

УДК 621.385.833; 537.533.35

## ГЕТТЕРИРОВАНИЕ КИСЛОРОДА НА ЗАХОРОНЕННЫЙ ДЕФЕКТНЫЙ СЛОЙ, СОЗДАННЫЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ВОДОРОДА

© 2004 г. А. В. Францкевич<sup>1</sup>, Э. И. Рау<sup>2</sup>, Р. А. Сеннов<sup>2</sup>, А. К. Федотов<sup>3</sup>, А. В. Мазаник<sup>3</sup>,  
Н. В. Францкевич<sup>1</sup>, Е. В. Журавкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт микроэлектроники РАН, Черногловка, Московская область, Россия

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 30.09.2003 г.

Полученный способом Чохральского кремний, после имплантации водородом или гелием с энергией 100 кэВ и дозами  $(2-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , обрабатывался в кислородной плазме постоянного разряда при температурах 250 или 500°C, а затем отжигался в вакууме в течение 4 ч при температурах 250 или 500°C. Методом масс-спектрометрии вторичных ионов обнаружено накопление кислорода на глубине проективного пробега  $R_p$  имплантированного водорода. Методом растровой электронной микроскопии в режиме поверхностного электронно-индуцированного потенциала, наведенного электронным лучом, обнаружена электрическая активность крупномасштабных дефектов, располагающихся вблизи  $R_p$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Основным материалом для создания электронных устройств с малым энергопотреблением и высоким быстродействием является кремний на изоляторе (КНИ). Существует три коммерческих способа формирования структур КНИ. Первый из них известен в англоязычной литературе как SIMOX-технология [1], когда субмикронный слой оксида внутри пластины кремния получается после имплантации кислорода дозами  $2 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  и длительного высокотемпературного отжига. Второй – технология BESOI [2] – сводится к сращиванию двух предварительно окисленных кремниевых пластин с последующим утонением одной из них с тыльной стороны, шлифовкой и полировкой до толщины “рабочего” слоя кремния 150–500 нм. Третий способ – SMART-Cut процесс [3], в котором после сращивания предварительно окисленных кремниевых пластин (как и в BESOI) рабочий слой кремния получается не утонением пластины, а отщеплением слоя кремния по дефектной области, созданной предварительной имплантацией водорода дозами, превышающими  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Все эти способы сопряжены с использованием весьма длительных обработок, в том числе высокотемпературных, что резко удорожает данные технологии и ставит вопрос о создании более дешевых способов получения захороненных оксидных слоев и создания КНИ-структур на их основе.

С другой стороны, известно, что кремний, выращенный по Чохральскому, являющийся базовым материалом для современной микроэлектроники, характеризуется высоким содержанием

кислорода. Для очистки рабочей области кремния от кислорода применяется эффект его геттерирования при отжиге в температурном интервале 700–1100°C, приводящем к формированию случайным образом расположенных по объему кремния преципитатов  $\text{SiO}_2$  [4–6]. Хорошо известен также эффект геттерирования растворенных в кремнии примесей В, О, Fe, Cu, Au на различных дефектах, в том числе и радиационных, после отжига при температурах 700–1100°C [7–11].

В работе [7] показана возможность создания наноразмерного захороненного слоя  $\text{SiO}_2$  в кремнии, предварительно имплантированном гелием дозой  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и отожженным в потоке кислорода при температуре 1100°C. Однако при такой температуре происходит также рост оксида на поверхности пластин и формирование преципитатов в объеме кремния.

Главной целью данной работы было изучение возможности низкотемпературного (не выше 300°C) геттерирования кислорода на радиационных дефектах, созданных имплантацией в кремний водорода или гелия.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Были использованы стандартные пластины кремния, выращенного по Чохральскому,  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и исходным содержанием кислорода  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Пластины имплантировались ионами  $\text{H}^+$  с энергией 100 кэВ дозами  $2 \cdot 10^{16}$  (образец А),  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (образец В) и  $\text{He}^+$  с энергией 100 кэВ и дозой  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (образец С) при комнатной тем-

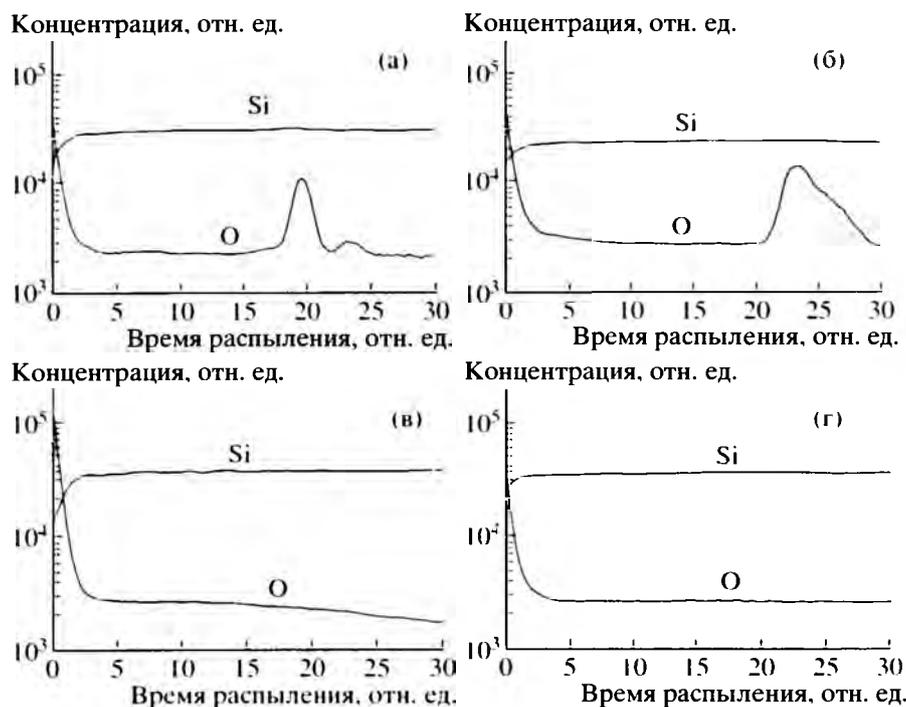


Рис. 1. ВИМС-профили распределения кислорода и кремния в образцах А1 (а), В1 (б), С1 (в) и D1 (г).

пературе. Величина проективного пробега  $R_p$  имплантированных ионов составляет 0.9 мкм для образцов А, В и 0.7 мкм для образца С. Плотность ионного тока во время имплантации была равной 0.2 мкА/см<sup>2</sup>. После этого имплантированные образцы А, В, С и исходный неимплантированный образец D размерами 4 × 4 мм обрабатывались в кислородной плазме постоянного разряда при температуре 250°C в течение 1 ч и затем отжигались в вакууме при температуре 250°C в течение 4 ч. Обозначим их А1, В1, С1 и D1. Плотность тока во время обработки в плазме составляла 2.5 мкА/см<sup>2</sup> при ускоряющем потенциале 1.5 кВ. В таких же условиях, но при температуре 500°C проводилась обработка образцов А2, В2 и С2. Контроль распределения кислорода по глубине производился методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на комплексе САМЕСА IMS-4F (Cs<sup>+</sup>-источники U-10 кэВ). Площадь распыляемой области составляла 250 × 250 мкм, однако анализировались лишь вторичные ионы из центральной области диаметром 10 мкм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 представлены полученные методом ВИМС профили распределения кислорода по глубине для образцов, имплантированных водородом (а, б), гелием (в), а также неимплантированного образца (г) после обработки в кислородной плазме и отжига при  $T = 250^\circ\text{C}$  (образцы А1,

В1, С1 и D1). Необходимо заметить, что в связи с присущими методу ВИМС особенностями измерений, а также сложной морфологией образцов, расчет абсолютной концентрации кислорода затруднен.

Как видно из рис. 1а, б, значительное увеличение концентрации кислорода на глубине наблюдается только для образцов, имплантированных водородом (А1, В1). Для неимплантированного (D1), а также имплантированного гелием (С1) образцов существенного изменения концентрации кислорода по сравнению с фоновым значением не наблюдается (рис. 1в, г).

Согласно данным ВИМС (рис. 1а и б), для образцов А1 и В1 интегральная концентрация кислорода в области глубинного дефектного слоя, созданного имплантацией водорода дозами  $2 \cdot 10^{16}$  и  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>, отличается в два раза. В то же время, согласно результатам, приведенным в [12], количество смещенных атомов кремния после его имплантации водородом дозами  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> составляет соответственно 25 и 50% от общего количества атомов, содержащихся в области захороненного дефектного слоя. Сопоставление этих двух фактов позволяет предположить, что в области глубинного дефектного слоя толщиной  $h$  формируется сложная структура, состоящая из монокристаллического кремния и островков SiOH-групп (рис. 2). При этом SiOH-группы занимают 25 и 50% объема дефектного слоя для доз имплантации  $2 \cdot 10^{16}$  и  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> соответ-

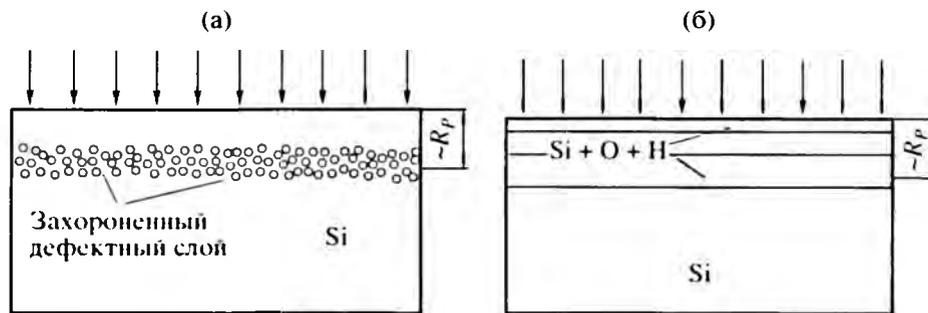


Рис. 2. Технологическая схема процедуры геттерирования: имплантация  $H^+$  или  $He^+$  дозой  $(2-4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (а); насыщение поверхности кислородом и его низкотемпературная диффузия (б).

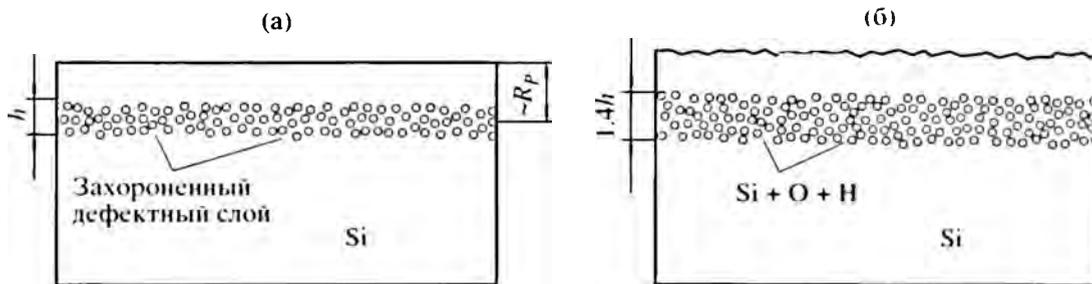


Рис. 3. Схематическое изображение формирования захороненного дефектного слоя при имплантации  $H^+$  в кремниевую пластину (а); трансформация этого слоя и поверхности после насыщения кислородом и вакуумного отжига (б).

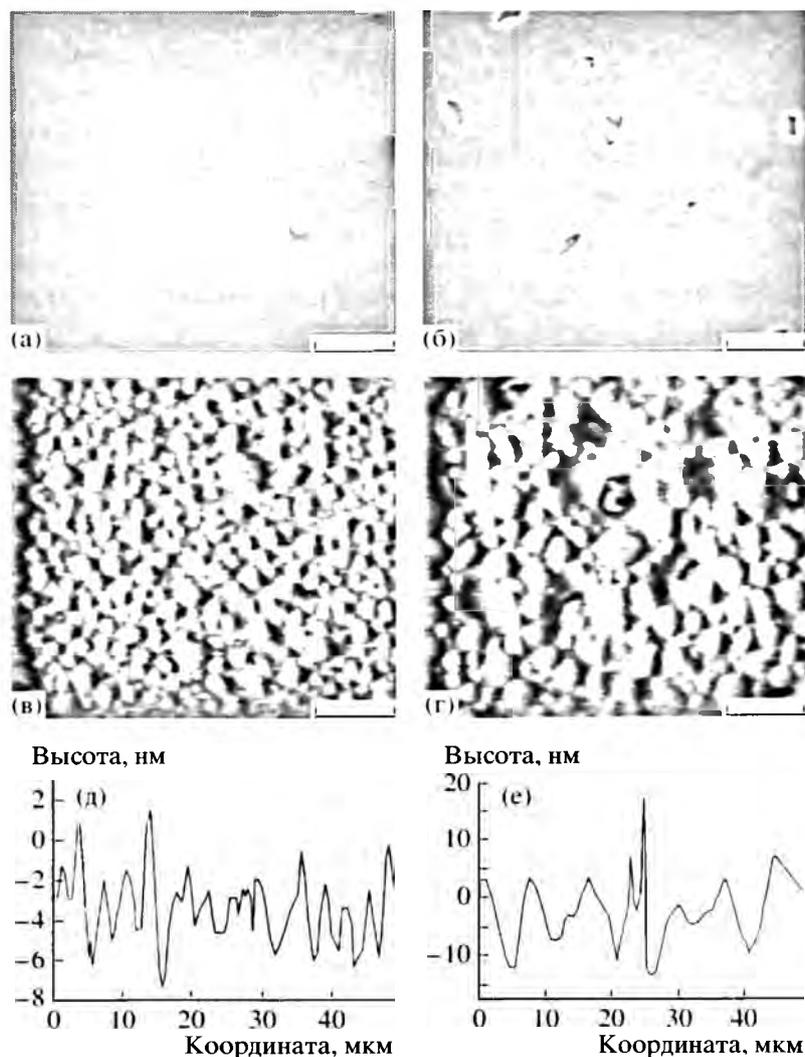
ственно. Нужно заметить, что образование в глубине кремния островков SiOH-групп с меньшей, чем кремний, плотностью должно вести к увеличению объема материала вблизи поверхности пластины и возникновению вследствие этого поверхностного рельефа, по-видимому, отражающего расположение и размеры указанных островков (рис. 3б). Поскольку плотность кремния приблизительно в 1.4 раза выше по сравнению с SiOH, то и толщина захороненного слоя  $h$  в процессе отжига должна увеличиваться приблизительно в 1.4 раза, что и отражено на рис. 3.

Расположение пиков максимальной концентрации кислорода в зависимости от времени распыления для образцов А1 и В1 отличается приблизительно в 1.25 раза. Это объясняется следующими причинами: во-первых, отличающимися по абсолютному значению током распыляющих ионов, во-вторых, разной скоростью ионного травления дефектного слоя, содержащего разное количество SiOH-групп.

Как видно из рис. 1а, профиль распределения кислорода в образце А1 характеризуется двумя четко выраженными пиками. Для образца В1 (рис. 1б) также наблюдаются два пика, хотя второй выражен менее четко, поскольку располагается на растянутом "хвосте" профиля кислорода. Согласно данным работ [9–11], на радиационных дефектах, созданных имплантацией в кремний водорода, гелия или кремния, происходит геттери-

рование содержащихся или введенных примесей, таких как O, Fe, Cu и Au, после отжига при температурах 700–1100°C. Пики максимальной концентрации примесей в этих случаях соответствуют глубинам  $0.5R_p$  или  $R_p$  для ионов, используемых для создания захороненного дефектного слоя. В то же время в работе [13] показано, что в случае геттерирования бора на радиационных дефектах, созданных имплантацией кремния, могут наблюдаться три пика концентрации, положение которых зависит от длительности и температуры отжига в диапазоне 700–1100°C. При этом локализация пиков соответствует глубинам  $0.5R_p$ ,  $R_p$  и приблизительно  $1.25R_p$ . В нашем случае построение корректной шкалы глубин для профиля распределения кислорода весьма затруднительно, однако можно заметить, что отношение времен распыления, при которых наблюдаются пики, составляет 1.25. Поэтому, по аналогии с результатами работы [13], можно предположить, что в нашем случае наблюдается геттерирование кислорода в области  $1.25R_p$ , соответствующей положению дефектов в плоскости {311}.

На рис. 4 сопоставлены результаты исследования образцов А1 и В1, полученные в растровом электронном микроскопе (РЭМ) в режиме вторичных электронов (а, б) и поверхностного электронно-индуцированного потенциала (ПЭИП) (в, г), а также данные профилометрии (д, е). Главное отличие изображений поверхности образцов А1 и



**Рис. 4.** РЭМ-изображения в режиме ВЭ (а, б), ПЭИП (в, г), а также результаты профилометрии (д, е) образцов А1 (а, в, д) и В1 (б, г, е). Масштабная метка на всех рисунках соответствует 10 мкм.

В1, полученных в режиме вторичных электронов (ВЭ), состоит в присутствии на поверхности образца В1 случайно расположенных включений неправильной формы. Вероятнее всего, они соответствуют микроблистерам – вышедшим к поверхности кремния пузырькам водорода, образование которых происходит при дозах имплантации, превышающих  $2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  [14].

Режим ПЭИП позволяет визуализировать электрически активные глубинные дефекты в виде соответствующего контраста [15]. Приведенные на рис. 4 в, г ПЭИП-изображения в виде пятнистого контраста позволяют определить линейные размеры дефектов, упорядоченность их расположения и занимаемую ими площадь.

Пятнистый ПЭИП-контраст существует лишь в образцах, имплантированных водородом дозами не менее  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и насыщенных кислородом

из плазмы с последующим отжигом при  $250^\circ\text{C}$ . Сопоставление вида ПЭИП-контраста (рис. 4в, г) и результатов ВИМС (рис. 1) позволяет утверждать, что рис. 4в, г фактически дают изображение захороненного дефектного слоя, состоящего из кремния и островков SiOH, расположенных на глубине, соответствующей  $R_p$  имплантированного водорода. Линейные размеры островков имеют четко выраженную дозовую зависимость и составляют 1–3 мкм для дозы  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и 2–3 мкм и более (до 5 мкм) для  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Для образца А1 (в отличие от образца В1) наблюдается расположение островков, близкое к гексагональному, с плотностью заполнения порядка 80% площади дефектного слоя.

Данные профилометрии, приведенные на рис. 4д, е, подтверждают высказанное нами ранее предположение о перестройке объема кремния и изменении рельефа его поверхности. При этом

рельеф поверхности практически полностью повторяет рельеф захороненных дефектов.

Следует отметить, что для образцов A2 и B2 контраст в режиме ПЭИП не наблюдался. Контраст также отсутствует для образцов, предварительно имплантированных гелием дозами  $5 \cdot 10^{15}$ ,  $1 \cdot 10^{16}$ ,  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и обработанных в плазме при температуре 250 и 500°C.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка кремния, предварительно имплантированного водородом дозами  $(2-4) \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>, в кислородной плазме постоянного разряда при температуре 250°C и последующий отжиг в вакууме при этой же температуре приводит к геттерированию кислорода в области радиационного дефектного слоя. При данном температурном режиме обработки кремния геттерирование кислорода происходит на дефектах различных типов, расположенных на глубинах  $R_p$  и  $1.25R_p$ . Прямо пропорциональная зависимость количества геттерированных на захороненном слое атомов кислорода от количества смещенных атомов кремния позволяет в конечном итоге говорить о возможности создания сплошного, толщиной порядка 100–200 нм, слоя SiO<sub>2</sub> в объеме кремния.

Методом ПЭИП в образцах, имплантированных водородом дозами не менее  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и насыщенных кислородом из плазмы с последующим отжигом при 250°C, на глубине приблизительно 1 мкм обнаружены электрически активные дефекты раз-

мером 1–3 мкм, предположительно представляющие собой островки групп SiOH.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Katsutoshi Izumi* // MRS Bulletin. 1998. V. 23. P. 20.
2. *Cynthia A. Desmond-Colinge, Ulrich Gosele* // MRS Bulletin. 1998. V. 23. P. 30.
3. *Bruel M.* // MRS Bulletin. 1998. V. 23. P. 38.
4. *Sueoka K., Akatsuka M., Yonemura M. et al.* // Solid State Phenomena. 1999. V. 69–70. P. 63.
5. *Moller H.J., Long L.* // Solid State Phenomena. 1999. V. 69–70. P. 315.
6. *Nakai K., Inoue Y. et al.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 4301.
7. *Raineri V., Campisano S.U.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 3654.
8. *Job R., Ulyashin A.G., Fahmer W.R. et al.* // Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. 2001. V. 72. P. 325.
9. *Kogler R., Peeva A., Anwand W. et al.* // Solid State Phenomena. 1999. V. 69–70. P. 235.
10. *Stritzker B., Petravic M., Wong-Leung J., Williams J.S.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 2682.
11. *Perichaud I., Yakimov E., Martinuzzi S., Dubois C.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. P. 2806.
12. *Bedell S.W., Lanford W.A.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. P. 1138.
13. *Xia J., Saito T., Kim R. et al.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 7595.
14. *Zheng Y., Lau S.S., Hochbauer T. et al.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 2972.
15. *Rau E.I., Zhukov A.N., Yakimov E.B.* // Inst. Phys. Conf. 1997. Ser. № 160. P. 75.

## Gettering of Oxygen onto Buried Defect Layer Created by Hydrogen Implantation

A. V. Frantzkovich, E. I. Rau, R. A. Sennov, A. K. Fedotov, A. V. Mazanik,  
N. V. Frantzkovich, E. V. Zhuravkevich

Silicon grown by the Czochralski method is treated in DC oxygen plasma in the temperature range from 250 to 500°C after implantation with hydrogen and helium with energy of 100 keV and dose of  $(2-4) \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>. Then the samples are annealed at 250 or 500°C for 4 hours. Oxygen accumulation at a depth of projective range  $R_p$  in the samples implanted with hydrogen is observed by the secondary ion mass spectroscopy. Electrical activity of extended defects located near  $R_p$  is observed by the scanning electron microscope in the surface electron beam induced voltage mode.