

06;12

## **Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных структурах кремний–диоксид кремния**

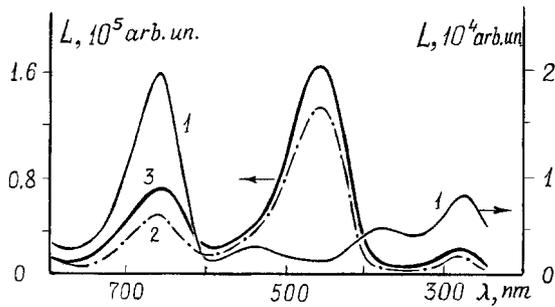
© А.П. Барабан, Л.В. Малявка

Научно-исследовательский институт физики  
С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 4 апреля 1997 г.

Целью данной работы являлось изучение свойств электрически активных центров, образующихся в структурах Si–SiO<sub>2</sub> в результате ионной имплантации аргона в окисный слой. При этом проводились исследования электрически активных центров, образующихся в структурах вследствие ионной имплантации, и изучение процессов дефектообразования в ионно-имплантированных структурах в результате последующих менее энергетичных внешних (например, полевых) воздействий. Исследования проводились электрофизическими и люминесцентными методами в системе электролит–диэлектрик–полупроводник при комнатной температуре. Установлено, что ионная имплантация аргона в объем окисного слоя приводит к образованию электрически активных центров вне области локализации внедренных ионов аргона, и предложена модель их образования.

Ионная имплантация представляет большой интерес как в плане ее использования для фундаментальных исследований аморфных материалов, так и с точки зрения ее широких технологических применений в современной микроэлектронике. Однако, несмотря на многочисленные исследования с использованием разнообразных методик [1–3], остается много неясных вопросов относительно природы и свойств дефектов, возникающих в структурах Si–SiO<sub>2</sub> в результате ионной имплантации. Целью данной работы являлось изучение свойств электрически активных центров, образующихся в структурах Si–SiO<sub>2</sub> в результате ионной имплантации аргона в окисный слой. При этом проводились исследования электрически активных центров, образующихся в структурах вследствие ионной имплантации, и изучение процессов дефектообразования в ионно-имплантированных структурах в результате последующих менее энергетичных внешних (например, полевых) воздействий.



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции структур Si-SiO<sub>2</sub> в исходном состоянии (1) и после имплантации с дозами  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> (2) и  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> (3).

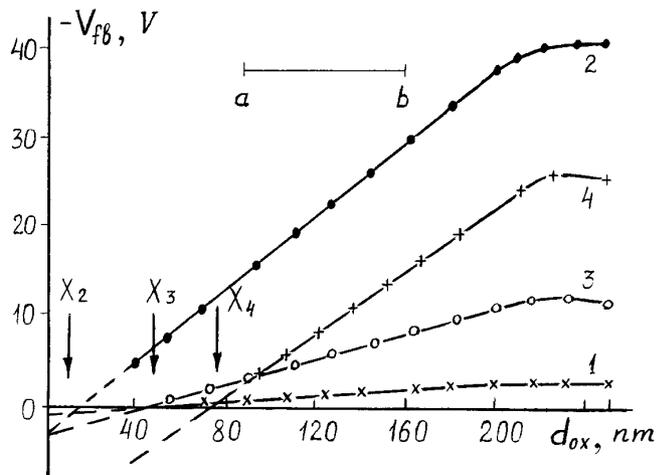
В работе исследовались структуры Si-SiO<sub>2</sub>, полученные термическим окислением кремния КЭФ-5 (100) во влажном кислороде при температуре 950°C. Толщина окисного слоя составляла 250 nm. Имплантация аргона (диапазон доз  $D = 10^{13} - 3.2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) осуществлялась на установке Eaton Nova 4206 при охлаждении и низкой плотности пучка во избежание нагрева мишени. Энергия ионов выбиралась такой, чтобы обеспечить положение максимума распределения имплантированных ионов посередине окисного слоя и составляла 130 keV. Для исследования свойств электрически активных центров применялась система электролит-диэлектрик-полупроводник и разработанные применительно к ней методики: метод электролюминесценции и электрофизические методы — полевых циклов и послойного профилирования, основанные на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик в системе электролит-диэлектрик-полупроводник [4,5]. Все измерения выполнены при комнатной температуре.

На рис. 1 приведены спектры электролюминесценции контрольной структуры и ионно-имплантированных структур Si-SiO<sub>2</sub>. Видно, что ионная имплантация приводит к появлению интенсивной полосы электролюминесценции 2.7 eV, связанной, как было показано ранее, с существованием ненасыщенных Si-O связей в объеме окисного слоя [4]. Кроме того, наблюдается увеличение интенсивности полосы электролюминесценции 1.9 eV, наличие которой обусловлено существованием силанольных групп в окисном слое [4]. Анализ спектров показывает,

что интенсивность этих полос электролюминесценции возрастает с увеличением дозы имплантации аргоном до  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  и затем остается неизменной вплоть до дозы  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ . При этом необходимо отметить, что стравливание окисного слоя до толщины 120 nm не приводит к существенному уменьшению интенсивности полосы электролюминесценции 2.7 eV, что свидетельствует о локализации ответственных за нее центров люминесценции в окисном слое соответствующей толщины.

Исследования ионно-имплантированных структур методом вольт-фарадных характеристик показали, что имплантация аргона ( $D = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) приводит к образованию в объеме окисного слоя эффективного (без учета центроида) положительного заряда и увеличению интегральной плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния, связанной с увеличением плотности непрерывного спектра и с появлением дискретного максимума плотности состояний, расположенного на  $(0.30 \pm 0.05) \text{ eV}$  от дна зоны проводимости кремния. Увеличение дозы имплантации приводит к уменьшению величины эффективного заряда и дальнейшему росту плотности поверхностных состояний, особенно в области дискретного максимума.

Использование метода послойного профилирования, основанного на получении зависимости потенциала плоских зон ( $V_{fb}$ ) от толщины окисного слоя (рис. 2), позволило определить истинные значения образующихся в объеме окисного слоя зарядов, установить их область локализации и положения центроидов. Отклонения от линейности зависимости  $V_{fb}$  от толщины окисного слоя во внешней его части обусловлены зарядением биографических электронных ловушек. При этом, как видно из рис. 2, существенные изменения зарядового состояния ионно-имплантированных структур происходят в окисном слое, расположенном ближе к границе Si-SiO<sub>2</sub>, чем область локализации имплантированного аргона. При этом увеличение дозы имплантации наряду с уменьшением величины суммарного положительного заряда приводит к сдвигу его центроида в глубь окисного слоя. Последующие полевые воздействия на ионно-имплантированные структуры в системе электролит-диэлектрик-полупроводник (метод полевых циклов [5]) показали практически полную стабильность зарядового состояния структур с  $D = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  и образование в объеме окисного слоя значительного положительного заряда для структур с  $D = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и выше (рис. 2). Кинетики накопления этого заряда и влияние на его величину



**Рис. 2.** Зависимость  $V_{fb}$  от толщины окисного слоя для структур Si-SiO<sub>2</sub>: 1 — исходная структура; 2, 3 — после имплантации с дозами  $10^{13}$  и  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> соответственно; 4 — после имплантации с дозой  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> и последующего полевого воздействия;  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  — значения центроидов положительных зарядов для зависимостей (2)–(4) соответственно;  $[ab]$  — область локализации имплантированного аргона.

низкотемпературного отжига ( $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $t = 1$  h), приводящего к его полному исчезновению, позволяют высказать предположение о его связи с зарядением образующихся под влиянием ионной имплантации нейтральных дырочных ловушек, близких по своим свойствам и природе к биографическим дырочным ловушкам в структурах Si-SiO<sub>2</sub> [4].

Полученные результаты позволяют заключить, что ионная имплантация приводит к существенным изменениям свойств структур Si-SiO<sub>2</sub> и эти изменения происходят вне области локализации имплантированного аргона за счет эффектов дальнего действия. Процесс торможения ионов аргона сопровождается их разрядкой и миграцией атомных и электронных возбуждений в глубь окисного слоя. Наблюдаемые при этом изменения зарядового состояния структур с ростом дозы имплантации могут быть объяснены появлением зарядов двух знаков с различным пространственным положением и различной зависимостью

их величины от дозы имплантации. При малых дозах имплантации происходит образование положительного заряда, величина которого растет с увеличением дозы и выходит на насыщение при дозах  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Такое поведение этого заряда коррелирует с поведением интенсивности полосы электролюминесценции 2.7 eV, что позволяет связать его формирование с образованием вблизи границы Si-SiO<sub>2</sub> слоя SiO<sub>x</sub> ( $X > 2$ ), насыщенного положительно заряженными дефектами Si-O<sup>+</sup>. Заметим, что это предположение коррелирует с данными об изменении в результате ионной имплантации концентрации разорванных Si-O связей, полученными методом Фурье ИК-спектроскопии [3]. При дозах, превышающих  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , наряду с описанным процессом происходит образование отрицательного заряда, состоящего из двух компонент: заряда на дискретном уровне поверхностных состояний и заряда в объеме окисного слоя. Образование объемного отрицательного заряда сопровождается формированием нейтральных дырочных ловушек и связано, по-видимому, с образованием под действием имплантации слоя SiO<sub>x</sub> ( $X < 2$ ), локализованного на большем расстоянии от кремния по сравнению со слоем с избыточным кислородом, как это было показано в работе [1]. В этом случае появление отрицательного заряда и нейтральных дырочных ловушек может быть связано с образованием кремниевых кластеров, характеризующихся наличием ненасыщенных кремниевых связей на их границе с окисным слоем. Такие дефекты приводят к формированию амфотерных состояний, способных находиться в различных зарядовых состояниях, как это было показано в работе [6].

Предложенная модель позволяет объяснить наблюдаемые изменения величины суммарного заряда, положения его центроида и влияние последующего полевого воздействия с увеличением дозы имплантации. Однако требуется проведение дальнейших исследований для окончательного установления природы дефектов и механизмов дальнего действия, возникающих при ионной имплантации аргона в окисные слои на кремнии.

## Список литературы

- [1] *Dominquez C., Garrido B., Montserrat J.* et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Rev. 1993. B80/81. P. 1367–1370.
- [2] *Garrido B., Samitier J., Morante J.R.* et al. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. N 21. P. 14 845–14 849.

- [3] *Garrido B., Samitier J., Bota S.* et al. // *J. Non.-Cryst. Sol.* 1995. V. 187. P. 101–105.
- [4] *Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П.* // *Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии*. Л.: Изд. ЛГУ, 1988. 304 с.
- [5] *Барабан А.П., Булавинов В.В., Грошихин А.Г.* // *Письма ЖТФ*. 1993. Т. 19. В. 18. С. 27–30.
- [6] *White C.T., Ngai K.L.* // *J. Vac. Sci. Tech.* 1979. V. 16. N 5. P. 1412–1416.