

## Влияние радиационного воздействия на характеристики МДП структур с окислами редкоземельных элементов

© Я.Г. Федоренко, Л.А. Отавина, Е.В. Леденева, А.М. Свердлова

Саратовский государственный университет,  
410071 Саратов, Россия

(Получена 20 марта 1996 г. Принята к печати 22 января 1997 г.)

Приведены результаты исследований влияния  $\gamma$ -облучения на электрофизические характеристики МДП структур с окислами редкоземельных элементов  $Y_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ ,  $Tb_2O_3$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$ . Рассмотрены статические характеристики (вольт-амперные, вольт-фарадные) и динамические (переходные характеристики, диаграммы колебательных режимов) структур до и после облучения дозой  $D = 10^4 \div 10^6$  рад. Обнаружено, что доза облучения  $D = 10^6$  рад не приводит к существенной деградации характеристик структур. Наблюдаемые радиационные изменения исследуемых образцов не противоречат данным, известным для МДП структур с  $SiO_2$  в качестве диэлектрика.

Влияние радиационного воздействия на характеристики МДП структур исследовалось в последние годы в ряде работ [1–13]. Однако, несмотря на большое число экспериментальных и теоретических данных по этому вопросу, трудно конкретизировать процесс появления радиационно-индуцированного объемного заряда в диэлектрике и на границе раздела окисел-полупроводник. Это связано с тем, что накопление радиационно-индуцированного заряда зависит от многих факторов: технологии получения окисла, условий облучения, послерадиационной обработки, материала диэлектрика [4,5,11,12]. Наиболее подробно рассматривались радиационные эффекты, возникающие в МДП структурах с окислом кремния  $SiO_2$  и нитридом кремния  $Si_3N_4$  в качестве диэлектрика [2,3,6]. На высокую радиационную стойкость диэлектриков  $SiO_2 + Si_3N_4$  и  $SiO_2 + Si_3N_4 + SiO_2$  указывается в работах [3,7,8]. Менее известны данные о радиационном воздействии на полевые структуры с окислами редкоземельных элементов (ОРЗЭ) в качестве диэлектрика. Как показали исследования электрофизических характеристик МДП структур с ОРЗЭ, эти окислы обладают высокой стабильностью диэлектрических и электрических свойств, большой диэлектрической проницаемостью, химической стойкостью, большой шириной запрещенной зоны [10,14].

Цель настоящей работы — исследование влияния  $\gamma$ -облучения на параметры МДП структур с ОРЗЭ. Необходимо отметить, что исследовались МДП структуры, изготовленные как на однородной подложке, так и на подложке со встроенным  $p-n$ -переходом. Выбор МДП структур с неоднородно легированной подложкой сделан в связи с тем, что они имеют вольт-амперные характеристики с участком отрицательного дифференциального сопротивления, и протекающие в них неравновесные процессы могут быть более чувствительны к  $\gamma$ -облучению.

### Методика исследования

Исследовались образцы с окислами редкоземельных элементов (диспрозия  $Dy_2O_3$ , тербия  $Tb_2O_3$ , лютеция  $Lu_2O_3$ , гадолиния  $Gd_2O_3$ , иттрия  $Y_2O_3$ ) толщиной

$100 \div 500 \text{ \AA}$ . Пленка алюминия служила полевым электродом. Использовались 3 типа подложек: однородно легированная  $n$ -Si, содержащая переход  $(n^+ - p)$ -Si (OC) и со скрытым диффузионным слоем  $(n^+ - n^- - p)$ -Si (CC). Топология структуры образцов представлена на рис. 1 (см. вставку).

Образцы облучались источником  $^{60}Co$  при разомкнутых электродах. Дозы облучения менялись от  $10^2$  до  $10^6$  рад. Измерения проводились на облученных образцах через одинаковое время хранения после облучения, равное 60 ч, отжиг не проводился.

Для исследования свойств образцов использовались результаты измерения высокочастотных (ВЧ) вольт-фарадных характеристик (ВФХ), динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ), переходных характеристик до и после облучения. Измерялось время переходного процесса при выключении импульса обедняющего напряжения, длительность и амплитуда которого варьировались; анализировались зависимости времени переходного процесса от дозы облучения. Исследовались колебательные режимы в  $RL$ -цепи с включенной МДП структурой до и после облучения. Построены диаграммы режимов в координатах "амплитуда–(частота внешнего воздействия)". Методика экспериментов с использованием нелинейного неавтономного контура с  $p-n$ -переходом и построение диаграмм режимов заимствованы из работ [15,16].

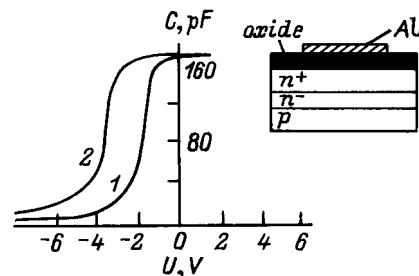
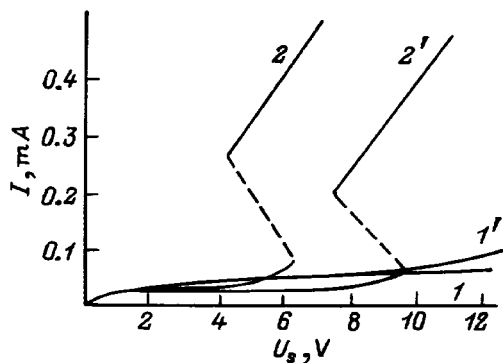


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МДП структур с окислом  $Lu_2O_3$  до (1) и после (2) облучения.

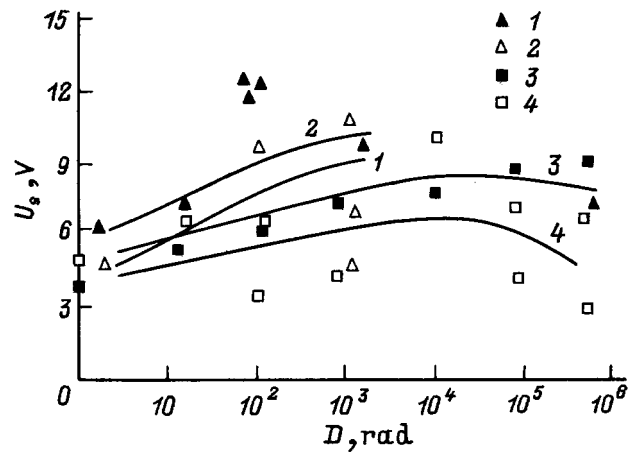
### Результаты и их обсуждение

Анализ ВЧ вольт-фарадных характеристик структур до и после облучения показал, что для всех образцов имеет место известный из литературы сдвиг ВФХ по оси напряжений, свидетельствующий о том, что в диэлектрике и на границе раздела индуцируется положительный заряд (рис. 1). Напряжение плоских зон принимает значения от  $-1.25$  до  $-4.5$  В у различных образцов в зависимости от его значения до облучения. Значения плотности поверхностных состояний находились в интервале  $N_{ss} = (0.7-1.1) \cdot 10^{-12}$  эВ $^{-1}$ см $^{-2}$  для необлученных образцов и в интервале  $N_{ss} = (2.3-3.7) \cdot 10^{-12}$  эВ $^{-1}$ см $^{-2}$  для облученных.

На рис. 2 представлены ВАХ МДП структур на однородной (1, 1') и неоднородной (2, 2') подложках. ВАХ структур на однородной подложке сохраняют свой вид после облучения. ВАХ образцов с неоднородно легированной подложкой как  $(n^+-p)$ -Si, так и  $(n^+-n^- -p)$ -Si, имеющие участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), изменяются по параметру  $U_s$  (напряжение переключения). Зависимость  $U_s$  от дозы облучения  $D$  приведена на рис. 3. При малых дозах  $D < 10^4$  рад напряжение переключения растет до  $9 \div 12$  В, а с увеличением дозы более  $10^4$  рад — уменьшается до  $4 \div 7$  В. Очевидно, с ростом дозы изменяется степень влияния положительного радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике на перераспределение напряжения между диэлектриком и областью пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, приводящее к эффекту переключения. При малых дозах величина встроенного положительного заряда  $Q_{built}$  недостаточна для этого, и напряжение переключения растет. Действительно, появление на границе раздела диэлектрик-полупроводник положительного заряда вызывает увеличение концентрации электронов на поверхности полупроводника. Тогда на компенсацию этого наведенного отрицательного заряда уйдет часть положительного за-



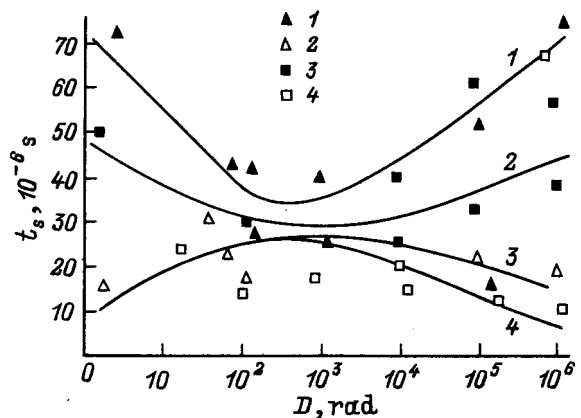
**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики МДП структур с окислом  $Lu_2O_3$  при отрицательном напряжении на полевом электроде до (1, 2) и после (1', 2') облучения дозой  $D = 10^6$  рад. Тип подложки: 1, 1' — n-Si, 2, 2' — n-p-Si.



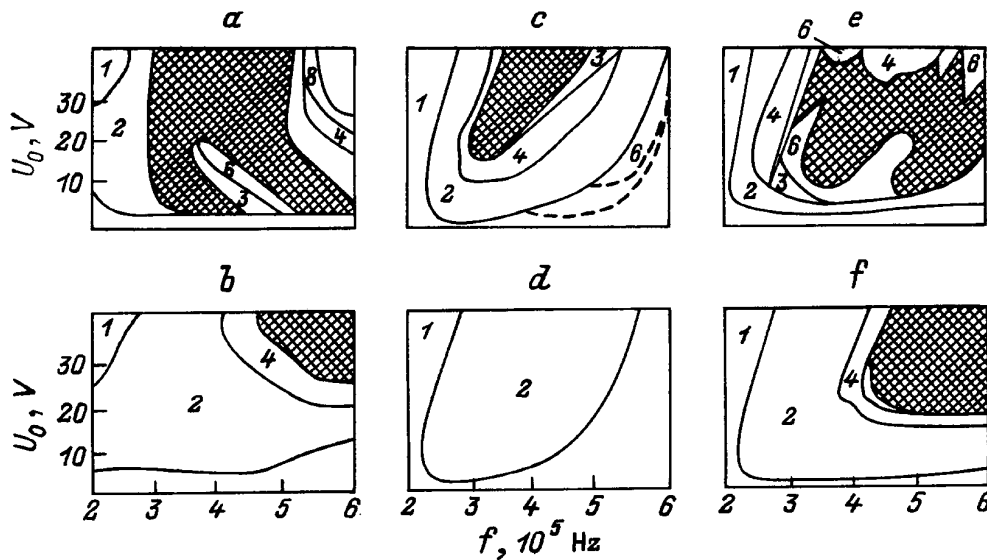
**Рис. 3.** Зависимость напряжения переключения  $U_s$  от дозы облучения  $D$  для МДП структур с диэлектриками: 1 —  $Dy_2O_3$  (СС), 2 —  $Dy_2O_3$  (ОС), 3 —  $Tb_2O_3$  (СС), 4 —  $Tb_2O_3$  (ОС). Типы подложек в структурах, обозначенных: ОС —  $(n^+-p)$ -Si, СС —  $(n^+-n^- -p)$ -Si.

ряда инжектируемых и накапливаемых у поверхности дырок, а достижение необходимой для эффекта переключения концентрации дырок приводит к увеличению  $U_s$ . С увеличением дозы  $D$  до  $10^6$  рад растет величина  $Q_{built}$ , что существенно снижает сопротивление диэлектрика, и перераспределение напряжения наступает при меньшем смещении на полевом электроде, т.е.  $U_s$  снижается. Полученный результат согласуется с данными работы [17], где отмечается роль глубоких уровней в диэлектрике, связанных с центрами, расположенными как вблизи кремния, так и алюминия, накопление заряда на которых в процессе облучения приводит к их зарядке и перезарядке по мере увеличения дозы.

Зависимость времени переходного процесса от дозы облучения представлена на рис. 4. Видно, что при малых ( $U_0 < 10$  В) и больших ( $U_0 > 10$  В) амплитудах импуль-



**Рис. 4.** Зависимость длительности переходного процесса  $t_s$  от дозы облучения. 1, 2 — амплитуда импульса  $U_0 > 10$  В; 3, 4 —  $U_0 < 10$  В. Экспериментальные точки 1-4 соответствуют тем же структурам, что и на рис. 3.



**Рис. 5.** Диаграммы режимов  $RL$ -цепи с МДП структурой до (вверху —  $a, c, e$ ) и после (внизу —  $b, d, f$ ) облучения; типы подложки в структурах:  $a, b$  —  $n$ -Si,  $c, d$  —  $(n^+ - p)$ -Si,  $e, f$  —  $(n^+ - n^- - p)$ -Si. Цифрами 1–4, 6, 8 обозначены области существования колебаний соответствующего периода  $1T$ – $4T$ ,  $6T$ ,  $8T$ . Штриховыми линиями обозначены линии гистерезиса по добавлению. Заштрихованы области хаотических колебаний.

са  $U_0$  зависимости длительности переходного процесса  $t_s$  от величины дозы различны. После выключения импульса амплитудой до 10 В  $t_s$  возрастает с увеличением дозы облучения до  $10^4$  рад, а затем уменьшается. При импульсе с амплитудой более 10 В, переводящем структуру в открытое состояние, время переходного процесса  $t_s$  вначале уменьшается с увеличением дозы облучения, а затем возрастает. Таким образом, ясно, что для каждой области напряжений бистабильного состояния системы с ростом дозы происходит смена механизма релаксации неравновесных носителей заряда.

Объяснение полученных результатов основано на следующем. Если амплитуда импульса меньше  $7 \div 10$  В, структура находится в высокоомном состоянии и время переходного процесса определяется релаксацией накопленных дырок на границе раздела диэлектрик–полупроводник с участием поверхностных состояний. Когда амплитуда импульса достаточна для переключения структуры в низкоомное состояние, время переходного процесса определяется прохождением носителей через диэлектрик. При дозах  $D < 10^4$  рад возникновение радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике сопровождается появлением отрицательного заряда в приповерхностной области полупроводника и электрического поля (оно сохраняется после выключения импульса), направление которого тормозит движение дырок к поверхности. Это вызывает увеличение с дозой времени переходного процесса. Рост дозы облучения до  $10^6$  рад обуславливает снижение вклада указанных факторов, уменьшение падения напряжения на диэлектрике и беспрепятственное движение носителей к поверхности, так что  $t_s$  уменьшается (см. рис. 4, кривые 3,4). Данное

рассуждение подтверждает приведенная на рис. 3 зависимость напряжения переключения от дозы. Обнаруженные особенности (максимумы) в зависимостях  $t_s$  и  $U_s$  от дозы облучения подтверждают нелинейность изучаемых процессов. С ростом дозы увеличивается положительный встроенный заряд, однако его увеличение вызывает не постоянный рост параметров  $t_s$  или  $U_s$ , а только их увеличение до определенного значения, в связи с тем, что происходит перераспределение напряжения между ОПЗ и диэлектриком, в результате чего накопление, релаксация и движение накопленного заряда изменяются. По виду зависимости  $t_s$  от дозы облучения при амплитуде импульса, больше 10 В, (см. рис. 4, кривые 1,2) представляется реальным предположить, что радиационные дефекты в диэлектрике влияют на время прохождения дырок, инжектированных  $p$ – $n$ -переходом, вызывая некоторое их ускорение в интервале  $D = 10^2 \div 10^4$  рад и торможение в интервале  $D = 10^4 \div 10^6$  рад.

Влияние  $\gamma$ -облучения на параметры МДП структуры было также обнаружено при изучении колебательных режимов в  $RL$ -цепи, составленной с МДП структурой. Известно [18], что диаграммы режимов отражают динамику следующих процессов, протекающих в полупроводниковом образце: накопление и релаксацию носителей с участием рекомбинационных центров и поверхностных состояний. Следовательно, изменения параметров поверхностных состояний, которые определяют частотные характеристики МДП структуры, оказывают влияние на возбуждение колебаний в цепи. При приложении периодического напряжения периода  $T$  в системе возникали сложные периодические колебания, имеющие различный период:  $2T$ ,  $3T$ ,  $4T$ ,  $6T$  и хаотические колебания.

На рис. 5 представлены диаграммы режимов структур с тремя типами подложек. Рассмотрим диаграммы режимов цепи с МДП структурой на однородной подложке, где в качестве диэлектрика использована пленка  $Y_2O_3$  (рис. 5, *a, b*). Как видно, до облучения диаграммы режимов имели сложную структуру — области удвоения периода, гистерезиса, хаотического режима. После облучения диаграммы режимов упростились: остались колебания периодов  $1T$ ,  $2T$ ,  $4T$ , область существования хаотических колебаний имеет меньшую площадь.

На диаграмме режимов цепи со структурой на подложке  $(n^+ - p)$ -Si (рис. 5, *c, d*) после облучения остается только область удвоения, а остальные колебательные режимы, обнаруженные до облучения структуры, не наблюдаются (рис. 5, *d*). Диаграмма режимов цепи со структурой на подложке  $(n^+ - n^- - p)$ -Si (рис. 5, *e, f*) до облучения содержала области периодических, квазипериодических и хаотических колебаний. После облучения на диаграмме режимов наблюдались области удвоения периода и хаоса, как и на диаграмме режимов цепи с МДП структурой на однородной подложке (см. рис. 5, *b*). Можно предположить, что упрощение топологии диаграмм режимов отражает изменения в МДП структуре под действием облучения. Увеличивается число центров рекомбинации (в диэлектрике — положительно заряженных центров), вследствие чего возрастает время накопления носителей, и изменяются колебательные режимы при данной частоте и амплитуде внешнего воздействия.

## Выводы

Результаты исследований статических (вольт-амперные, вольт-фарадные) и динамических (время переходного процесса, колебательные режимы) характеристик МДП структур с однородно и неоднородно легированной подложкой согласуются между собой и позволяют считать, что наблюдаемые радиационные изменения в МДП структурах с окислами редкоземельных элементов не противоречат традиционным данным, известным для структур с  $SiO_2$  в качестве диэлектрика [13]. Кроме того показано, что анализ колебательных режимов может быть использован для оценки качества границы раздела кремний–(окислы редкоземельных элементов) в силу своей наглядности и информативности.

## Список литературы

- [1] Vinita Vasudevan, J. Vasin. IEEE Trans. ED, **41**, 383 (1994).
- [2] G.Q. Lo, A.B. Joshi, D.L. Kwong. IEEE Trans. ED, **40**, 1565 (1993).
- [3] Kusi-Shu, Chang Jiao, Jenu-Gwo. IEEE Trans. ED, **41**, 612 (1994).
- [4] В.А. Гуртов, А.И. Назаров, И.В. Травков. ФТП, **24**, 969 (1990).
- [5] В.А. Гуртов, П.А. Райкерус. Микроэлектроника, **16**, 68 (1987).
- [6] Wei Shin Lu, Kuan-Chin. IEEE Trans. ED, **40**, 1598 (1993).
- [7] О.В. Вовк, В.П. Лелеченко, В.И. Солошенко, Я.О. Ройзман, В.А. Чкунина. ФТП, **27**, 1349 (1993).
- [8] П.В. Кучинский. ФТП, **27**, 1354 (1995).
- [9] Д.Г. Крылов, Е.А. Ладыгина, А.П. Галесев. ФТП, **26**, 1347 (1992).
- [10] В.А. Рожков, А.И. Петров. Тез. докл. конф. "Электрофизика слоистых структур" (Томск, 1988) вып. 5, с. 21.
- [11] V.V. Afanas'ev, J.M.M. deNijs, P. Balk. Appl. Phys. Lett., **66**, 1783 (1995).
- [12] N. Sano, M. Sekiya, M. Hara, A. Kohno, T. Sameshina. Appl. Phys. Lett., **66**, 2107 (1995).
- [13] А.М. Емельянов, В.В. Голубев. ФТП, **28**, 2084 (1994).
- [14] M. Gasgnier. Phys. St. Sol. (a), **114**, 11 (1989).
- [15] J.H. Baxter, M.F. Bocko, D.H. Douglass. Phys. Rev. A, **41**, 619 (1990).
- [16] Ф. Мун. Хаотические колебания (М., Мир, 1990).
- [17] Х.К. Альварес, Л.С. Берман, И.Н. Каримов. ФТП, **28**, 1488 (1994).
- [18] Э. Шелль. Самоорганизация в полупроводниках (М., Мир, 1989).

Редактор Т.А. Полянская

## The $\gamma$ -irradiation influence on characteristics of MIS structures with rare earth thin film oxide as an insulator

Y.G. Fedorenko, L.A. Otavina, E.V. Ledeneva, A.M. Sverdlova

Saratov State University,  
410601 Saratov, Russia

**Abstract** The  $\gamma$ -radiation influence on electrophysical characteristics of MIS structures with rare earth thin film as an insulator has been studied. We have investigated current-voltage characteristics, voltage-capacitance characteristics, impulse characteristics and diagrams of oscillation regimes before and after irradiation with a total dose of  $D = 10^4 - 10^6$  rad. Results indicate that  $\gamma$ -radiation dose of  $D = 10^6$  rad cannot induce sufficient degradation of this structures. Radiation induced changes in structures in question are in good agreement with data on radiation stress in  $SiO_2$  films.