

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОП СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

© П.В.Кучинский, Г.А.Лисовский, Е.Д.Савенок

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко при Белорусском государственном университете, 220064 Минск, Белоруссия  
(Получена 21 августа 1995 г. Принята к печати 26 декабря 1996 г.)

Изучено влияние термоотжига МОП транзисторов на эффективность радиационной деградации электрофизических свойств приборов. Показано, что для МОП приборов с использованием пирогенного подзатворного окисла последующие термообработки свыше 850 °С приводят к существенному росту эффективности радиационной деградации. Результаты объяснены в рамках модели релаксации внутренних механических напряжений.

Производство кремниевых больших интегральных схем на основе структур металл-окисел-полупроводник (МОП) включает в себя ряд высокотемпературных (ВТ) технологических обработок после операции формирования подзатворного окисла. Практически не выяснено, насколько такие обработки могут изменить радиационную чувствительность исходной системы SiO<sub>2</sub>/Si.

С этой целью в настоящей работе после операции фотолитографического формирования рисунков поликремниевых затворов проводился отжиг МОП структур и тестовых транзисторов, имитирующих технологические ВТ воздействия. Отжиг проводился в среде аргона в течение 60 мин и диапазоне температур 850–1050 °С. Подзатворный окисел толщиной 300 Å формировался пирогенным окислением кремния КЭФ-4.5 при температуре 850 °С. Гамма-облучение проводилось в интервале доз 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> рад как в пассивном, так и в активном режимах, когда к затворам структур прикладывалось положительное смещение 5 В.

Контролировались радиационно-индуцированный заряд в SiO<sub>2</sub> и плотность поверхностных состояний (ПС) на границе SiO<sub>2</sub>-Si. Использовалась методика [1,2], согласно которой фиксированный заряд в окисле пропорционален сдвигу напряжения середины зоны  $\Delta V_{MG}$  на

подпороговых ВАХ тестовых транзисторов, а плотность поверхностных состояний  $D_{it}$  соответствует выражению [3]

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[ \left( \frac{\beta S}{\ln 10} - 1 \right) C_{ox} - C_D \right],$$

где  $q$  — заряд электрона,  $\beta = q/kT$ ,  $S$  — характерный размах напряжения на затворе, требуемого для изменения тока стока на порядок,  $C_{ox}$  — емкость окисла,  $C_D$  — емкость области пространственного заряда кремния. Следует отметить, что для облученных структур использование методики, предложенной в [1,2] для определения  $\Delta V_{MG}$  по соответствующему значению подпорогового тока, зачастую затруднено маскирующим влиянием тока утечки в цепи сток-исток. Экстраполяция ВАХ, построенной в полулогарифмическом масштабе, к малым значениям тока оправдана лишь в частном случае, когда в спектре ПС вблизи середины запрещенной зоны кремния имеется плато и характеристики имеют линейную форму. В связи с этим, наряду с подпороговыми в настоящей работе регистрировались вольт-фарадные характеристики затвора относительно подложки и соединенными с ней выводами стока и истока. Напряжение  $V_{MG}$  находилось по нормированному значению емкости  $C_{MG}/C_{ox}$ .

Привлекались также данные по эффективной подвижности носителей заряда в инверсионных каналах тестовых транзисторов. Эффективная подвижность определялась по значению выходной проводимости  $q_d$  МОП транзисторов в области высокой крутизны. Для малых напряжений на стоке ( $V_d = 50$  мВ) выполняется условие  $V_d \ll 2\varphi_F$  и может записать [4]

$$\mu_{eff} = \frac{q_d L}{W C_{ox} (V_G - V_T)},$$

где  $W$ ,  $L$  — ширина и длина канала соответственно,  $V_G$  — напряжение на затворе,  $V_T$  — пороговое напряжение,  $\varphi_F$  — потенциал, соответствующий уровню Ферми в объеме кремния.

На рис. 1 (кривая 1) представлено радиационное изменение  $\Delta V_{MG}$  (соответственно величина заряда) для  $n$ -МОП транзисторов в зависимости от температуры отжига. Доза облучения для каждой точки составляла  $10^6$  рад. Видно, что с ростом температуры отжига эффективность введения заряда в  $\text{SiO}_2$  растет приблизительно по экспоненциальному закону. Аналогичную тенденцию роста радиационной чувствительности с увеличением температуры отжига проявляет также и эффективная подвижность.

Увеличение радиационной чувствительности с ростом температуры ВТ обработки вызвано, по-видимому, следующим обстоятельством. Присутствие жестко сцепленной с поверхностью окисла поликремниевой пленки, обладающей собственными структурными сжимающими напряжениями, усиливает напряженное состояние системы. Известно [5], что при высоких температурах внутренние механические напряжения (ВМН) релаксируют посредством вязкого течения окисла, при этом относительное изменение ВМН определяется соотношением

$$\sigma_p / \sigma_f = \exp(-t/\tau),$$

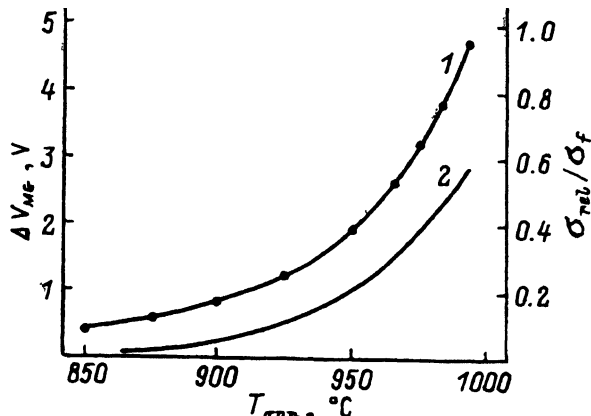


Рис. 1. Влияние температуры технологического отжига на радиационное изменение  $\Delta V_{MG}$  (1) и на относительное значение (расчет) ВМН при вязком течении подзатворного окисла (2).

где  $\sigma_f$  и  $\sigma_p$  — полное и остаточное значения ВМН,  $\tau$  — постоянная времени релаксации, равная для пирогенного окисла

$$\tau = 7.9 \cdot 10^{-20} \exp(5.7/kT).$$

В процессе вязкого течения в окисле образуются дефекты, в частности кислородные вакансии, являющиеся центрами захвата дырок. В этой связи можно предположить [6], что изменение  $V_{MG}$ , вызванное захватом на эти центры радиационно-индуцированных дырок, будет пропорционально доли ВМН, которые релаксировали в процессе ВТ отжига, т. е.

$$\Delta V_{MG} \sim \sigma_{rel}/\sigma_f = [1 - \exp(-t/\tau)].$$

Из рис. 1 видим, что радиационная чувствительность структур обладает экспоненциальной зависимостью от температуры отжига и хорошо согласуется с расчетной кривой доли релаксированных напряжений (кривая 2). Согласно модели [7], основанной на процессах просачивания в теории эффективной среды, можно предположить, что часть дефектов, генерированных при высокотемпературном вязком течении окисла, локализована в кластерах макроскопических размеров. Заполнение этих скопления дырками при последующем облучении приводит к макронеоднородностям в каналах МОП транзисторов, снижающих эффективную подвижность. Другая часть дефектов, равномерно распределенных в окисле, вызывает радиационный сдвиг  $V_{MG}$ .

Считается установленным, что радиационные воздействия снижают подвижность посредством увеличения степени неоднородности поверхностного заряда [8,9]. Однако в литературе нет единого мнения по вопросу о том, что является источником флуктуаций — заряд в поверхностных состояниях или же фиксированный заряд, локализованный в окисле. В работе [8] наблюдается линейная зависимость  $\mu_{eff}^{-1}$  от плотности ПС  $D_{it}$ , свидетельствующая о доминирующем влиянии поверхностных состояний при облучении электронами ( $E = 25$  МэВ) на рассеяние носителей в инверсных слоях на кремнии  $n$ -типа. К аналогичному

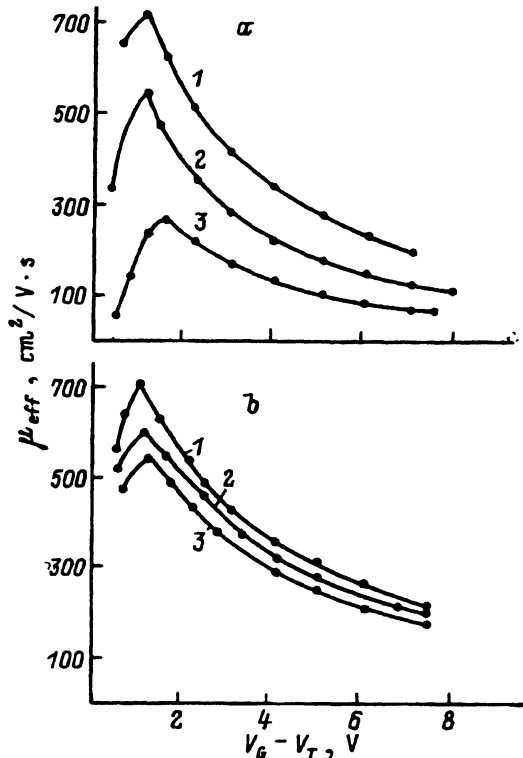


Рис. 2. Зависимость эффективной подвижности электронов в инверсном слое  $n$ -канального МОП транзистора от напряжения на затворе для двух значений температуры технологического отжига, используемого в процессе изготовления приборов:  $a$  —  $1050^\circ\text{C}$ ,  $b$  —  $850^\circ\text{C}$ ; 1 — исходный транзистор; 2, 3 — соответственно облученный в пассивном и активном режимах дозой  $10^6$  рад.

результату пришли авторы [9] в эксперименте по отжигу облученных структур, для которых уменьшение  $\mu_{\text{eff}}$  непосредственно сопровождалось ростом  $D_{it}$ , хотя фиксированный заряд при этом уменьшался. С другой стороны, сильное уменьшение подвижности обнаружено при записи фиксированного заряда в МОП структурах [10]. Сопоставление изменения параметра флуктуационной неоднородности потенциала границы раздела  $\text{Si-SiO}_2$  и плотности ПС вблизи потолка валентной зоны кремния показало, что «хвосты» в распределении ПС вблизи краев запрещенной зоны имеют в основном флуктуационную природу [11]. Что касается области спектра ПС вблизи середины запрещенной зоны кремния, то они генетически не связаны с флуктуациями и являются истинными. Можно заключить, что при анализе зависимостей («плотность состояний-подвижность») необходимо учитывать энергетический диапазон ПС, поскольку в части спектра вблизи краев зон они будут, возможно, «кажущимися».

На рис. 2 представлена зависимость  $\mu_{\text{eff}}$  от напряжения на затворе для исходных и облученных дозой  $10^6$  рад  $n$ -канальных МОП транзисторов. Характер зависимости  $\mu_{\text{eff}}(V_G)$  качественно согласуется с представлениями [12-13]. Крутой рост подвижности в области напря-

Состояние образца	Температура ВТ обработки, °С	$D_{it}, 10^{-11}$ $\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$	$\mu_{\text{eff}},$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$V_{MG}, \text{В}$	$V_T, \text{В}$
Необлученный	850	—	645	0.05	0.54
	1050	—	733	0.30	0.86
Облучение в активном режиме дозой $10^6$ рад	850	12.6	495	-1.04	0.05
	1050	12.7	242	-6.72	-5.87

жений вблизи пороговых обусловлен сглаживанием неоднородностей, а спад при  $V_G > V_T$  связан с локализацией инверсионного слоя ближе к поверхности кремния.

В таблице приведены основные электрофизические параметры тестовых транзисторов. Данные по эффективной подвижности соответствуют максимуму на ее зависимости от поперечного поля (от величины  $V_G - V_T$ ). Из таблицы видно, что деградация подвижности для ВТ обработок при 1050 °С по сравнению с отжигом при 850 °С сопровождается более сильным изменением  $V_{MG}$ , т.е. ростом фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  на фоне примерно одинаковых значений радиационно-индуцированной плотности ПС. Как видно из таблицы, основной причиной деградации  $\mu_{\text{eff}}$  является увеличение заряда в  $\text{SiO}_2$ . Для дополнительного доказательства этого вывода был проделан следующий эксперимент. В подзатворном окисле  $n$ -МОП транзистора ( $T_{\text{ann}} = 1050$  °С) при помощи облучения в активном режиме дозой  $10^6$  рад был накоплен повышенный положительный заряд и получены следующие результаты:

$$V_{MG} = -6.72 \text{ В}, \quad D_{it} = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}, \quad \mu_{\text{eff}} = 242 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Затем транзистор дополнительно облучался дозой  $10^6$  рад, но в пассивном режиме, что обеспечило дальнейший рост плотности ПС ( $D_{it} = 2.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ) и существенное снижение фиксированного заряда ( $V_{MG} = 3.0$  В) через радиационно-стимулированный процесс стирания. Полученное значение подвижности —  $410 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Проведенные исследования позволяют заключить, что для МОП приборов с использованием пирогенного подзатворного окисла последующие температурные обработки свыше 850 °С приводят к существенному росту эффективностей введения заряда в  $\text{SiO}_2$  и уменьшения подвижности носителей при облучении гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ . Увеличение радиационной чувствительности с ростом температуры обработки в диапазоне 850–1050 °С объясняется генерацией центров захвата дырок при релаксации внутренних механических напряжений.

#### Список литературы

- [1] P.S. Winokur, J.P. Schwank, P.J. McWhorter, P.V. Dressendorfer, D.C. Tupin. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-31, 1453 (1984).
- [2] C.M. Dozier, D.P. Brown, R.K. Freitag, J.L. Throckmorton. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-33, 1323 (1986).
- [3] M. Gaitan, T.J. Russel. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-31, 1256 (1984).

- [4] J.S. Kang, D.K. Schroder, A.R. Alvarez. Sol. St. Electron., **32**, 679 (1989).
- [5] С.А. Литвиненко, В.Г. Литовченко, В.И. Соколов. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника (Киев), № 8, 40 (1985).
- [6] S.K. Lai. J. Appl. Phys., **54**, 2540 (1983).
- [7] K.J. Rawlings, S.C. Jain, J.W. Leake. Sol. St. Electron., **32**, 555 (1989).
- [8] Ю.В. Богатырев, В.И. Демченко, Ф.П. Коршунов. Препринт КИЯИ-76-25 (Киев, 1976) с. 28.
- [9] F.W. Sexton IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-32**, 3975 (1985).
- [10] Е.В. Власенко, Е.И. Гамелин, В.В. Пospelov, В кн.: *Физические процессы в МДП структурах* (Киев, 1976) с. 17.
- [11] С.Н. Козлов, А.Ю. Потапов. Вестн. МГУ. Сер. 3, **30**, 70 (1989).
- [12] Я.А. Шик. В кн.: *Материалы 8 Зимней школы по физике полупроводников* (Л., 1977) с. 94.
- [13] В.Н. Добровольский, В.Г. Литовченко. *Перенос электронов и дырок у поверхности полупроводников* (Киев, Наук. думка, 1985) с. 192.

Редактор В.В. Чалдышев

## **Influence of technological annealing temperature on radiation characteristics of electrophysical properties of MOS (Si) structures**

*P. V. Kuchinskii, G. A. Lisovskii, E. D. Savenok*

Scientific-Research Institute for Applied Physics Problems Belarus State University,  
220064 Minsk, Belarus

A study has been made of how the thermal annealing of MOS-transistors affects the efficiency of radiation degradation of electrophysical properties of devices. It is shown that for gate-oxide MOS-devices successive thermal treatments above 850 °C lead to an essential growth of the radiation degradation efficiency. The results are explained in the framework of a model of internal mechanical stress relaxation.

---