

05;06;10

## **Влияние электрического поля на зарядовое состояние ионно-имплантированных структур кремний–диоксид кремния**

© А.П. Барабан, Л.В. Милоглядова, В.И. Тер-Нерсисянц

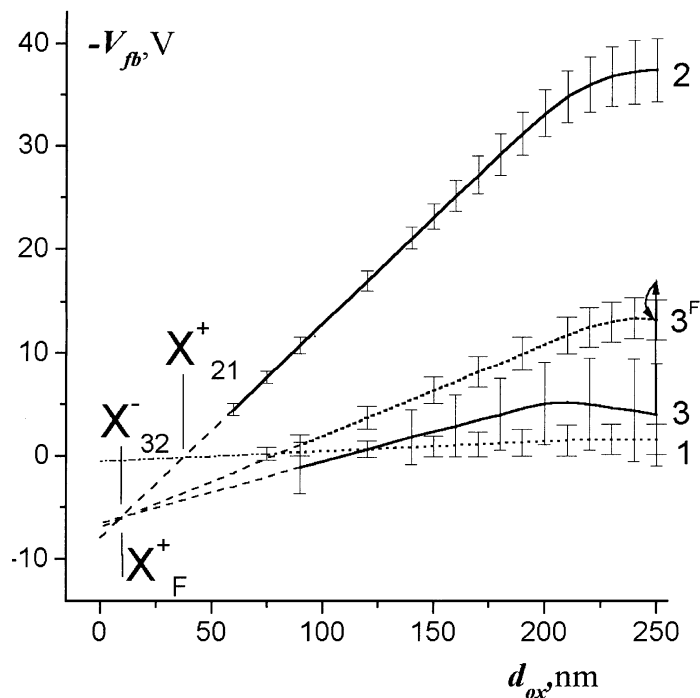
НИИ физики С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 19 сентября 2000 г.

С помощью метода послойного профилирования, основанного на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик в системе электролит–диэлектрик–полупроводник в сочетании со травлением диэлектрического слоя, установлено, что имплантация ионов Ag в окисный слой структур Si–SiO<sub>2</sub> (250 nm) приводит к образованию в объеме SiO<sub>2</sub> положительного и ближе расположенного к поверхности Si отрицательного (начиная с дозы 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) зарядов. Исследовано изменение зарядового состояния данных структур под действием электрического поля. Показано, что отрицательно заряженные центры являются дырочными ловушками, перезаряжаемыми в электрическом поле до нейтрального состояния. Предполагается, что эти центры связаны с образованием атомов немостикового кислорода вследствие перестройки окисного слоя при ионной имплантации начиная с дозы 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>.

В результате ионной имплантации (ИИ) происходит изменение свойств облучаемых объектов, к которым относятся состав подверженного ИИ материала (за счет внедрения имплантантов) и его структура (за счет диссипации энергии ионов при прохождении сквозь тормозящее вещество). Изучение влияний последующих менее энергетичных воздействий на имплантированные структуры позволяет выявить свойства дефектов, образующихся в этих структурах вследствие ИИ, и предположить природу и причины их образования.

Целью настоящей работы являлось изучение свойств и природы дефектов, образующихся в процессе и/или результате ИИ и ответственных за отрицательный заряд в окисном слое структур Si–SiO<sub>2</sub> вблизи межфазовой границы с кремнием.



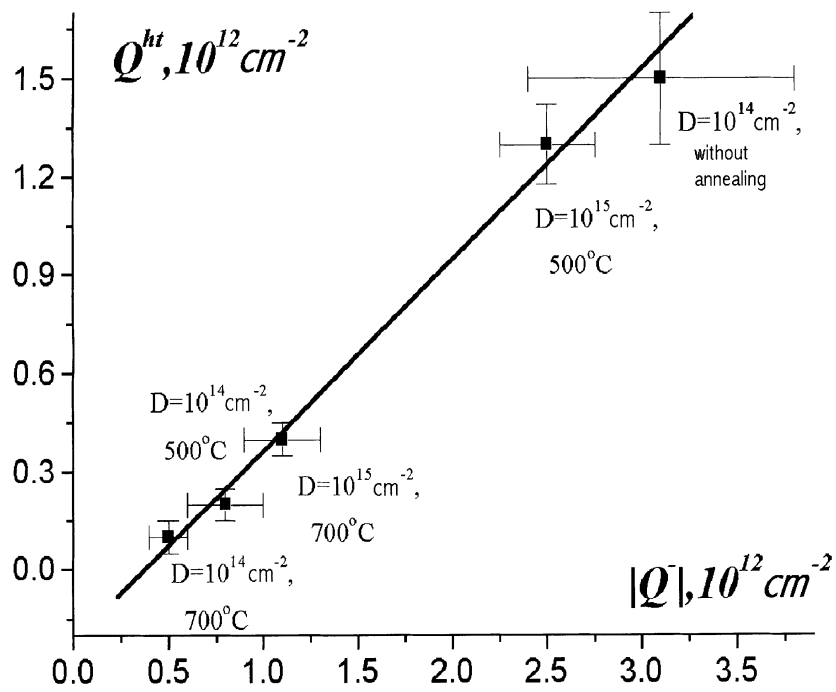
**Рис. 1.** Зависимости потенциала плоских зон от толщины окисного слоя исходных (1) и имплантированных ионами Ag (2, 3) структур Si-SiO<sub>2</sub> (250 nm). 2 —  $D = 10^{13}$  cm<sup>-2</sup>, 3 —  $D = 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>, 3<sup>F</sup> — после полевого воздействия.

В работе исследовались структуры Si-SiO<sub>2</sub>, полученные термическим окислением кремния КЭФ-5 (100) во влажном кислороде при температуре 950°C. Толщина окисного слоя составляла 250 nm. Имплантировались ионы аргона с дозами  $10^{13}$ – $10^{16}$  cm<sup>-2</sup> на установке Eaton Nova 4206 при охлаждении и низкой плотности пучка во избежание сильного нагрева мишени. Энергия ионов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить положение максимума распределения имплантированных ионов посередине окисного слоя и составляла 130 keV. Быстрый термический отжиг (БТО) при температурах 500 и 700°C осуществлялся путем засветки галогенной лампой в атмосфере азота

в течение 10 с. Последующее воздействие электрическим полем осуществлялось в системе электролит–диэлектрик–полупроводник (ЭДП) (+ на Si) при напряжениях, не вызывающих деструктурирующего пробоя диэлектрического слоя исследуемых структур. Для исследования зарядового состояния структур Si–SiO<sub>2</sub> использовался метод послыного профилирования, позволяющий получать зависимость потенциала плоских зон ( $V_{fb}$ ) от толщины окисного слоя (рис. 1), которая и являлась основой для получения информации о величине и распределении зарядов в окисном слое. Положения центроидов локализованных в окисном слое зарядов ( $X$ ) определялись как значения толщин окисного слоя, при которых происходит пересечение интерполированных к нулевой толщине сравниваемых зависимостей  $V_{fb}(d_{ox})$  до и после воздействия, а истинные значения зарядов — из тангенса угла наклона этих зависимостей [1]. Все измерения выполнялись при температуре 293 К.

Ранее установлено, что ИИ при  $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  приводила к формированию в окисном слое вблизи границы с Si положительного заряда (с центроидом  $X = (35 \pm 5) \text{ nm}$ ), величина которого не изменялась при увеличении дозы имплантации [2,3]. Начиная с  $D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в окисном слое данных структур, помимо положительного, образовывался отрицательный заряд (с центроидом  $X = (8 \pm 7) \text{ nm}$ ) (рис. 1), величина которого увеличивалась при дальнейшем увеличении дозы имплантации [2].

Полевое воздействие на неимплантированные структуры Si–SiO<sub>2</sub> и имплантированные при  $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  не приводило к заметному изменению зарядового состояния окисла вблизи межфазовой границы с Si. Полевое воздействие на имплантированные структуры ( $D \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) приводило к образованию в SiO<sub>2</sub> вблизи границы с Si значительного положительного заряда. Центроид такого положительного заряда во всех случаях совпадал с центроидом отрицательного заряда, образующегося вследствие ионной имплантации (рис. 1). Величина положительного заряда, образованного при полевым воздействии, линейно зависела от величины отрицательного (образованного при ИИ) при всех дозах имплантации и температурах БТО (рис. 2). Накопленный в поле положительный заряд практически полностью исчезал при низкотемпературном отжиге ( $T = 200^\circ\text{C}$ ) в течение 30 min. Последующее полевое воздействие приводило к новому накоплению положительного заряда, который, так же как и предыдущий, уничтожался низкотемпературным отжигом.



**Рис. 2.** Зависимость величины положительного заряда, образованного в окисном слое ионно-имплантированных структур Si-SiO<sub>2</sub> (250 nm) вблизи межфазовой границы с Si при воздействии электрического поля, от величины отрицательного заряда, образующегося в той же области окисного слоя структур Si-SiO<sub>2</sub> (250 nm) в результате ионной имплантации.

Совпадение центроида отрицательного заряда в SiO<sub>2</sub>, образованного вследствие ИИ, с центроидом положительного заряда, образующегося при полевом воздействии, и тот факт, что величина положительного заряда линейно зависела от величины отрицательного при всех дозах имплантации и температурах БТО, позволили сделать заключение, что центры, ответственные за данный отрицательный заряд, являются в отрицательно заряженном состоянии кулоновскими дырочными ловушками, заполняемыми в электрическом поле за счет инжекции дырок из Si в SiO<sub>2</sub>.

В результате ИИ за счет взаимодействия ионов Ag с атомной подсистемой матрицы  $\text{SiO}_2$  в объеме окисного слоя происходит формирование двух нестехиометрических областей  $\text{SiO}_x$  с  $x > 2$  и  $x < 2$  [2]. При этом область, обогащенная кислородом ( $x > 2$ ), расположена ближе к поверхности кремния вследствие больших смещений атомов кислорода по сравнению с атомами кремния при взаимодействии с аргоном. С образованием этих областей и соответствующих им дефектов связано появление электрически активных центров в процессе имплантации ионов аргона. Для области, обогащенной кислородом, в которой расположен отрицательный заряд, в процессе и/или результате ИИ наиболее вероятно образование дефектов типа немостикового атома кислорода ( $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{O}$ ). Энергетические уровни таких дефектов как в отрицательном ( $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{O}^-$ ), так и в нейтральном ( $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{O}^0$ ) состоянии расположены в запрещенной зоне  $\text{SiO}_2$  ниже потолка валентной зоны кремния (энергетический уровень  $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{O}^0$  — на 1.9 eV выше потолка валентной зоны  $\text{SiO}_2$ , а  $\text{O}_3 \equiv \text{Si}-\text{O}^-$  — незначительно выше предыдущего [4]). В отрицательно заряженном состоянии такие дефекты могут выступать в качестве кулоновских дырочных ловушек, заполняемых при полевым воздействии за счет инжекции дырок из кремниевой подложки, и перезаряжаться, таким образом, до нейтрального состояния. После прекращения полевого воздействия при низкотемпературном отжиге происходит переход рассматриваемых дефектов в отрицательно заряженное состояние. Такое перезаряжение обусловлено обменом рассматриваемых дефектов носителями заряда либо с кремниевой подложкой (туннелирование и/или прыжковая проводимость), либо с валентной зоной  $\text{SiO}_2$  (ввиду указанного выше энергетического положения уровней дефектов типа немостикового атома кислорода существует большая вероятность таких процессов).

Появление этих дефектов в окисном слое структур  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  начиная с дозы  $D = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  может быть связано с некой структурной перестройкой окисного слоя (связанной с изменением углов и расстояний связей в матрице  $\text{SiO}_2$ ), начинающейся именно при такой дозе имплантации.

Таким образом, использование полевого воздействия позволило предположить, что дефектами, ответственными за отрицательный заряд, образующийся при ИИ, являются дефекты типа немостикового атома кислорода.

## Список литературы

- [1] *Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П.* Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 304 с.
- [2] *Барабан А.П., Кузнецова А.А., Малявка Л.В., Шишлова А.В.* // Изв. вузов. Электроника. 1998. № 4. С. 17–20.
- [3] *Барабан А.П., Малявка Л.В.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 26. В. 4. С. 53–57.
- [4] *O'Reilly E.P., Robertson J.* // Phys. Rev. B. 1983. V. 27. N 6. P. 3780–3795.