

©1994 г.

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА В ВОДОРОДЕ И ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГРАНИЦЫ Si-SiO<sub>2</sub>: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИ

*А.М.Емельянов, В.В.Голубев*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 28 февраля 1994 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Изучено влияние циклов отжига в водороде и  $\gamma$ -облучения на электрофизические параметры границы Si-SiO<sub>2</sub> МОП структур с термическими пленками SiO<sub>2</sub>, полученными в «сухом» O<sub>2</sub>. После отжига в водороде в структурах отсутствовала «память» о предшествующем  $\gamma$ -облучении. Развита модельные представления о механизмах генерации и аннигиляции поверхностных состояний. В соответствии с результатами настоящей статьи генерации поверхностных состояний связана с радиолизом включений воды в объеме SiO<sub>2</sub> и распадом групп  $\equiv\text{Si-H}$  на границе Si-SiO<sub>2</sub> при участии радиолитических ионов H<sup>+</sup>.

Предложенные модели качественно объясняют уменьшение плотности поверхностных состояний, вызванное ионизирующим облучением.

Исследованию радиационных изменений электрофизических параметров структур металл-[диоксид кремния]-кремний (МОП) посвящено большое количество работ. Однако вследствие сложности и неоднозначности интерпретации экспериментальных результатов построение физических моделей этих явлений не завершено. Хорошо известно, что основными, существенными для полупроводниковых приборов на основе Si-SiO<sub>2</sub>, изменениями в приграничной к Si области диэлектрика являются генерация поверхностных состояний (ПС) и образование положительного встроенного заряда.

К настоящему времени из исследований плотности ПС и сигнала ЭПР установлено, что большинство ПС представляют собой трехкоординированные атомы кремния. В литературе такие дефекты, если они расположены непосредственно на границе Si-SiO<sub>2</sub>, обозначают как P<sub>b</sub>-центры [1].

Описания основных современных моделей генерации ПС содержатся, например, в [2-5]. Анализ этих и других работ, опубликованных в последние годы, показывает, что многие исследователи придерживаются следующих представлений. Полагают, что в процессе воздействия ионизирующей радиации в объеме пленки SiO<sub>2</sub> происходит распад неких D<sub>1</sub>-центров (где D<sub>1</sub> — дефект или примесь) с образованием

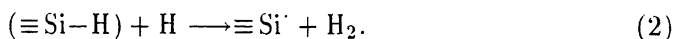
ионов водорода ( $H^+$ ). Образование ПС происходит в результате миграции  $H^+$  к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и взаимодействия их с неидентифицированными  $D_2$ -центрами.

Эта модель по крайней мере на качественном уровне объясняет многочисленные экспериментальные результаты. Однако ее построение не завершено, так как не определена природа  $D_1$ - и  $D_2$ -центров. Соответственно затруднен целенаправленный поиск путей дальнейшего повышения радиационной стойкости МОП приборов.

Согласно [2], некоторые исследователи предполагают, что  $D_2$ -центрами являются группы ( $\equiv Si-H$ ). Генерация ПС при этом в основном происходит по реакции



Кроме того при реализации модели центров ( $\equiv Si-H$ ) возможно протекание экзотермической реакции генерации ПС с участием атомарного водорода [6]:



Сильная зависимость плотности радиационно-индуцированных ПС от величины и знака электрического поля в SiO<sub>2</sub> позволяет предположить, что вклад этой реакции в результирующую плотность ПС незначителен.

Имеются предположения [5], что в основном из центров ( $\equiv Si-H$ ) происходит образование ионов  $H^+$  в объеме SiO<sub>2</sub>.

Известно, что отжиг структур Si-SiO<sub>2</sub> в водороде, как правило, уменьшает плотность ПС, что в рамках описанной выше модели ПС может быть объяснено протеканием реакции



В настоящей работе проведены исследования, направленные на развитие представлений о природе  $D_1$ - и  $D_2$ -центров, о процессах, происходящих в МОП структурах при воздействии на них ионизирующей радиации, и отжиге структур в водороде. Для объяснения результатов экспериментов использованы экспериментальные данные и модельные представления, полученные авторами ранее при исследовании содержащих водород ловушек носителей заряда в пленках термического SiO<sub>2</sub> [7-10].

## 1. Методика проведения экспериментов

Пленки SiO<sub>2</sub> толщиной  $d = 100 \pm 5$  нм получали окислением пластин монокристаллического кремния КЭФ-15 и КДБ-1 ориентации (100) в сухом кислороде при 1000 °С. Полевые электроды (квадраты площадью  $s = 6.4 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>) формировались термическим испарением Al в вакууме на неподогреваемые подложки с последующей фотолитографией. Контакт к подложке изготавливался аналогичным напылением Al после травливания слоя SiO<sub>2</sub> с тыльной стороны пластин Si.

Некоторые образцы после металлизации отжигались в смеси 10% H<sub>2</sub> + 90% N<sub>2</sub> ( $F_G$ ) при 450 °С в течение 30 мин. Часть окисленных

пластин перед нанесением электродов облучалась  $\gamma$ -квантами из источника  $^{60}\text{Co}$  при дозе  $D_\gamma = 10^7$  рад. Мощность источника излучения составляла  $\sim 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ) в час. Часть окисленных пластин, в том числе облученных  $\gamma$ -квантами, перед нанесением электродов отжигалась в водороде в течение 30 мин. Температура отжига составляла 900 или 450  $^\circ\text{C}$ . Время охлаждения пластин до комнатной температуры составляло не менее 10 мин.

После формирования МОП структур проводилось их  $\gamma$ -облучение при различных величинах  $D_\gamma$  без подачи напряжения на полевой электрод.

В настоящей работе для определения плотности быстрых ПС ( $N_{ss}$ ) применялся метод, основанный на измерении  $G$ - $V$ -характеристик (зависимостей малосигнальной активной проводимости МОП структур от напряжения на полевом электроде) в сочетании с измерениями  $C$ - $V$ -характеристик (вольт-фарадных характеристик). Значение  $N_{ss}$  определялось по величине пика кривой  $G$ - $V$  на частоте  $f = 60$  кГц. Аппаратура обеспечивала погрешность определения  $N_{ss}$  не выше 10% при  $N_{ss} > 5 \cdot 10^9 \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  и абсолютную погрешность около  $5 \times 10^8 \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  при  $N_{ss} \lesssim 5 \cdot 10^9 \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Для определения напряжения плоских зон по вольт-фарадной характеристике ( $V_{FB}$ ), связанного с эффективной плотностью и знаком заряда в диэлектрике и на границе  $\text{Si-SiO}_2$ , использовались частота измерительного сигнала  $f = 8$  МГц. Указанная частота в достаточной для наших целей степени обеспечивала выполнение критерия высокочастотности  $C$ - $V$ -характеристик. Плотность медленных ПС определялась по величине гистерезиса  $C$ - $V$ -характеристик ( $\Delta V$ ) на уровне емкости плоских зон при изменении напряжения на МОП структуре в диапазоне  $\pm 35$  В.

## 2. Результаты эксперимента

В табл. 1 показано, каким внешним воздействиям подвергались МОП структуры на основе КЭФ-15 с пленками термического  $\text{SiO}_2$ , приведены результаты измерений  $N_{ss}$ . Для образца серии В из этой таблицы на рис. 1 приведены зависимости от  $D_\gamma$  величин  $N_{ss}$ ,  $V_{FB}$  и  $\Delta V$ . В пределах погрешности эксперимента они не отличаются от аналогичных зависимостей, полученных для образцов серии С из табл. 1.

На рис. 2 показаны зависимости  $N_{ss}$  от  $D_\gamma$  для двух образцов: кривая 1 соответствует МОП структурам серии В (табл. 1), а кривая 2 — МОП структурам, аналогичным образцам серии А, но отличающимся от них тем, что после металлизации они отжигались в  $FG$ .

На рис. 3 и 4 показаны измеренные на частоте  $f = 8$  МГц  $C$ - $V$ -характеристики МОП структур на основе КЭФ-15 и КДБ-1 соответственно, отожженных перед металлизацией в  $\text{H}_2$  при 900  $^\circ\text{C}$ , а после металлизации — в  $FG$ . Кривые 1 соответствуют исходным необлученным структурам, а кривые 2 — после их облучения при  $D_\gamma = 10^7$  рад. По горизонтальной оси отложен потенциал ( $V$ ) на полевом электроде относительно подложки.

В табл. 2 для сравнения приведены значения  $N_{ss}$  и  $V_{FB}$  в МОП структурах, полученных на основе  $n$ -Si и  $p$ -Si, в том числе после  $\gamma$ -облучения. Величина  $V_{FB}$  определялась из  $C$ - $V$ -кривой. Все МОП структуры, указанные в табл. 2, после напыления Si отжигались в  $FG$ .

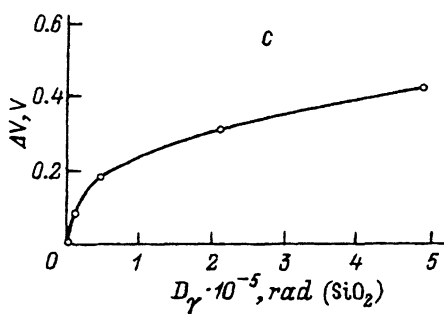
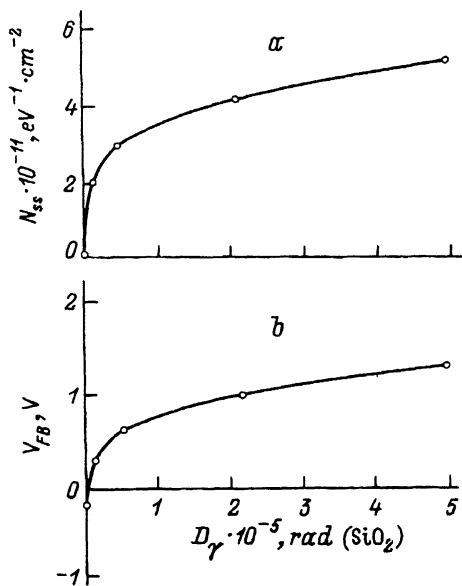


Рис. 1. Зависимости от дозы  $\gamma$ -облучения электрофизических параметров  $N_{ss}$  (а),  $V_{FB}$  (б),  $\Delta V$  (с) МОП структур серии В (см. табл. 1).

Таблица 1. Воздействие на образцы МОП структур и величины  $N_{ss}$

№ образца	Облучение Si-SiO <sub>2</sub> $D_\gamma = 10^7$ рад(SiO <sub>2</sub> )	Отжиг Si-SiO <sub>2</sub> в H <sub>2</sub> , 900 °С	Доза облучения структур Al-SiO <sub>2</sub> -Si, рад(SiO <sub>2</sub> )	$N_{ss}$ , $10^{10}$ эВ <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>
A-1	-	-	Не облучались	9
B-1	-	+		0.2
C-1	+	+		0.4
D-1	+	-		46
A-2	-	-	$2 \cdot 10^4$	28
B-2	-	+		20
C-2	+	+		19
A-3	-	-	$2 \cdot 10^5$	47
B-3	-	+		44
C-3	+	+		45
A-4	-	-	$2 \cdot 10^6$	72
B-4	-	+		67
C-4	+	+		67

**Таблица 2.** Сравнение  $N_{ss}$  и  $V_{FB}$  в МОП структурах на основе  $n$ - и  $p$ -Si

№ образца	Тип подложки	Отжиг Si-SiO <sub>2</sub> в H <sub>2</sub> , 900 °C	$V_{FB}$ , В		$N_{ss}$ , $10^{10}$ эВ <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>	
			Исходное значение	После облучения $D_\gamma = 10^7$ рад(SiO <sub>2</sub> )	Исходное значение	После облучения $D_\gamma = 10^7$ рад(SiO <sub>2</sub> )
11	КЭФ-15	-	-0.9	0	0.8	33
12	"	+	-0.2	+1.0	0.2	36
13	КДБ-1	-	-1.6	-7.0	0.3	43
14	"	+	-0.65	-7.0	0.1	53

**Таблица 3.** Влияние температуры отжига в H<sub>2</sub> на параметры МОП структур на основе КЭФ-15

№ образца	Облучение Si-SiO <sub>2</sub> $D_\gamma = 10^7$ рад(SiO <sub>2</sub> )	Отжиг Si-SiO <sub>2</sub> в H <sub>2</sub> , 900 °C	Отжиг Si-SiO <sub>2</sub> в H <sub>2</sub> , 450 °C	$N_{ss}$ , эВ <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>	
				Исходное значение $V_{FB}$ , В	После облучения $D_\gamma = 1.1 \cdot 10^6$ рад(SiO <sub>2</sub> )
21	-	-	-	-1.3	9
22	-	+	-	-0.2	0.2
23	+	+	-	-0.2	0.4
24	-	-	+	-1.0	3.5
25	+	-	+	-1.0	3.5

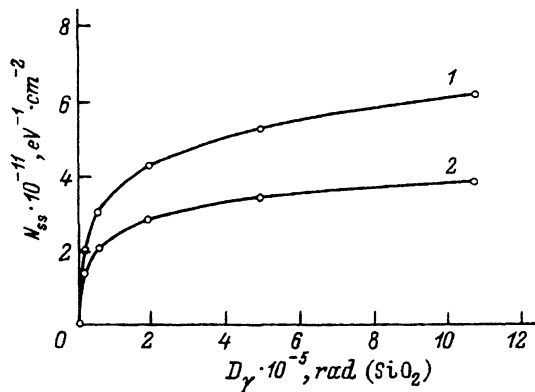


Рис. 2. Зависимости  $N_{ss}$  ( $D_\gamma$ ) для МОП структур серии В (1) и структур А-1, отожженных в FG (2).

В табл. 3 приведены результаты исследований по влиянию температуры отжига в  $H_2$  на уменьшение  $N_{ss}$  и  $\gamma$ -стимулированную генерацию ПС в МОП структурах на основе КЭФ-15.

### 3. Обсуждение экспериментальных результатов

Из результатов экспериментов, представленных в таблицах, на рис. 1, б, 3 и 4, следует, что под воздействием  $\gamma$ -облучения в МОП структурах на основе  $n$ -Si сформировался эффективно отрицательный заряд, а на основе  $p$ -Si — эффективно положительный. Соответственно  $C$ - $V$ -характеристики после облучения сдвигались в сторону положительных или отрицательных напряжений. Как известно [11], величина и знак  $V_{FB}$  определяются встроенным в диэлектрик зарядом и зарядом ПС, причем в верхней части запрещенной зоны Si обычно расположены ПС акцепторного типа (отрицательные, если они находятся ниже

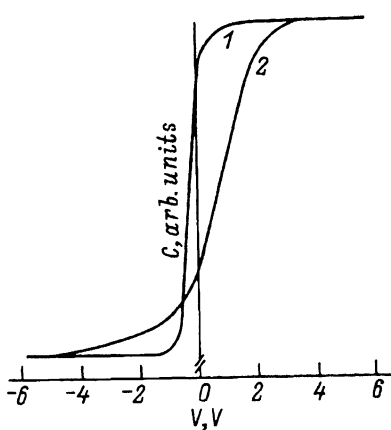


Рис. 3.  $C$ - $V$ -характеристики МОП структур на основе  $n$ -Si: 1 — исходные, 2 — после  $\gamma$ -облучения при  $D_\gamma = 10^7$  рад ( $SiO_2$ ).

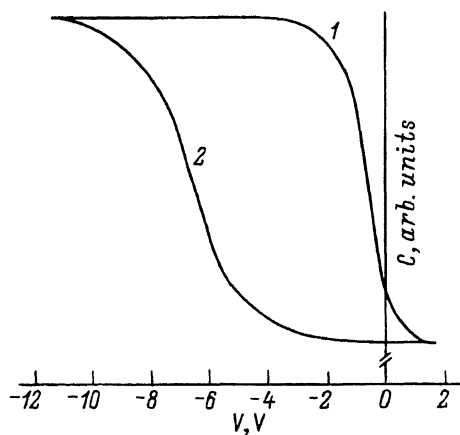


Рис. 4.  $C$ - $V$ -характеристики МОП структур на основе  $p$ -Si: 1 — исходные, 2 — после  $\gamma$ -облучения при  $D_\gamma = 10^7$  рад ( $SiO_2$ ).

уровня Ферми, и нейтральные — выше уровня Ферми) [11], а в нижней части запрещенной зоны — ПС доворного типа (положительно заряженные, если они энергетически расположены выше уровня Ферми, и нейтральные — ниже уровня Ферми [11]). Поэтому знак эффективно заряда, наведенного  $\gamma$ -излучением в исследованных нами образцах, по всей вероятности, был обусловлен знаком заряда ПС. На это указывает и схожий вид зависимостей  $N_{ss}(D_\gamma)$ ,  $V_{FB}(D_\gamma)$  и  $\Delta V(D_\gamma)$ , представленных на рис. 1. Отметим, что зависимости  $V_{FB}(D_\gamma)$  (рис. 1, b) подобны аналогичным зависимостям в [12]. Таким образом, если следовать модели терхкоординированных атомов кремния, то из изложенного следует, что ПС в МОП структурах присутствуют в трех зарядовых состояниях: нейтральном ( $\equiv \text{Si}^0$ ), положительно заряженном ( $\equiv \text{Si}^+$ ) и отрицательно заряженном ( $\equiv \text{Si}^-$ ). Только первый из названных центров имеет неспаренный электрон и может обуславливать появление ЭПР сигнала. Это следует учитывать при интерпретации результатов исследований ЭПР в структурах Si-SiO<sub>2</sub>.

Как видно из результатов, представленных в табл. 1 и 3, отжиг облученных и необлученных структур Si-SiO<sub>2</sub> в H<sub>2</sub> при 900 или 450 °C изменяет  $N_{ss}$  до близких значений.

При последующих облучениях эти два типа структур (облученные и необлученные) практически не различались по основным электрофизическим параметрам, т.е. практически отсутствовала память о предшествующем отжигу в водороде  $\gamma$ -облучении.

Если полагать, что аннигиляция ПС при отжиге в H<sub>2</sub> сопровождалась соответствующим увеличением плотности центров ( $\equiv \text{Si-H}$ ), то с большой долей вероятности полученные результаты подтверждают высказанные ранее предположения о том, что группы ( $\equiv \text{Si-H}$ ) в принятой нами терминологии относятся к  $D_2$ -центрам. Для этой модели  $D_2$ -центров наблюдавшиеся эффекты естественны. Вместе с тем попытки объяснить результаты экспериментов в рамках других возможных моделей  $D_2$ -центров наталкиваются на значительные сложности. Участие водорода в процессах аннигиляции ПС подтверждается тем, что после отжига исходных структур Si-SiO<sub>2</sub> в сухом азоте (отжиг при 900 °C в течение 30 мин и аналогичное используемому при отжиге в H<sub>2</sub> охлаждение) нами не наблюдались существенные изменения в плотности ПС. Для того чтобы перейти к модельным представлениям о природе  $D_1$ -центров отметим следующее. Содержащие паров воды в «сухом» C<sub>2</sub>, используемом при окислении Si, на несколько порядков меньше, чем во «влажном» C<sub>2</sub>. Тем не менее плотности связанных с водой ловушек электронов в пленках термического SiO<sub>2</sub>, изготовленных в сухом и влажном кислороде, обычно различаются только на несколько десятков процентов [9]. При длительной выдержке структур Si-SiO<sub>2</sub> на воздухе естественной влажности указанные плотности ловушек становятся практически одинаковыми [9]. Под связанными с водой понимают ловушки, причиной образования которых является воздействие на SiO<sub>2</sub> паров воды в процессе изготовления пленки и при их последующих обработках. Ранее нами было показано [7-9], что наличие связанных с водой ловушек в пленках термического SiO<sub>2</sub>, полученного сухим окислением, обусловлено в основном их контактом с воздухом в момент после окисления Si до нанесения полевых электродов. Быстрое проникновение воды в такие пленки объясняется наличием в них

структурных дефектов — каналов и микропор [9]. Многочисленные экспериментальные данные согласуются с моделью, в которой образованными таким образом ловушками как электронов, так и дырок в основном являются микроконденсаты воды [8-10].

Естественно предположить поэтому, что основной причиной образования ионов  $H^+$  при  $\gamma$ -облучении в пленках  $SiO_2$ , полученных сухим окислением, может являться радиолиз молекул воды. Это предположение подтверждается и результатами, приведенными на рис. 2. Как показали наши исследования, отжиг МОП структур (в том числе в  $F(G)$ ) при  $450^\circ C$  в течение 30 мин в 1.5-2.5 раза уменьшает плотность связанных с водой ловушек электронов в пленках термического  $SiO_2$ , изготовленных в сухом  $O_2$ . Модельные представления относительно механизма отжига МОП структур содержатся в [8]. В частности, в процессе отжига из-за распада молекул воды и  $H_2$  возможно выделение атомарного водорода, что, по-видимому, объясняет значительное (на порядок величины и более) уменьшение  $N_{ss}$ , в том числе при отжиге в нейтральных средах. Уменьшение плотности ПС в этом случае с одновременным увеличением радиационной стойкости МОП структур не находит объяснения в рамках модели, в которой предполагается, что  $D_1$ -центрами являются группы ( $\equiv Si-H$ ) [5].

Отметим, что обратный эффект, т.е. увеличение генерации ПС после воздействия паров воды на пленки термического  $SiO_2$ , изготовленные в сухом  $O_2$ , наблюдался в работе [13], в которой исследовалась генерация ПС при лавинной инжекции электронов из Si в  $SiO_2$ .

Процедура отжига структур Si-SiO<sub>2</sub> в водороде, использованная в настоящей работе, не исключала контакт SiO<sub>2</sub> с воздухом после отжига. Кроме того, при отжиге в H<sub>2</sub>, вероятно, восстанавливались молекулы воды из продуктов радиолиза (например, по реакции  $OH + H \rightarrow H_2O$ ). Поэтому практически полное отсутствие эффекта памяти об ионизирующем облучении после отжига в H<sub>2</sub> для предложенной модели  $D_1$ -центров неудивительно.

В настоящей работе не было обнаружено существенного влияния отжига структур Si-SiO<sub>2</sub> в H<sub>2</sub> при  $900^\circ C$  на плотность ПС после  $\gamma$ -облучения. Относительно небольшое увеличение  $\gamma$ -стимулированной генерации ПС после указанного отжига наблюдалось лишь в структурах на основе p-Si. Аналогичное отсутствие существенного влияния отжига в водороде ( $900^\circ C$ , 30 мин) зафиксировано и в работе [3]. С другой стороны, имеются работы, в которых указанный отжиг значительно уменьшает радиационную стойкость МОП структур с точки зрения генерации ПС (см., например, [2]). Для объяснения столь различных экспериментальных результатов можно предположить следующее. Как известно, изготовленные из кварцевого стекла трубы, в которых проводится термическое окисление Si, при температурах около  $1000^\circ C$  хорошо проницаемы для водорода. Поэтому внешняя среда, в которой находятся трубы, может являться эффективным поставщиком водорода в окислительную среду. При этом последующий отжиг структур Si-SiO<sub>2</sub> в H<sub>2</sub>, по-видимому, и не влияет существенным образом на концентрацию групп ( $\equiv Si-H$ ), которая, согласно модельным представлениям, ограничивает рост плотности ПС в результате  $\gamma$ -облучения. Причиной уменьшения радиационной стойкости структур после их отжига в H<sub>2</sub> может являться также увеличение содержа-



ния воды в  $\text{SiO}_2$  из-за неконтролируемых особенностей такого отжига и условий последующего хранения структур  $\text{Si-SiO}_2$ .

Хорошо известно, что одним из продуктов радиолиза воды является водород. Если предположить, что выход атомарного водорода при радиолизе в пленках  $\text{SiO}_2$  существенно превосходит выход ионов  $\text{H}^+$ , то по крайней мере на качественном уровне можно предложить объяснение эффекта уменьшения плотности ПС при определенных условиях в результате ионизирующего облучения [1,14]. Действительно, при выполнении этого предположения аннигиляция ПС по реакции (3) непосредственно в процессе воздействия радиации может превалировать над генерацией по реакциям (1) и (2). После прекращения облучения вследствие протекания реакции  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$  и эндотермичности реакции  $\equiv \text{Si} + \text{H}_2 \rightarrow (\equiv \text{Si-H}) + \text{H}$  [6], преваляющей становится реакция генерации ПС (1) с участием образовавшихся ионов  $\text{H}^+$ . Отметим, что, согласно литературным данным (см., например, [2,3]), увеличение плотности ПС происходит в основном после прекращения импульса радиационного облучения и при комнатной температуре продолжается в течение нескольких часов. Если образовавшихся ионов  $\text{H}^+$  относительно мало, то знак изменения плотности ПС ( $\Delta N_{ss}$ ) будет определяться произошедшей аннигиляцией ПС. Например, недостаток  $\text{H}^+$  может иметь место при малых дозах облучения [1]. Кроме того, рассматриваемый эффект может иметь место в широком диапазоне доз облучения, если, например, пленки  $\text{SiO}_2$  содержат пониженную концентрацию  $D_1$ -центров, которая еще более уменьшается за счет инжекции носителей заряда в  $\text{SiO}_2$ . Такая ситуация, вероятно, реализовалась в работе [14]. Электрохимические реакции, которые могут обуславливать уменьшение количества молекул воды в пленках  $\text{SiO}_2$  при инжекции электронов, рассмотрены в работе [10].

#### 4. Заключение

Таким образом, результаты работы позволяют на качественном уровне объяснить и конкретизировать ряд связанных с ионизирующим облучением явлений в МОП структурах в рамках единой наиболее разработанной к настоящему времени модели генерации ПС. Эта модель предполагает образование в объеме  $\text{SiO}_2$  ионов  $\text{H}^+$ , миграцию их к границе  $\text{Si-SiO}_2$  и генерацию ПС в результате взаимодействия ионов  $\text{H}^+$  с  $D_2$ -центрами.

Получены подтверждения высказанных ранее предположений о том, что  $D_2$ -центрами являются группы  $(\equiv \text{Si-H})$ .

Наблюдаемые явления объясняются в рамках модели, предполагающей образование ионов  $\text{H}^+$  в пленках термического  $\text{SiO}_2$ , полученных в сухом кислороде, в основном за счет радиолиза молекул воды. Авторы признательны С.П.Патракееву за помощь в изготовлении образцов.

## Список литературы

- [1] О.В. Вовк, В.П. Лелеченко, В.И. Солощенко, Я.О. Ройзин, В.Н. Чкунина. ФТП, **27**, 1349 (1993).
- [2] N.S. Saks, D.V. Brown. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-**37**, 1626 (1990).
- [3] N.S. Saks, R.W. Rendell. Appl. Phys. Lett., **61**, 3014 (1992).
- [4] R.E. Stahlbush, B.J. Mrstik, R.K. Lawrence. IEEE Trans. Nucl. Sci., **37**, 1641 (1990).
- [5] B.J. Mrstik, R.W. Rendell. Appl. Phys. Lett., **59**, 3012 (1991).
- [6] J.H. Stathis, D.J. DiMaria. Appl. Phys. Lett., **61**, 2887 (1992).
- [7] А.М. Емельянов, В.В. Голубев, В.Г. Коссов. В сб.: *Тез. докл. III Всес. науч. техн. семинара «Пути повышения стабильности и надежности микроэлементов и микросхем»* (Рязань, 1984) ч. 1, с. 118.
- [8] А.М. Емельянов. Микроэлектроника. **15**, 434 (1986).
- [9] А.М. Емельянов, В.В. Голубев, Г.О. Карапетян, В.Г. Коссов. Поверхность. Физика, химия, механика, вып. 2, 77 (1988).
- [10] А.М. Емельянов. Тез. докл. конференций. Сер. 6, *Материалы, «Электрофизика слоистых структур»*, № 4 (280), 111 (1988).
- [11] В.А. Гуртов. *Основы физики структур металл-диэлектрик-полупроводник* (Петрозаводск, 1983).
- [12] J.N. Churchill, F.E. Holmstrom, T.W. Collins. Adv. Electron.: Electron. Phys., **58**, 1 (1982).
- [13] F.J. Feigl, D.R. Young, D.J. DiMaria, S. Lai, J. Calise. J. Appl. Phys., **52**, 5665 (1981).
- [14] A. Balasinski, T.P. Ma. Appl. Phys. Lett., **62**, 3170 (1993).

Редактор Л.В. Шаронова

---