

05;06.2

©1995

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В СТРУКТУРАХ Si-SiO₂ В ПРЕДПРОБОЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

*А.П.Барабан, В.В.Булавинов,
Назар С.Мустафа, С.А.Собченко*

Уменьшение размеров полупроводниковых приборов при необходимости сохранения значений управляющих напряжений на уровне 3–5 В [1] продолжает стимулировать изучение особенностей электронных процессов, происходящих в структурах Si-SiO₂, базовых структурах современной микроэлектроники, в высоких электрических полях, и разработку новых, нетрадиционных методов их исследований [2,3]. Это, в первую очередь, процессы дефектообразования в SiO₂, приводящие к зарядовой нестабильности приборов, которые одновременно можно рассматривать и как процессы диссипации энергии разогретых электронов, дополнительные к традиционно учитываемому их рассеянию на оптических и акустических фонах [4,5]. В работе [3] применение нетрадиционной системы с жидкофазным внешним контактом к диэлектрику позволило расширить область предпробойных полей до значений $F = 25-30$ МВ/см и обнаружить новый механизм образования положительно заряженных дефектов в SiO₂, а именно трансформацию под влиянием разогретых электронов биографических преддефектов, в качестве которых выступают напряженные связи Si-O. В настоящей работе обнаружен еще один тип зарядовой нестабильности структур Si-SiO₂, заключающийся в появлении нестационарного релаксирующего во времени положительного заряда (до 10^{-6} Кл/см²), и изучены полевые и толщинные зависимости обнаруженного эффекта.

Исследовались структуры Si-SiO₂, полученные термическим (сухое, хлорное, $T = 1000-1100^\circ\text{C}$; пирогенное, гидротермальное, $T = 850-950^\circ\text{C}$) окислением кремния марки КДБ-10(100) до толщин $d = 30-150$ нм. В системе с электрическим контактом (1 н. водный раствор сернокислого натрия) измерялись серии значений потенциала плоских зон $V_{fb}(F)$ высокочастотной (1 МГц) вольт-фарадной характеристики при постепенном увеличении среднего поля (“+”

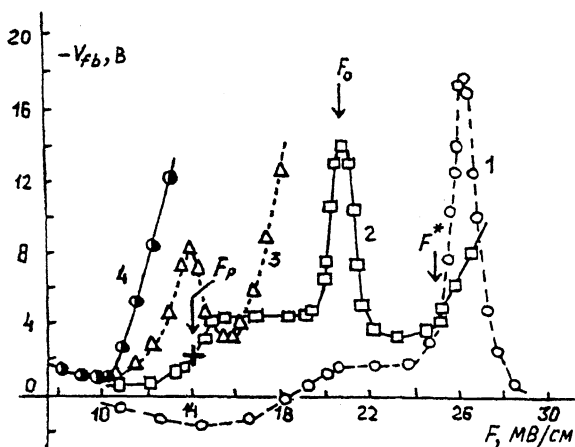


Рис. 1. Зависимость $V_{fb}(F)$ для различных толщин окисного слоя: 1-4 — 30, 42, 80 и 150 нм соответственно.

на кремнии) в окисле F . Исследования проводились при $T = 23^\circ\text{C}$, методика измерений описана в работах [2,3].

На рис. 1 представлен ряд зависимостей $V_{fb}(F)$ в области предпробойных полей структур Si-SiO₂ с толщиной окисла $d = 30-150$ нм. На типичной зависимости (кривая 2, $d = 42$ нм) стрелками показаны значения пороговых полей трансформации преддефектов в положительно заряженные дефекты, $F = F_p$, в результате которой происходит ограниченный рост величины V_{fb} с выходом на плато [3], а также начала ударной ионизации матрицы SiO₂, $F = F^*$, приводящей к резкому увеличению V_{fb} вследствие генерации дырок, ионизации и отрыва от подложки атомов кремния и т. д., ограниченному пробоем образца [2,6,7]. С ростом d наблюдалось уменьшение величин F_p , F^* и их разности $\Delta F = F^* - F_p$, причем участок кривой в области полей ΔF не удавалось выделить на зависимостях $V_{fb}(F)$ на фоне роста V_{fb} при $F > F^*$, начиная с толщин окисла $d > 100-110$ нм (рис. 1, кривая 4).

В случае структур с толщиной SiO₂ $d < 80$ нм на зависимостях $V_{fb}(F)$ при достижении поля $F \approx F_0$ независимо от способа формирования окисного слоя были обнаружены релаксирующие пики V_{fb} . Величина V_{fb} при поддержании среднего поля F_0 сначала росла до значений $V_{fb} = 15-20$ В (рис. 1, кривые 1, 2), а затем уменьшалась до исходных значений за время $t = 6-8$ мин. Измерения V_{fb} сопровождались симбатными изменениями плотности поверхностных состо-

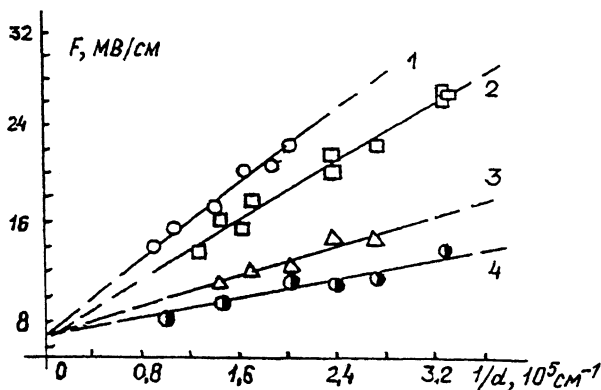


Рис. 2. Зависимость пороговых полей включения механизмов диссипации энергии разогретых электронов в SiO_2 от толщины окисла: 1 — ударная ионизация матрицы SiO_2 , 2 — образование метастабильных дефектов, 3 — трансформация преддефектов, 4 — возбуждение электролюминесценции в полосе 2.3 эВ; пояснения в тексте.

яний на границе Si-SiO_2 максимальная величина которой в середине запрещенной зоны кремния достигала значений $D_{it} = (2 - 3) \cdot 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

На рис. 2 представлены толщинные зависимости пороговых полей $F^*(d)$, $F_0(d)$ и $F_p(d)$, построенные в координатах $F - 1/d$ (кривые 1-3). Здесь же показана (кривая 4) зависимость для возбуждения электролюминесценции структур Si-SiO_2 в полосе $h\nu = 2.3 \text{ эВ}$ $F_{\text{эл}}(d)$, полученная на основании данных [2]. Все зависимости хорошо аппроксимируются соотношением типа:

$$F(d) = C_1 + C_2/d, \quad (1)$$

совпадающим с полученной ранее зависимостью для $F^*(d)$ [6,7]. В последней величина параметра C_1 определяется отношением $\Delta E/\lambda$, где λ — длина свободного пробега электрона по направлению поля, ΔE — энергетические потери при каждом акте рассеяния, а значение параметра C_2 зависит от критической энергии E^* , которую необходимо приобрести инжектированным из электролита электронам при прохождении диэлектрика толщиной d для генерации в окисле электронно-дырочных пар вблизи границы Si-SiO_2 . Оказалось, что для всех кривых величина $C_1 = (7.0 \pm 0.5) \text{ МВ/см}$, а величина C_2 имела значения (76 ± 2) , (59 ± 2) , (29 ± 2) и $(17 \pm 2) \text{ В/см}$ для кривых 1-4 соответственно (рис. 2). Полученные закономерности позволяют записать соотношения пороговых полей, необходимых для реализации рассмотренных выше механизмов диссипации энергии разогретых

электронов в SiO_2 :

$$F_{\text{эл}} < F_p < F_0 F^* . \quad (2)$$

В качестве одного из возможных механизмов образования релаксирующих пиков на зависимостях $V_{fb}(F)$ можно предложить следующий. Под влиянием разогретых в поле F_0 электронов одновременно происходит разрыв связей Si-H как на границе Si-SiO₂, так и в переходном слое протяженностью несколько нанометров [2] с образованием дефектов типа Si•. На границе эти дефекты выступают в роли поверхностных состояний [2,5]. Дефекты Si• в переходном слое участвуют в образовании новых элементов структуры переходного слоя, установление природы которых требует дополнительных исследований. Эти элементы после захвата на них дырок представляют собой положительно заряженные дефекты, стабильные в поле $F = F_0$. При накоплении на этих дефектах достаточно большого положительного заряда, приводящего к сдвигу вольт-фарадной характеристики на величину $\Delta V_{fb} \approx 10-20$ В (рис. 1), величина поля в окисле возрастает на $\Delta F \approx \Delta V_{fb}/d$ и становится близкой, согласно проведенным оценкам, к значению $F \leq F^*$. В этих полях энергии разогретых электронов оказывается достаточно для распада под их влиянием образовавшихся новых элементов структуры переходного слоя с одновременным исчезновением положительного заряда, вследствие чего величина V_{fb} уменьшается до значений, близких к исходным.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что процессы образования дефектов, ответственных за появление релаксирующего пика V_{fb} , трансформации преддефектов в дефекты и возбуждения дефектов, ответственных за полосу электролюминесценции 2.3 эВ, обусловлены наличием в SiO₂ разогретых электронов, а толщинные зависимости их пороговых полей F_0 , F_p и $F_{\text{эл}}$ описываются соотношением типа (1) с различными коэффициентами C_2 . Рассмотренные процессы необходимо учитывать наряду с процессами рассеяния электронов на оптических и акустических фонах [4] и ударной ионизации матрицы SiO₂ [5,7] при моделировании процессов разогрева электронов в структурах Si-SiO₂ [4,5].

Список литературы

- [1] Бродай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985. 496 с.
- [2] Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO_2 на кремнии. Л.: ЛГУ, 1988. 304 с.
- [3] Барабан А.П., Булавинов В.В., Трошигин А.Г. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 18. С. 27-30.
- [4] Fischetti M.V., DiMaria D.J., Brorson S.D. et al. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 12. P. 8424-8442.
- [5] Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. // Phys. Rev. B. 1994-I. V. 49. N 15. P. 10278-10297.
- [6] Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 9. С. 806-809.
- [7] Барабан А.П., Булавинов В.В., Рыбаков М.О. // Изв. вузов. Физика. 1991. № 1. С. 36-40.

Поступило в Редакцию
2 июня 1995 г.
