

©1995 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ
ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ РЕЛАКСАЦИИ
ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ОКИСЛЕ SiO₂
СТРУКТУР МЕТАЛЛ–ОКИСЕЛ–ПОЛУПРОВОДНИК,
ОБЛУЧЕННЫХ γ -КВАНТАМИ ⁶⁰Co**

Ю.В.Баринюв, В.Н.Безбородов, В.В.Емельянов, В.С.Першенков

Московский инженерно-физический институт,
115409, Москва, Россия

(Получена 22 марта 1994 г. Принята к печати 26 июля 1994 г.)

С помощью термостимулированного отжига объемного заряда исследованы свойства электронных ловушек в подзатворном окисле SiO₂ структур металл-окисел-полупроводник, облученных γ -квантами ⁶⁰Co в диапазоне температур (174–391) К. Установлено, что заряд электронных ловушек может существенно компенсировать влияние заряда захваченных дырок. Получено распределение плотности электронных ловушек по энергии активации.

Введение

Электронные приборы, изготавливаемые по технологии металл-окисел-полупроводник (МОП), нашли широкое применение в аппаратуре космических аппаратов, где они в течение длительного периода времени (3–10 лет) подвергаются воздействию ионизирующих излучений космического пространства. Особенностью воздействия ионизирующего излучения в течение длительного периода времени является то, что в механизмах отказов МОП приборов существенную роль начинает играть отжиг радиационно накопленного заряда.

Экспериментально установлено, что в SiO₂ электроны при наличии приложенного поля очень быстро (за наносекунды) удаляются из окисла, в то же время дырки диффундируют в окисле гораздо медленнее (за 10⁻⁴–10⁻³ с), вследствие чего до 80 % дырок может захватываться глубокими дырочными ловушками вблизи границы раздела [1]. Отжиг захваченных дырок идет преимущественно за счет электронов, туннелирующих из кремниевой подложки. Современные представления о кинетике отжига основаны на концепции зарядовых ловушек в запрещенной зоне SiO₂, распределенных по энергиям активации [2].

Электронные ловушки считают ответственными за аномальный ход изотермических кривых отжига положительного заряда, который наблюдается при переключении электрического напряжения затвора с положительного на отрицательное. Предполагается, что источником электронных ловушек является трехвалентный атом Si, образующийся после захвата радиационной дырки кислородной вакансией, а сам эффект объясняется уменьшением заряда электронных ловушек за счет туннелирования электронов в кремниевую подложку [3-7]. Согласно модели, предложенной в работе [3], процесс отжига положительного заряда состоит из двух конкурирующих процессов — освобождения захваченных дырок и компенсации заряда дырок зарядом электронов, туннелирующих на электронные ловушки. Вопрос о компенсационной роли электронных ловушек в процессах отжига является дискуссионным.

В настоящей работе исследуется процесс термостимулированной релаксации объемного заряда в подзатворном окисле SiO₂ МОП структур, облученных γ -квантами ⁶⁰Со в диапазоне температур (174–391) К, с целью изучения свойств электронных ловушек и их роли в процессе отжига радиационно накопленного заряда.

Описание эксперимента

Для проведения эксперимента использовались МОП конденсаторы на *n*-подложке и МОП транзисторы с каналом *n*-типа, изготовленные на одном кристалле тестового модуля интегральной схемы. В процессе эксперимента измеряли вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МОП конденсаторов и вольт-амперные характеристики (ВАХ) МОП транзисторов. Емкость определяли по падению переменного напряжения с частотой 1 МГц на активном плече емкостно-омического делителя. Ток измеряли специальными логарифмическим усилителем и преобразователем ток-напряжение при напряжении на стоке 0.1 В. По величине емкости МОП конденсатора, соответствующей середине заперщенной зоны (C_{mg}), определяли изменение напряжения середины зоны (ΔV_{mg}). По изменениям порогового напряжения и логарифмической подпороговой крутизны ВАХ МОП транзисторов вычисляли изменение составляющей порогового напряжения, связанной с зарядом в окисле (ΔV_{tox}).

Предварительно для каждого образца измеряли ВФХ и ВАХ в диапазоне температур (77–400) К. Образцы облучали γ -квантами ⁶⁰Со при различных температурах в диапазоне (174–391) К. Для образцов, облученных при $T < 300$ К, набранная доза была равна $D = 6 \cdot 10^6$ рад (Si); для образцов, облученных при $T > 300$ К, — $D = 1.2 \cdot 10^7$ рад (Si). Сразу после воздействия ионизирующего излучения образцы, облученные при $T < 300$ К, нагревали до $T = 400$ К. Измерения проводили дистанционно как во время набора дозы, так и в процессе нагрева без снятия радиационной и температурной нагрузки. После облучения все образцы оставляли на хранение при комнатной температуре с закороченными выводами. Через 24 часа снова измеряли характеристики при $T = 300$ К, а затем — в диапазоне от 77 до 400 К. Во время облучения и при всех операциях термоциклирования напряжение затвор-подложка оставалось неизменным и составляло +5 В.

Температурные зависимости изменений напряжения середины зоны для МОП конденсаторов, облученных при $T_{rad} = 174$ и 391 К, представлены на рис. 1. Кривая 1 иллюстрирует процесс термостимулированного отжига положительного заряда. Если процесс отжига являлся бы только следствием освобождения и выноса захваченных дырок, то можно было бы ожидать, что величина ΔV_{mg} после облучения при повышенных температурах или после отжига не должна зависеть от температуры. Однако, как показывают полученные результаты (кривые 2, 3), в этом случае значение ΔV_{mg} имеет ярко выраженную температурную зависимость. При понижении температуры ΔV_{mg} смещается в сторону положительных напряжений, причем для образца, облученного при $T = 391$ К, эффект накопления положительного заряда при $T = 77$ К оказывается полностью скомпенсированным. Этот эффект не может быть связан с изменением пространственного распределения захваченных дырок, так как значения ΔV_{mg} , измеренные при $T = 300$ К до повторного термоциклирования, в точности совпадают с измеренными при той же температуре в последующих процессах нагревания-охлаждения.

Аналогичные температурные зависимости наблюдались для всех 7 образцов, облученных в температурном диапазоне (174–391) К. Полученные в ходе проведения эксперимента зависимости ΔV_{tox} от температуры хорошо согласуются с изменениями ΔV_{mg} . Величины ΔV_{tox} во всех случаях были более отрицательными, чем соответствующие величины ΔV_{mg} , но наибольшие расхождения не превышали 0.2 В, что считается удовлетворительным для данных экспериментальных методов.

Мы предполагаем, что данный температурный эффект связан с перезарядкой электронных ловушек в объеме подзатворного SiO_2 вблизи границы с кремниевой подложкой. Заполнение ловушек происходит за счет туннелирования электронов из Si, а температурная зависимость обусловлена их освобождением в результате термостимулированного отжига. Поскольку, согласно [4,5] отжиг захваченных зарядов в подзатворном SiO_2 подчиняется законам кинетики 1-го порядка с аррениусовской константой скорости реакции, решение кинетического уравнения для случая термостимулированного отжига можно записать в

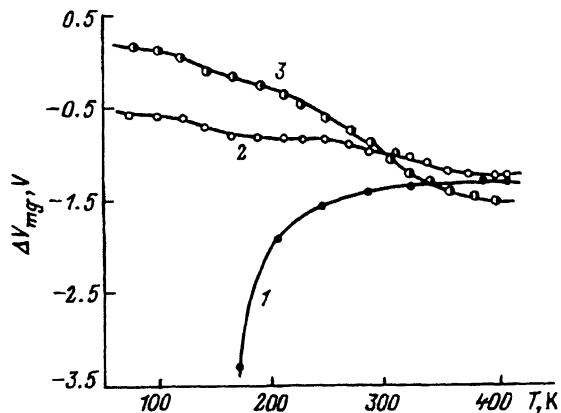


Рис. 1. Температурные зависимости приращения напряжения середины зоны ΔV_{mg} для МОП конденсаторов, облученных γ -квантами ^{60}Co : 1 — сразу после облучения, 2 — после термостимулированного отжига. Температура облучения T_{rad} , К: 1, 2 — 174, 3 — 391. Доза облучения D , рад (Si): 1, 2 — $6 \cdot 10^6$, 3 — $1.2 \cdot 10^7$.

$$n(E, T) = n_0(E) \exp \left[-v \int_{T_0}^T \frac{dt}{dT} \exp(-E/kT) \right] dT, \quad (1)$$

где $n(E, T)$ — концентрация заполненных ловушек, $n_0(E)$ — начальная концентрация заполненных ловушек, t — время, v — частотный фактор (10^{11} с^{-1}), E — энергия активации зарядовой ловушки.

Величина $n(E, T)/n_0(E)$ близка к 0 при $E \rightarrow 0$ и $n(E, T)/n_0(E) \rightarrow 1$ при $E \rightarrow \infty$, причем для условий проведения эксперимента [$dT/dt \simeq 100 \text{ К/ч}$, $T = (77-400) \text{ К}$] $n(E, T)$ изменяется более чем на 90 % вблизи некоторой энергии E_0 . Таким образом, в первом приближении можно считать, что зарядовая ловушка будет свободна, если $E < E_0$, и заполнена, если $E > E_0$. Параметр E_0 может быть определен численным решением уравнения

$$n(E, T)/n_0(E) = 0.5 \quad (2)$$

с использованием выражения (1). Предполагая, что в окисле облученной МОП структуры зарядовые ловушки имеют квазинепрерывный энергетический спектр, начальное распределение плотности заполненных зарядовых ловушек по энергиям активации может быть рассчитано по температурной зависимости ΔV_{mg} .

На основе этих предположений по данным, представленным на рис. 1, было получено распределение плотности заполненных электронных ловушек по энергиям активации (рис. 2). Распределение имеет два пика в диапазонах (0.2–0.4) эВ и (0.7–0.9) эВ, причем энергия, соответствующая низкоэнергетическому максимуму, хорошо согласуется с данными работы [3]. Анализ, проведенный с помощью моделирования формы пиков гауссовским распределением, показал, что площади под каждым из них, соответствующие интегральным плотностям ловушечных центров, можно считать равными в пределах погрешности определения активационного спектра. Наличие двух пиков в активационном спектре с близкими интегральными плотностями совместно с представлениями об электронной ловушке как о трехвалентном атоме кремния с одним неспаренным электроном позволяет предположить амфотерный характер ловушечного центра.

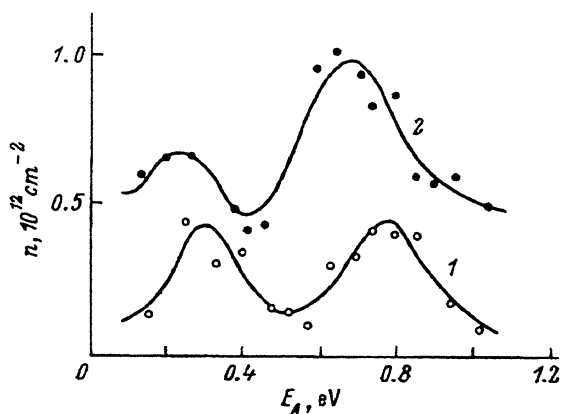


Рис. 2. Распределение плотности электронных ловушек n по энергиям активации E_A в МОП структурах, облученных γ -квантами ^{60}Co ; доза облучения D , рад (Si): 1 — $6 \cdot 10^6$, 2 — $1.2 \cdot 10^7$.

Результаты, приведенные на рис. 2, вследствие недостаточной точности определения ΔV_{tg} носят скорее качественный, чем количественный характер. В то же время следует подчеркнуть, что с помощью изложенной выше методики проведения эксперимента удастся разделить эффекты отжига захваченных электронов и дырок, что в принципе позволяет проводить и количественные исследования свойств электронных ловушек. Улучшение точности может быть достигнуто с помощью применения прецизионных методов измерения емкости, напряжения, а также температуры подложки МОП структуры.

Список литературы

- [1] *Ionizing Radiation effects in MOS Devices and Circuits*, ed. by T.P.Ma, P.V.Dressendorfer (J. Welley and Sons, N.Y., 1989).
- [2] D.M. Fleetwood, M.R. Shaneyfelt, L.C. Riewe, P.S. Winokur, R.A. Reber. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-40**, N 6 (1993).
- [3] A.J. Lelis, T.R. Oldhame, H.E. Boesch, F.B. McLean *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-36**, 1808 (1989).
- [4] V. Danchenko, P.H. Fang, S.S. Brashears. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-28**, 4407 (1981).
- [5] I. Petr. *Phys. St. Sol. (a)*, **93**, 711 (1986).

Редактор Т.А. Полянская

A study of the kinetics of the tempering annealing of the charge in the gate SiO₂ of MOS-structures irradiated by γ -quants of Co⁶⁰

Yu.V. Barinov, V.N. Bezborodov, V.V. Yemelyanov, V.S. Pershenkov

Moscow Institute for Engineering and Physics, 115409 Moscow

Properties of electron traps were investigated by the tempering annealing of the charge in the gate oxide of a MOS-structure irradiated by Co⁶⁰. It was found that the trapped electron charge is able to significantly compensate the trapped-hole charge. The distribution of the electron traps density as a function of the activation energy was obtained.