

Релаксация заряда в МОП-транзисторах после ионизирующего облучения

Представлены результаты исследования релаксации объемной и поверхностной составляющих сдвига порогового напряжения после γ -облучения для n - и p -канальных МОП-транзисторов, изготовленных по стандартной планарной технологии с поликремниевым затвором и подзатворным оксидом SiO_2 , выращенным в атмосфере кислорода с добавлением сухого или влажного HCl . Показано, что релаксация порогового напряжения обусловлена процессом туннелирования электронов на ловушки в оксиде. По температурной зависимости релаксации сдвига объемной составляющей порогового напряжения определены параметры туннелирования.

Ключевые слова: МОП-транзистор, гамма-облучение, отжиг, энергия активации

Приборы на основе МОП-транзисторов и интегральных схем широко применяются в различных отраслях промышленности в том числе в авиационной и космической технике, где они могут подвергаться воздействию ионизирующего излучения. Отказы большинства приборов после воздействия ионизирующего излучения происходят вследствие эффекта ионизации, а также структурных повреждений материалов, приводящих к изменению их характеристик.

Одним из основных параметров, определяющих работоспособность МОП-транзисторов в электронных схемах, является пороговое напряжение. Под воздействием ионизирующего облучения в МОП-структурах появляется объемный заряд (ОЗ) и заряд на поверхностных состояниях (ПС), их общее воздействие приводит к сдвигу порогового напряжения [1-3]. После воздействия ионизирующего облучения в МОП-транзисторах с течением времени наблюдается частичное уменьшение (релаксация) заряда, выражающееся в смещении порогового напряжения в сторону более положительных значений [4-7]. Скорость этого процесса зависит от температуры отжига и смещения на затворе [4-6]. Объемная и поверхностная составляющие заряда могут вести себя по-разному при облучении и отжиге, поэтому для лучшего понимания физики процессов их влияние нужно рассматривать отдельно. В космической среде доза набирается медленно и скорость релаксации заряда может приближаться к скорости образования заряда. В этом случае при исследовании радиационной стойкости необходимо учитывать отжиг внесенного заряда в процессе и после облучения.

Основной моделью описывающей отжиг заряда в оксиде при низких температурах (в том числе комнатной), является туннельная [5-7]. При однородном начальном распределении захваченных дырок релаксация заряда происходит линейно от логарифма времени $\log(t)$ [5-7]. При более высоких температурах скорость процесса отжига возрастает, что связывается либо с туннельно-активационным [6], либо с термо-эмиссионным механизмом [5], обусловленным переходом дырок с ловушечных уровней в

валентную зону SiO₂. Во всех этих моделях не учитывается отжиг поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂.

Целью настоящей работы является исследование релаксации порогового напряжения и его составляющих после ионизирующего облучения *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторов с оксидами, выращенными с добавками сухого и влажного HCl.

Исследования проводились на *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторах, изготовленных по стандартной планарной технологии с поликремниевым затвором и подзатворным оксидом SiO₂ толщиной 1200 Å, выращенным в атмосфере кислорода с добавлением сухого или влажного HCl. Облучение образцов проводилось на установке ГОТ (гамма-облучатель твердотельных изделий) дозами от 10³ до 10⁷ рад с мощностью излучения $W = 70$ рад/с. Источником излучения служит радиоактивный изотоп Cs¹³⁷. На исследуемых транзисторах измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) до и после облучения с временными интервалами от 3 до 1000 минут. Для *p*-канальных транзисторов также проводились отжиги при температурах 100 и 200°C. Полученные ВАХ анализировались при помощи метода середины запрещенной зоны [8] для разделения сдвига порогового напряжения на объемную и поверхностную составляющие.

Зависимости поверхностной и объемной составляющих сдвига порогового напряжения от времени приведены на рис. 1а, б (*n*-МОП транзисторы, сухой HCl).

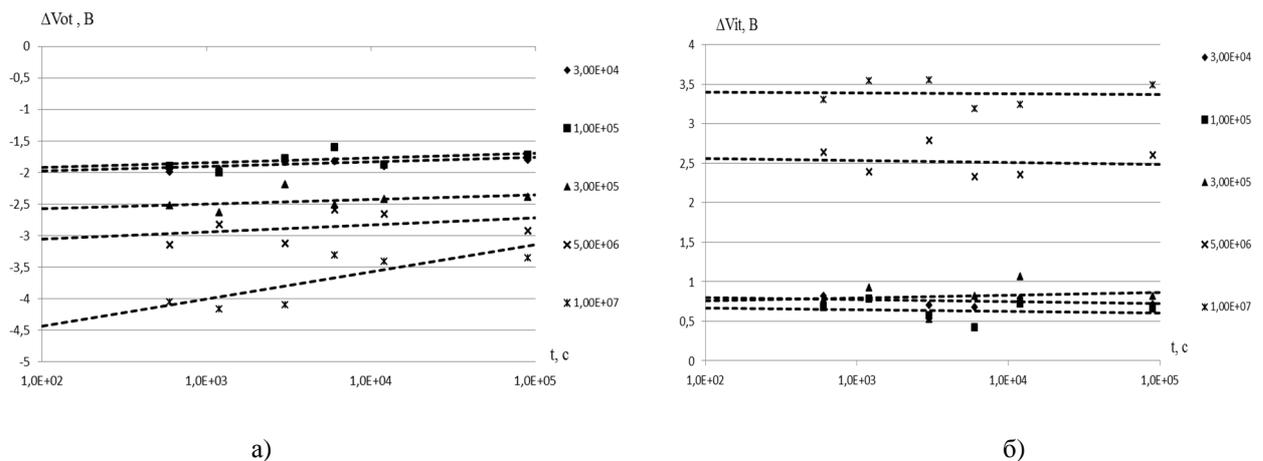


Рисунок 1

Проанализировав графики, приведенные на рис. 1а, можно отметить, что временные зависимости ΔV_{ot} достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью от логарифма времени отжига: $\Delta V = k \lg(t) + b$ (пунктирные прямые на рис.1). Из графика, приведенного на рис. 1б, видно, что сдвиг поверхностной составляющей порогового напряжения не изменяется со временем отжига, то есть отжига ПС не происходит. Таким образом, релаксация порогового напряжения обусловлена только его объемной составляющей.

На рис. 2 приведена временная зависимость ΔV_{ot} для *n*-канального транзистора с подзатворным оксидом, выращенным в атмосфере кислорода с добавлением влажного HCl, а на рис. 3 приведена временная зависимость объемной составляющей ΔV_{ot} для *p*-канального транзистора с подзатворным оксидом, выращенным с добавлением сухого HCl.

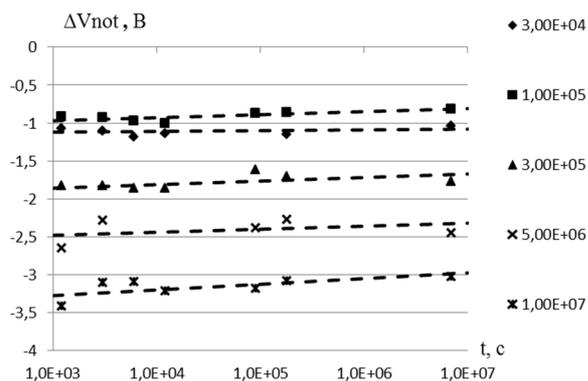


Рисунок 2

Параметрами аппроксимационных прямых являются наклон k , указывающий на скорость изменения сдвига напряжения в масштабе от $\lg(t)$, и параметр b , показывающий величину сдвига порогового напряжения непосредственно после облучения ΔV_{ot0} ($b = \Delta V_{ot}$ при $t = 1c$). На рис.4 построены найденные значения k для n - и p -канальных МОП-транзисторов с различными оксидами (сухой и влажный HCl) в зависимости от начального сдвига порогового напряжения ΔV_{ot0} непосредственно после облучения.

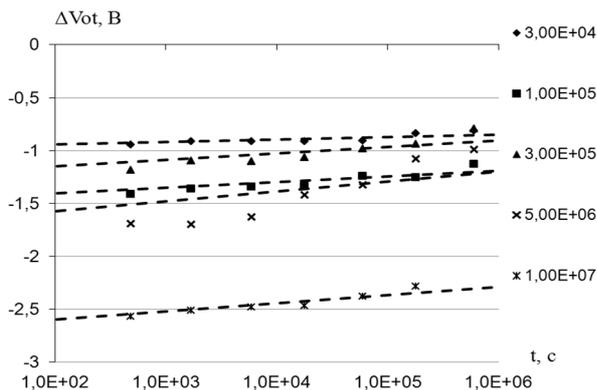


Рисунок 3

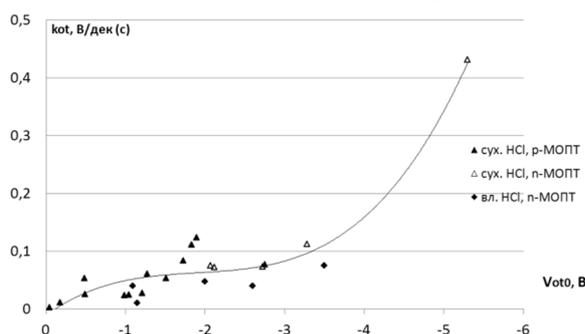


Рисунок 4

Как видно из рис. 4, коэффициенты k примерно одинаковы для сухого и влажного HCl, а также для обоих типов транзисторов. Для обоих типов транзисторов значения k коррелируют с величиной ΔV_{ot0} непосредственно после облучения - имеют небольшие значения при малых величинах внесенного заряда и сильно возрастают при их увеличении.

Исследовалось влияние температуры отжига на временные зависимости сдвига объемной составляющей порогового напряжения p -канальных транзисторов (рис.5). Сдвиг порогового напряжения нормировался относительно его начального значения $\Delta V_{ot} / \Delta V_{ot0}$. Как видно из рис.5, скорость отжига возрастает с ростом температуры. Коэффициенты k для поверхностной составляющей близки к нулю, то есть отжига ПС в рассмотренном диапазоне температур не происходит. Отметим, что найденные значения коэффициентов наклона ($k = 0,080$ В/дек(с) при 300 К, $k = 0,129$ В/дек(с) при $T = 373$ К и $k = 0,167$ В/дек(с) при $T = 473$ К) достаточно близки к литературным значениям ($k = 0,058$ В/дек(с) при 300 К и $k = 0,154$ В/дек(с) при $T = 473$ К [9]). Для определения энергии активации отжига на

рис.6 строилось время t_1 , за которое происходит отжиг 40% внесенного объемного заряда, от обратной температуры. В качестве t_1 бралось время, при котором $\Delta V_{ot} / \Delta V_{ot0} = 0,6$, $t_1 \sim \exp(E_a/kT)$, где E_a – энергия активации, $k=8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К - постоянная Больцмана, T – температура отжига.

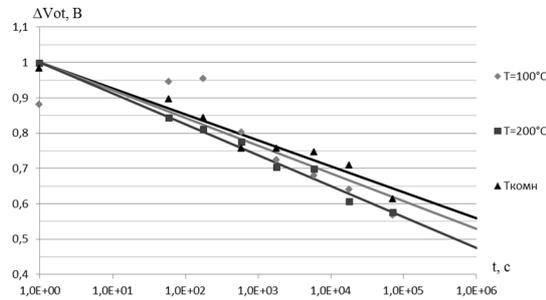


Рисунок 5

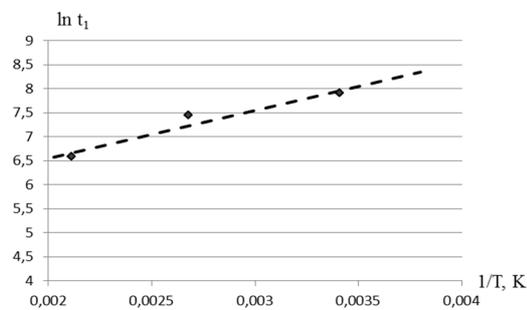


Рисунок 6

По наклону зависимости $\ln t_1 = f(1/T)$ была определена энергия активации отжига, $E_a = 0,13$ эВ. Отметим, что найденное значение ниже энергий активации, полученных ранее (от 0,5 эВ до 1,8 эВ в [4,5,9]).

Таким образом получили, что временная зависимость сдвига порогового напряжения ΔV_{ot} линейно зависит от $\lg(t)$, скорость отжига возрастает с увеличением величины внесенного начального заряда и энергия активации отжига весьма мала. Все это указывает на то, что основным механизмом релаксации положительного объемного заряда, внесенного облучением, является туннелирование электронов из кремниевой подложки на положительно заряженные ловушки, расположенные в оксиде. В этом случае энергия активации отжига соответствует высоте барьера между зоной проводимости кремния и положением уровня ловушек в SiO_2 .

Исходя из полученных экспериментальных данных и теории туннелирования [6, 7], определялась ширина фронта туннелирования x_0 . Для этого на рис. 7 построена зависимость $\Delta V_{ot} / \Delta V_{ot0} = f(t/t_s)$, где t_s – величина, зависящая от температуры, выбранная так, чтобы все временные зависимости при разных температурах ложились на одну кривую ($t_s = 237,14$ с при Ткомн., $t_s = 190,99$ с при $T=393$ К, $t_s = 133,35$ с при $T=493$ К)

По коэффициенту наклона прямой на рис. 7 ($n = 0,11$) можно определить x_0 – ширину фронта туннелирования по формуле [6]: $x_0 = \frac{2.3\Delta V_{ot0}}{\beta n}$, где β - барьерный коэффициент вероятности туннелирования. Величину β можно рассчитать по формуле [7]:

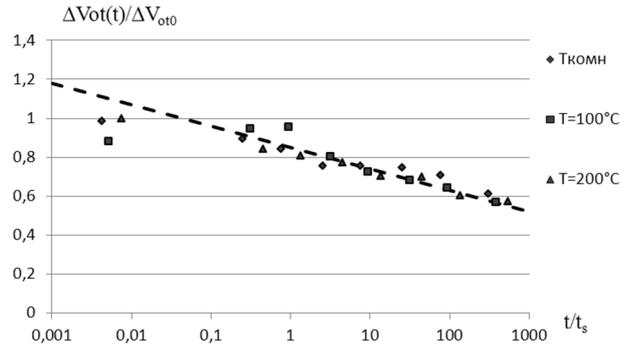


Рисунок 7

$\beta = 2 \left(\frac{2m^* \Phi_T}{\hbar^2} \right)^{1/2}$, где m^* - эффективная масса электрона, \hbar - приведенная постоянная Планка, Φ_T - высота потенциального барьера. В нашем случае при $\Phi_T = Ea = 0,13$ эВ получаем величину $\beta = 2,4 \cdot 10^9$ м⁻¹ и $x_0 = 16,6$ нм. Эти величины примерно соответствуют литературным данным [6,7] с учетом обратной зависимости напряженности электрического поля от толщины диэлектрика.

Библиографический список

1. Согоян А.В. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / в кн. Модель космоса. под. ред. Л. И. Паносюка, Л. С. Новикова // - Москва - 2007. - гл. 1.18. - С. 466-493.
2. Oldham T.R. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices / T.R. Oldham, F.B. McLean // - IEEE Trans. Nuclear Physics. - 2003. - vol. 50 - № 3. - pp. 483-99.
3. Пекарчук Т.Н. Радиационная стойкость МДП-структур и приборов на их основе / Т.Н. Пекарчук, А.К. Хрулёв // - Обзоры по электронной технике. - 1979. - вып. 5. - № 651. - С. 1-61.
4. Danchenko V. Characteristics of Thermal Annealing of Radiation Damage in MOSFET / V. Danchenko, D. Desai // J. Appl. Phys. - 1968. - vol.39. - № 5. - pp. 2417-2424.
5. McWhorter P. J. Miller W.M. Modeling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment / P.J. McWhorter, S.L. Miller, W.M. Miller // IEEE Trans. Nucl. Physics. - 1990. - vol. 37. - № 6. - pp. 1682-1689.
6. Lakshmana V. Logarithmic detrapping response for holes injected into SiO₂ and the influence of thermal activation and electric field / V. Lakshmana, A.S. Vengurlekar // J. Appl. Phys. - 1988. - vol 63. - № 9. - pp. 4548-4554.
7. Kimura M. Generation phenomena of localized interfacial states induced by irradiation and post-irradiation annealing at the Si/SiO₂ interface / M. Kimura // J. Appl. Phys. - 1993. - vol. 73. - № 9. - pp. 4338-4395.
8. McWhorter P.J. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor Transistors. / P. J. McWhorter, P.S. Winokur // Applied Physics Letters. - 1986. - vol. 48. - №2. - pp. 133-134.
9. Hwu J.-G. Improvement in radiation hardness of oxide by successive irradiation then anneal treatments / J.-G. Hwu, S. -L. Fu // Sol. State Electron. - 1989. - vol.32. - № 8. - pp. 615-621.