔT между наиболее нагретой областью образца (вблизи интерфейса Si/SiO_2) и радиатором не превышает $\Delta T = 60 [\text{K}/\text{A}]I_0$ (где I_0 — ток через образец в А). Это позволяет утверждать, что тепловые явления не являлись ответственными за деградацию структур.

Основным экспериментальным результатом является демонстрация высокой стойкости туннельно-тонкого (2 ÷ 3 нм) окисла к протеканию через него тока высокой плотности (до $10^3 \text{ А}/\text{см}^2$) в режиме прямого туннелирования. При этом критический перенесенный заряд, вызывающий деградацию пленки SiO_2 , оказывается значительно выше, чем в режиме инжекции Фаулера–Нордгейма (рис. 3).

Так, например, при протекании тока плотностью $j = 500 \text{ А}/\text{см}^2$ деградация стала заметна (снизилось усиление и несколько изменились параметры *S*-образной

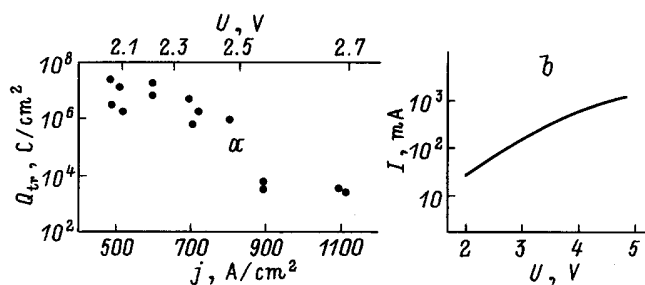


Рис. 3. а — величина заряда, прошедшего через туннельно-тонкий слой SiO_2 до его деградации Q_{tr} в зависимости от плотности тока j (внижняя шкала) и от оценочной величины напряжения на диэлектрике U (верхняя шкала). б — вольт-амперная характеристика исследованной структуры во "включенном" состоянии с высокой плотностью тока.

ВАХ) только после примерно 40 ч работы, что соответствует перенесенному заряду порядка $5 \cdot 10^7 \div 10^8 \text{ Кл}/\text{см}^2$. Это значительно больше (примерно на 4 порядка), чем для "толстых" МОП структур (режим инжекции Фаулера–Нордгейма), для которых величина перенесенного заряда, приводящая к полной деградации структуры, составляет примерно $10^3 \text{ Кл}/\text{см}^2$ при толщине окисла около 4 нм [3–5]. При испытании структур в течение 40 ч при плотности тока $350 \text{ А}/\text{см}^2$ заметных проявлений деградации обнаружить не удалось.

При повышении плотности тока до $700 \div 1000 \text{ А}/\text{см}^2$ приборы деградировали значительно быстрее, причем при $1200 \text{ А}/\text{см}^2$ они были способны работать лишь в пределах нескольких секунд. Перенесенный до деградации прибора заряд при этом составлял величину порядка $10^3 \text{ Кл}/\text{см}^2$ с существенным разбросом от прибора к прибору.

Подчеркнем, что во всех режимах джоулев разогрев не играл заметной роли.

Интерпретация результатов эксперимента

Как видно из приведенных данных, предположение о принципиальном повышении стойкости МОП структур к протеканию тока при переходе от режима фаулер-нордгеймовской инжекции к прямому туннелированию находит свое подтверждение в эксперименте. Действительно, перенесенный без деградации структуры заряд возрастает радикально (на 4 порядка), а снижение стойкости до уровня толстых МОП структур (при определенной плотности тока $j \approx 1000 \text{ А}/\text{см}^2$) является следствием перехода к переносу заряда по механизму Фаулера–Нордгейма. При этом переход от высокой стойкости к низкой осуществляется в достаточно узком интервале плотностей тока (рис. 3, а).

Последнее вполне понятно, так как при любых параметрах туннельной системы доля фаулер-нордгеймовской компоненты j_{FN} в полном токе через SiO_2 j_{tot} резко

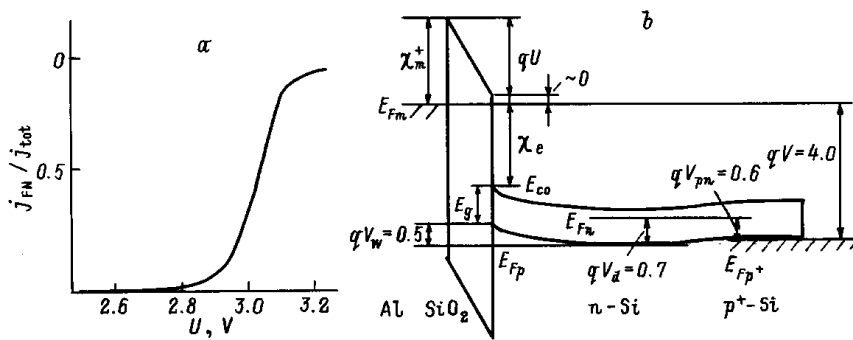


Рис. 4. *a* — рассчитанная доля фаулер-нордгеймовской компоненты тока j_{FN} в полном токе j_{tot} в зависимости от напряжения на диэлектрике U . Параметры расчета: электронная масса в SiO_2 $m_i = 0.5m_0$, $\chi_e = \chi_m^+ = 3$ эВ, толщина SiO_2 — 3 нм; *b* — энергетическая зонная диаграмма исследованной структуры во ”включенном” состоянии; численные значения разностей потенциалов приведены в эВ. Здесь E_{Fm} — уровень Ферми в металле, E_{Fp} — квазиуровень Ферми для дырок в инверсионном слое, E_{Fn} — уровень Ферми в толще n -материала, E_{Fp}^+ — уровень Ферми в p^+ -подложке.

растет от 0 до 1 при трансформации туннельного барьера от трапециoidalного к треугольному. Убедиться в этом можно путем расчета указанной доли как функции напряжения U на диэлектрике (рис. 4, *a*).

Воспользуемся следующим выражением для плотности туннельного тока [17]:

$$j = \frac{4\pi m_e^* q}{h^3} \int \frac{dE}{1 + \exp[(E - E_{Fm})/kT]} \int_0^E \theta(E_z) dE_z, \quad (1)$$

где E — полная энергия электрона, E_z — энергия его движения в направлении туннелирования, $\theta(E_z)$ — вероятность туннелирования [7,11], m_e^* — эффективная масса электронов в плоскости границы раздела Si/SiO_2 ($m_e^* \approx 2.1m_0$ [16]). Энергия E отсчитывается от дна зоны проводимости E_{Co} (рис. 4, *b*). Для вычисления тока прямого туннелирования нужно взять в качестве пределов интеграла $0 \leq E \leq \chi_e$, где χ_e — величина разрыва зоны проводимости на границе Si/SiO_2 , а для тока Фаулера–Нордгейма — значения χ_e и $\chi_e + qU$. На рис. 4, *a* показан пример результатов такого расчета, из которого следует, что доля тока Фаулера–Нордгейма j_{FN} в общем токе j_{tot} растет от 0 до 1 при изменении напряжения на SiO_2 в пределах примерно 0.4 В.

Кроме плотностей тока, практический интерес представляет знание величин электрического поля \mathcal{E} в туннельно-тонком SiO_2 в исследованных режимах. В исследованных структурах при обратном смещении (рис. 4, *b*), помимо падения напряжения на диэлектрике U , имеется заметное падение напряжения в инверсионном слое V_w , слое пространственного заряда в n -области V_d и на $p^+ - n$ -переходе V_{pn} :

$$\chi_m^+ - qU - \chi_e - E_g - qV_w + qV_d + qV_{pn} + qV = 0, \quad (2)$$

где χ_m^+ — высота барьера на границе металл–диэлектрик (рис. 4, *b*). Таким образом, зная величину напряжения на всей структуре V , можно оценить U (или \mathcal{E} , если

привлечь теорию транзистора с туннельным МОП эмиттером [13,14]).

Для наиболее интересного режима $V = V_c$, соответствующего переходу к быстрой деградации (из эксперимента $V_c \approx 4$ В), величина V_d составляет примерно $V_d \approx 0.7$ В, так как во ”включенном” состоянии (в котором производятся измерения) избыток дырок, поступающих к интерфейсу Si/SiO_2 , выбрасывается в толщу n -Si [7,8,11,13]. Типичная глубина квантовой ямы qV_w , формирующейся у границы Si/SiO_2 , составляет в исследуемых режимах около 0.58 эВ [13,14]. Ширина запрещенной зоны Si $E_g = 1.1$ эВ, а характерное падение напряжения на $p-n$ -переходе при этих условиях мало отличается от величины $V_{pn} = 0.6$ В. Если принять (как это сделано, например, в работе [11]), что $\chi_m^+ \approx \chi_e$ (рис. 4, *b*), то из соотношения (2) получается $U = U_0 \approx 2.5$ В (величина поля в диэлектрике $\mathcal{E} \approx 10^7$ В/см). Величина U_0 совпадает при сделанных предположениях с высотами барьеров χ_m^+ и χ_e , т.е. из проведенного эксперимента эти значения могут быть оценены как $\chi_m^+ \approx \chi_e \approx 2.5$ эВ.

Аналогично на основе моделей [11,13,14] рассчитывались значения U , приведенные на рис. 3, *a*. Тот факт, что высоты барьеров χ_m^+ и χ_e оказывается меньше, чем примерно 3.1 эВ [16] (фаулер–нордгеймовская инжекция начинается при напряжении на диэлектрике $U \lesssim 3.1$ В), не должен вызывать удивления: разрывы зон на гетерогранице Si/SiO_2 в туннельных структурах вполне могут быть заметно меньше, чем в случае ”толстых” слоев [11,18].

Имеется, по-видимому, еще одно обстоятельство, которое обуславливает несколько большую стойкость тонкого окисла в режиме фаулер–нордгеймовской инжекции (по сравнению с толстыми МОП структурами). Дело в том, что в окисле всегда имеется положительный заряд, сосредоточенный вблизи границы Si/SiO_2 [16]. Этот заряд способствует рекомбинации инжектируемых электронов через центры в SiO_2 , что является более

безопасной, с точки зрения деградации, альтернативой рекомбинации зона–зона. В толстом окисле этот заряд занимает лишь небольшую часть объема. В случае же малых толщин он может занимать весь объем SiO_2 , и его роль тем самым возрастает.

Заключение

Подытожим результаты работы.

— Экспериментально продемонстрировано возрастание на несколько порядков характерной величины заряда, который может пропустить через себя до деградации туннельная МОП структура в случае прямого туннелирования, по сравнению с режимом инжекции Фаулера–Нордгейма: соответственно 10^7 Кл/см² и $10^3 \div 10^4$ Кл/см². Последняя величина совпадает с соответствующей величиной для “толстых” МОП структур. При этом переход от высокой стойкости к низкой осуществляется в достаточно узкой области напряжений на окисле. Для исследованных структур смена механизма переноса заряда имеет место при плотности тока $500 \div 800$ А/см².

— Предложена новая методика для исследования “стойкости” туннельно-тонких ($1.5 \div 3$ нм) пленок SiO_2 , предполагающая использование тиристорных структур с туннельным МОП эмиттером. При этом обеспечивается однородность распределения тока и удобство контроля за деградацией окисла.

Авторы выражают благодарность МНТП “Физика твердотельных наноструктур”. Один из авторов (М.И. Векслер) благодарит Конкурсный центр фундаментального естествознания (GRACENAS, Санкт-Петербург) за поддержку в форме гранта “Поисковый проект”. Выражаем также благодарность О.В. Войцешенко за помощь в изготовлении образцов.

Список литературы

- [1] M. Depas, B. Vermeire, P.W. Mertens, M. Meeuris, M.M. Heyns. *Semicond. Sci. Technol.*, **10**, 753 (1995).
- [2] M. Depas, T. Nigam, M.M. Heyns. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-43**, 1449 (1996).
- [3] D.J. DiMaria. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 3004 (1996).
- [4] D.J. DiMaria, E. Cartier, D. Arnold. *J. Appl. Phys.*, **79**, 3367 (1993).
- [5] D.J. DiMaria, D. Arnold, E. Cartier. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2329 (1992).
- [6] H.S. Momose, M. Ono, T. Yoshitomi, T. Ohguro, A. Nakamura, M. Saito, H. Iwai. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-43**, 1233 (1996).
- [7] J.G. Simons, G.W. Taylor. *Sol. St. Electron.*, **29**, 287 (1986).
- [8] I.V. Grekhov, A.F. Shulekin, N.I. Vexler. *Sol. St. Electron.*, **38**, N 3, 1533 (1995).
- [9] T. Yoshimoto, K. Suzuki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, L180 (1993).
- [10] W.K. Choi, A.E. Owen. *J. Appl. Phys.*, **68**, 6447 (1990).
- [11] K.M. Chu, D.L. Pulfrey. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-35**, 188 (1988).
- [12] S.V. Belov, I.V. Grekhov, A.F. Shulekin, M.I. Vexler. *Thin. Sol. Films*, **294**, 281 (1997).
- [13] E.B. Остроумова, А.А. Рогачев. *ФТП*, **28**, 1314 (1994).
- [14] M.I. Vexler. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-42**, 656 (1995).
- [15] K.R. Farmer, M.O. Andersson, O. Engstrom. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2666 (1991).
- [16] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [17] W.A. Harrison. *Phys. Rev.*, **123**, 85 (1961).
- [18] L.A. Kasprzak, R.B. Laibowitz, M. Ohring. *J. Appl. Phys.*, **48**, 4281 (1977).

Редактор Т.А. Полянская

Degradation of tunnel MOS structures at high current density

I.V. Grekhov, A.F. Shulekin, and M.I. Vexler

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

Abstract Tunnel ($2\text{--}3$ nm) oxide reliability has been studied through long-term testing at a high current density ($10^2\text{--}10^3$ A/cm²). A dramatic reduction of tunnel MOS structure wearout, i.e. an enhancement of the charge-to-breakdown (from 10^3 C/cm² up to 10^7 C/cm²), has been found to accompany a transition from Fowler–Nordheim to direct tunneling. The study of degradation of SiO_2 films was performed using Al/ SiO_2 / $n\text{-Si}/p^+\text{-Si}$ thyristor with a reversionary biased MOS section, the positive voltage being applied to the semiconductor. The uniformity of current distribution along the device area has been ensured, and oxide degradation was checked by measuring the current gain of the device in its phototransistor-like operation mode.