

# Стабилизация заряда на границе со скрытым диэлектриком структур кремний-на-изоляторе

© И.В. Антонова

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 13 января 2005 г. Принята к печати 23 января 2005 г.)

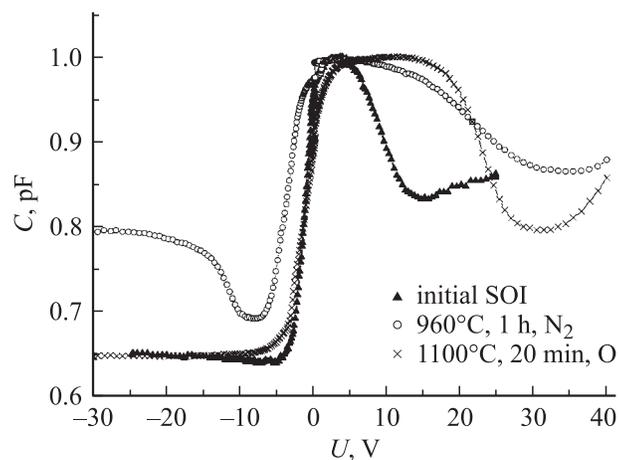
Проведено исследование влияния дополнительной имплантации ионов водорода в область границы раздела между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком структур кремний-на-изоляторе с последующим высокотемпературным отжигом на параметры структур и их радиационные свойства. Такая модификация структур кремний-на-изоляторе приводит к следующим эффектам. Происходит закрепление подвижного заряда, присутствующего в окисле исходных структур, что стабилизирует характеристики структур кремний-на-изоляторе, при одновременном увеличении фиксированного заряда вблизи границы с отсеченным слоем кремния. Кроме того, в окисле вводятся дополнительные ловушки, преимущественно ловушки для электронов, которые при облучении накапливают отрицательный заряд. В результате заряд в окисле структур кремний-на-изоляторе несколько убывает на начальном этапе облучения, а затем практически не меняется до доз  $10^7$  рад. На второй границе структуры при облучении идет обычное накопление положительного заряда, которое характерно и для исходных, немодифицированных структур кремний-на-изоляторе.

## 1. Введение

Развитие технологии структур кремний-на-изоляторе (КНИ) в значительной мере обусловлено тем существенным прогрессом, который достигается при переходе на КНИ с точки зрения радиационной стойкости электронных приборов. Известно, что при облучении приборов и интегральных схем проблемы начинаются уже при дозах  $10^3$ – $10^4$  рад, когда наблюдается рост генерационных токов, уменьшение времени релаксации неравновесного обеднения и др. процессы, приводящие к уменьшению обнаружительной способности МДП фотоприемников и уменьшению эффективности переноса приборов с зарядовой связью [1]. При дозах  $10^4$ – $10^5$  рад имеет место рост объемного заряда в толстых пассивирующих окислах, что вызывает появление паразитных связей между ячейками интегральных схем. И только при дозах  $10^5$  и более рад сказывается накопление заряда в подзатворном диэлектрике. Расположение элементов схем на отдельных островках в структурах КНИ приводит к резкому уменьшению площадей  $p$ – $n$ –переходов и полной изоляции отдельных транзисторов друг от друга. В результате проблемы при облучении приборов на КНИ возникают только начиная с доз  $10^5$  и более рад. Но заряд в приборах, созданных на КНИ, при облучении будет наводиться не только в подзатворном окисле, но и в скрытом диэлектрике структур КНИ. Накопление положительного заряда в окисле приводит к формированию  $n$ -канала в отсеченном слое кремния, возрастанию тока утечки и сдвигу порогового напряжения в  $n$ – $p$ – $n$ -транзисторах. Это создает интерес к исследованию и модификации свойств скрытого диэлектрика в структурах КНИ, причем наиболее оптимальным представляется случай, когда заряд на границе Si/SiO<sub>2</sub> будет постоянным и не будет изменяться при облучении. Возможным решением проблемы накопления заряда можно рассматривать введение в окисел ловушек для

электронов, которые будут компенсировать накопление положительного заряда. Так, в окисле пластин SIMOX, например, присутствуют избыточные атомы кремния, которые, как считается, выступают в роли ловушек электронов, обеспечивая таким пластинам более слабое изменение их параметров при облучении [2]. Кроме того, известно, что имплантация многих примесей в окисел (например, P, Si, Ge, As и др.) приводит к введению ловушек, захватывающих при полевых и радиационных испытаниях отрицательный заряд [3]. Нужно отметить, что центры, введенные при имплантации примесей, захватывают, как правило, не только электроны, но и дырки, и плотность введенных ловушек, как правило, достаточно велика (более  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>). Присутствие ловушек для электронов в окисле, подвергнутом имплантации ионов водорода и отжигу при высокой температуре, известно для структур UNIBOND, когда окисел, подвергавшийся имплантации, служит скрытым диэлектриком [4]. Имплантация водорода в кремний уже использовалась при создании пластин КНИ методом DeleCut, но скрытый диэлектрик не подвергался имплантации [5]. Тем не менее в окисле вблизи границы сращивания также наблюдалось формирование незначительного отрицательного заряда [6]. Кроме того, хорошо известны пассивирующие свойства водорода для состояний на границе Si/SiO<sub>2</sub> и ловушек в окисле.

Цель данной работы заключалась в исследовании свойств структур КНИ, модифицированных путем дополнительной имплантации водорода в область границы с последующим высокотемпературным отжигом. Установлено, что такая обработка материала хотя и несколько повышает исходный заряд в диэлектрике у границы между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком, но приводит к стабилизации подвижного заряда в диэлектрике структур КНИ и к стабилизации заряда при облучении до доз  $10^7$  рад.



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики исходной структуры КНИ и структур КНИ, имплантированных водородом и отожженных при температурах 960°C в течение 1 ч или при температуре 1100°C, 20 мин.

## 2. Детали эксперимента

В качестве исходного материала были использованы структуры КНИ, созданные методом DeleCut [5] из кремния *n*-типа проводимости, с толщиной отсеченного слоя кремния примерно 500 нм и толщиной скрытого окисла 280 нм. В структуры была проведена имплантация ионов водорода с энергией 130 кэВ и дозой  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . При такой энергии ионов их проективный пробег лежит в области границы Si/SiO<sub>2</sub>. Затем пластина отжигалась при температурах 960°C в течение 1 ч в атмосфере азота или при температуре 1100°C, 20 мин, в атмосфере кислорода. Для исследования свойств КНИ были изготовлены меза-структуры Al/Si/SiO<sub>2</sub>/Si/Al площадью  $10^{-2} - 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ .

Для определения параметров структур использовались высокочастотные (1 МГц) вольт-фарадные (*C-V*) характеристики. На *C-V*-характеристиках для структур *n*-Si/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si видны (рис. 1) две области модуляции емкости:

- 1) уменьшение емкости при отрицательных напряжениях соответствует формированию области пространственного заряда (ОПЗ) в подложке при режиме обогащения в отсеченном слое кремния,
- 2) уменьшение емкости при положительных напряжениях связано с формированием ОПЗ в отсеченном слое кремния при обогащении подложки.

Из величин напряжения плоских зон,  $V_{FB}$ , для обеих областей модуляции емкости определялся заряд в диэлектрике для двух границ. Этот заряд включал в себя фиксированный заряд в диэлектрике и заряд на поверхностных состояниях. Для разделения вклада поверхностных состояний в величину фиксированного заряда в окисле использовалось также напряжение, соответствующее положению уровня Ферми приблизительно в середине запрещенной зоны  $V_{mg}$ , из которого

рассчитывался фиксированный заряд в диэлектрике для каждой границы. Выявление ловушек, присутствующих в диэлектрике, осуществлялось методом исследования эффекта поля (накопление заряда в окисле за счет выдержки структур под напряжением). Радиационные свойства структур КНИ, модифицированных имплантацией водорода, исследовались при облучении электронами с энергией 2 МэВ в интервале доз  $10^5 - 10^7$  рад. Накопление заряда в диэлектрике облученных структур также определялось из *C-V*-характеристик на напряжении плоских зон.

## 3. Результаты и обсуждение

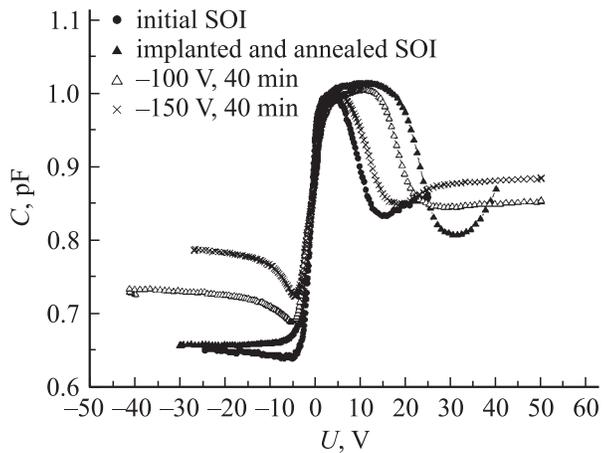
На рис. 1 приведены *C-V*-характеристики исходной структуры КНИ и структур, модифицированных имплантацией водорода и отожженных при разных температурах, а в табл. 1 представлены величины зарядов на обеих границах структуры КНИ, рассчитанные по напряжению плоских зон  $V_{FB}$  или по напряжению  $V_{mg}$ . В первом случае из фиксированного положительного заряда в окисле вычитается отрицательный заряд, захваченный на поверхностные состояния в кремнии *n*-типа. А во втором случае рассчитываемый заряд связан только с фиксированным зарядом в диэлектрике. Величина поверхностных состояний может быть оценена из разности  $Q_f(V_{mg}) - Q_f(V_{FB})$ . Видно, что результатом модификации структур КНИ дополнительной имплантацией является рост положительного заряда на границе между отсеченным слоем кремния и окислом. Причем, как следует из данных табл. 1, модифицированный заряд на границе (отсеченный слой кремния)/(скрытый диэлектрик) одинаков для температур отжига 950 и 1100°C, но в случае более высокой температуры отжига плотность состояний на границе становится существенно ниже ( $7 \cdot 10^{11}$  и  $3.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  для отжига 950 и 1100°C соответственно). На второй границе величина заряда практически не меняется.

На рис. 2 приведены *C-V*-характеристики структур, выдержанных при отрицательном напряжении -100 и -150 В, приложенном к отсеченному слою кремния

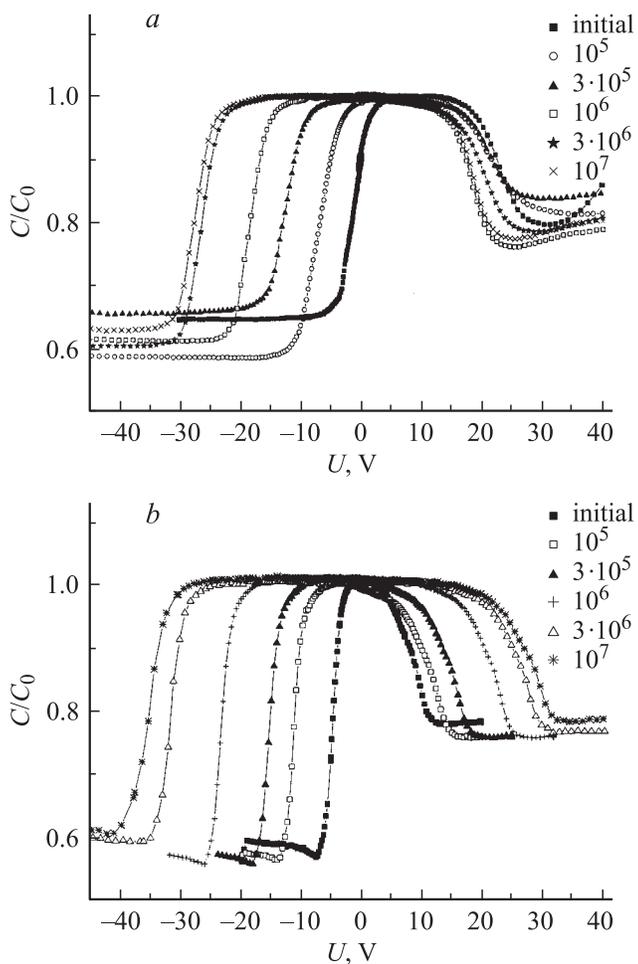
**Таблица 1.** Заряд на границах Si/SiO<sub>2</sub> в исходных структурах КНИ и структурах, облученных водородом и отожженных при  $T_{ann} = 960^\circ\text{C}$  в атмосфере азота и  $T_{ann} = 1100^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода

Структура и $T_{ann}$	Определение по $V_{FB}$		Определение по $V_{mg}$	
	$Q_f, \text{ см}^{-2}$	$Q_s, \text{ см}^{-2}$	$Q_f, \text{ см}^{-2}$	$Q_s, \text{ см}^{-2}$
Исходная	$3.3 \cdot 10^{11}$	$3.3 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^{11}$
960°C	$5 \cdot 10^{11}$	$7.1 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$2.6 \cdot 10^{11}$
1100°C	$8.8 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$2.3 \cdot 10^{11}$

*Примечание.*  $Q_s$  — заряд, приведенный к границе окисел/подложка,  $Q_f$  — заряд, приведенный к границе (отсеченный слой кремния)/окисел.



**Рис. 2.** Вольт-фарядные характеристики исходной структуры КНИ и структур КНИ, имплантированных водородом и отожженных при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ , до и после выдержки при отрицательных напряжениях.



**Рис. 3.** Вольт-фарядные характеристики для исходной (а) и модифицированной (б) структур КНИ в зависимости от дозы облучения электронами с энергией 2 МэВ. Доза облучения приведена на рисунках.  $T_{\text{ann}} = 1100^{\circ}\text{C}$  для модифицированной структуры.

**Таблица 2.** Заряд на границах Si/SiO<sub>2</sub> в структурах КНИ, облученных водородом и отожженных при  $1100^{\circ}\text{C}$ , до и после выдержки под напряжением  $U$  в течение 40 мин

$U$ , В	$Q_f$ , $\text{cm}^{-2}$	$Q_f - Q_{f0}$ , $\text{cm}^{-2}$	$Q_s$ , $\text{cm}^{-2}$	$Q_s - Q_{s0}$ , $\text{cm}^{-2}$
0	$8.8 \cdot 10^{11}$	0	$6.8 \cdot 10^9$	0
-100	$6.6 \cdot 10^{11}$	$-2.2 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^{10}$	$3.2 \cdot 10^{10}$
-150	$3.2 \cdot 10^{11}$	$-5.6 \cdot 10^{11}$	$3.9 \cdot 10^{10}$	$3.2 \cdot 10^{10}$
-200	$-7.6 \cdot 10^{11}$	$-1.6 \cdot 10^{12}$	$-1.3 \cdot 10^{11}$	$-1.3 \cdot 10^{11}$
+100	$9.3 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$	$3.2 \cdot 10^9$

в течение 40 мин. В этом случае имеет место инжекция электронов в окисел со стороны отсеченного слоя кремния. Из рис. 2 следует, что наблюдается накопление отрицательного заряда вблизи границы (слой кремния)/окисел. В табл. 2 даны заряды на обеих границах Si/SiO<sub>2</sub> в данных структурах и изменение этих зарядов по сравнению с исходной структурой. Видно, что на границе (отсеченный слой кремния)/окисел копится отрицательный заряд, и максимальная величина заряда достигает  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Под действием положительного потенциала на отсеченном слое кремния в КНИ наблюдается введение положительного заряда, но существенно меньшей величины (см. табл. 2). Измерение  $C-V$ -характеристики структур через 5–20 мин после снятия напряжения показало стабильность введенного заряда, и что данные структуры не содержат подвижный заряд на границе сращивания.

Изменение  $C-V$ -характеристик исходной и модифицированной структур при облучении представлено на рис. 3. Видно, что если при облучении исходной структуры происходил сдвиг областей модуляции  $C-V$ -характеристик в область больших напряжений, связанный с накоплением заряда на обеих границах, то в модифицированной структуре заряд в основном копится только на границе с подложкой. Наклон в областях модуляции емкости практически не меняется при облучении, что означает постоянство плотности состояний на границах при облучении. Изменение заряда на границах Si/SiO<sub>2</sub>, рассчитанное по  $V_{\text{FB}}$ , в зависимости от дозы электронов для исходной и модифицированных структур представлено на рис. 4. Наиболее стабильной с точки зрения заряда на границе (отсеченный слой кремния)/диэлектрик является модифицированная структура, отожженная при  $1100^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. Обсуждение результатов

В исходных структурах КНИ (без модификации их имплантацией водорода) выдержка структур под напряжением позволяла наблюдать перемещение подвижного заряда в окисле, локализованного вблизи границы с отсеченным слоем кремния, но не приводила к накоплению дополнительного заряда [4]. Величина подвижного заряда составляла обычно  $(2-3) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

Дополнительная имплантация водорода в структуры КНИ в сочетании с высокотемпературным отжигом приводит к существенным изменениям структур. Теперь при изучении эффекта поля в структурах не наблюдается подвижный заряд. По-видимому, произошло закрепление подвижного заряда на дефектах, возникающих при облучении. В результате модифицированные структуры КНИ имеют более стабильные характеристики, что представляется важным для оптимизации параметров структур. Кроме того, видно, что в результате модификации структур КНИ в окисле введены ловушки, преимущественно ловушки для электронов (концентрация ловушек для дырок существенно ниже).

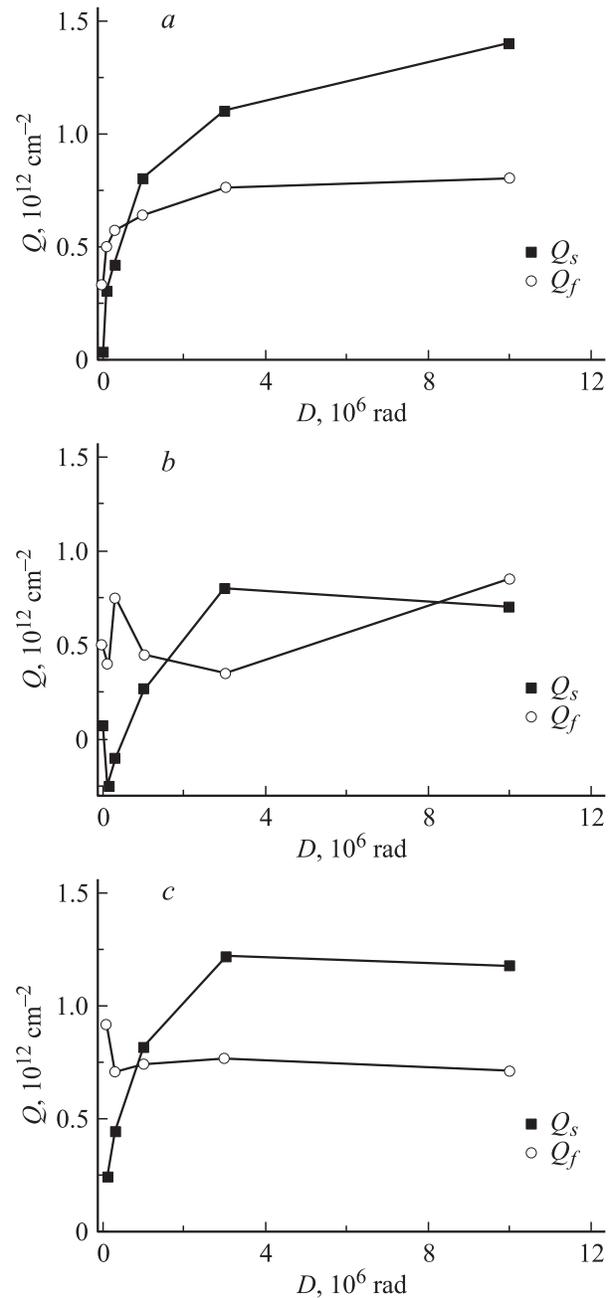
Облучение структур КНИ обычно приводит к накоплению положительного заряда, причем на границе (отсеченный слой кремния)/(скрытый окисел) величина положительного заряда обычно достигает  $(7-12) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при исходном значении  $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . В данной структуре, как видно из рис. 4, *a*, максимальный заряд, накапливаемый при облучении, составляет  $7.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . После модификации этой структуры (температура заключительного отжига  $1100^\circ\text{C}$ ) заряд на данной границе становится даже несколько выше ( $8.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), и в процессе облучения наблюдается (рис. 4, *c*) снижение заряда до  $7.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Интересно, что величина положительного заряда, накапливаемого в исходной и в модифицированной структуре, при облучении практически совпадают несмотря на модификацию структур дополнительным облучением. Но структуры становятся более стабильными, т.е. величина заряда до и после облучения отличаются незначительно. На второй границе структуры при облучении идет обычное накопление положительного заряда, которое характерно и для исходных, немодифицированных структур КНИ.

Использование более низкой температуры заключительного отжига при модификации КНИ приводит к более сложным дозовым зависимостям, где на начальном этапе наблюдается введение отрицательного заряда. В этом случае в структуре, по-видимому, присутствует слабо связанный водород, который влияет на накопление заряда на второй границе окисел/подложка. Эти структуры обладают, кроме того, и высокой плотностью поверхностных состояний (см. рис. 1 и табл. 1). Из общих соображений для стабильности структур КНИ более высокая температура заключительного отжига при их модификации представляется более предпочтительной.

В данной работе не проводилось варьирование дозы облучения при имплантации ионов водорода. Можно надеяться что подбор дозы имплантированного водорода позволит получить более оптимизированные по параметрам структуры КНИ, но возможность стабилизации параметров КНИ явно показана в данном исследовании.

## 5. Заключение

Таким образом, проведение дополнительной имплантации ионов водорода в структуру КНИ с последующим высокотемпературным отжигом приводит к следующим эффектам.



**Рис. 4.** Зависимости величины заряда в скрытом окисле исходной структуры (*a*), модифицированной структуры КНИ, отожженной при  $960^\circ\text{C}$  (*b*) и  $1100^\circ\text{C}$  (*c*), от дозы облучения электронами.  $Q_s$  — заряд, приведенный к границе окисел/подложка,  $Q_f$  — заряд, приведенный к границе (отсеченный слой кремния)/окисел.

Происходит закрепление подвижного заряда протонов в окисле, что приводит к стабильным характеристикам структур КНИ, при одновременном увеличении фиксированного заряда вблизи одной границы с отсеченным слоем кремния. При модификации структур в окисле вводятся преимущественно ловушки для электронов, которые при облучении накапливают отрицательный заряд. В результате заряд в окисле структур КНИ несколько

убывает на начальном этапе облучения электронами, а затем практически не изменяется до доз  $10^7$  рад. На второй границе структуры при облучении идет обычное накопление положительного заряда, которое характерно и для исходных, немодифицированных структур КНИ.

Автор выражает благодарность В.П. Попову за предоставление структур КНИ для исследований.

## Список литературы

- [1] В.А. Гуртов. *Радиационные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник* (Петрозаводск, 1988).
- [2] Y.E. Boesch, T.L. Taylor, L.R. Hite, W.E. Bailey. IEEE Trans. Nucl. Sci., **37**, 1982 (1990).
- [3] A.N. Nazarov, T. Gebel, L. Rebohle, W. Skorupa. J. Appl. Phys., **94**, 4440 (2003).
- [4] A.N. Nazarov, V.I. Kilchytska, I.P. Barchuk, A. Tkachenko. *Abstracts of Meeting of Electrochem. Society* (Washington, N502, 2001).
- [5] Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова. ФТП, **36**, 855 (2002).
- [6] В.П. Попов, И.В. Антонова, Л.В. Миронова, В.Ф. Стась. Патент „Способ изготовления структур кремний-на-изоляторе“, № 216719 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

## Charge stabilization at the silicon/oxide interface in SOI structures

I.V. Antonova

Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The aim of the present work is to study the effect of an additional implantation of hydrogen in the (top silicon layer area)/(buried oxide) interface on accumulation of the positive charge in the buried oxide of DeleCut SOI under electrical field effect and electron irradiation. SOI structure modified by hydrogen implantation demonstrates an increase in fixed charge after the  $1100^\circ\text{C}$  post-implantation annealing. Investigation of the electrical field effect indicates the introduction of electron traps in the buried oxide near the interface with the top silicon layer due to SOI modification. Electron irradiation of the modified SOI structures causes some decrease in the charge value at the (top silicon layer)/(buried oxide) interface at the first irradiation step, and then the charge is kept constant up fluence of  $10^7$  rad. The positive charge at (buried oxide)/substrate interface is accumulated under electron irradiation up to same value as in an initial SOI.