

05:06:12

Роль маскирующего оксида на кремнии в процессах дефектообразования при формировании SIMOX-структур

© А.Ю. Аскинази, А.П. Барабан, Л.В. Милоглядова

Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-исследовательский институт физики,
198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 21 мая 2001 г. В окончательной редакции 26 октября 2001 г.)

Исследованы структуры Si-SiO₂, сформированные путем имплантации в кремний ионов кислорода (SIMOX-технология) методами, основанными на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик, и методом электролюминесценции. Установлено существование в сформированном окисном слое вблизи границы с кремнием электрически активных центров и центров люминесценции. Выявлена роль маскирующего слоя SiO₂ на кремнии в процессах дефектообразования при формировании замурованного окисного слоя. Установлена зависимость концентрации электрически активных и люминесцентных центров от толщины маскирующего слоя.

Структуры Si-SiO₂ и создаваемые на их основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) являются основой элементной базы современной микро- и твердотельной электроники. В связи с этим изучение свойств данных структур представляет большой научный и практический интерес. Один из способов создания структур Si-SiO₂ заключается в формировании замурованных окисных слоев в объеме кремния путем имплантации в Si ионов кислорода (SIMOX-технология). Уменьшение дефектности таких структур и как следствие повышение их стабильности в электрических полях являются одной из основных тем многих современных исследований. Один из способов изменения свойств замурованного окисного слоя — изменение параметров облучения при формировании SIMOX-структур, в том числе имплантация ионов O в Si, покрытый маскирующим слоем SiO₂ различной толщины.

Целью настоящей работы является определение роли маскирующего SiO₂ на Si в процессах дефектообразования при формировании SIMOX-структур, в частности влияния его на концентрацию образующихся в замурованном окисном слое электрически активных и люминесцентных центров.

В работе исследовались структуры Si-SiO₂, полученные по технологии SIMOX путем имплантации ионов кислорода непосредственно в Si и через маскирующий SiO₂ различной толщины ($d_{sc.ox.} = 46.6, 189.7, 246.4 \text{ nm}$) с дозой $1.8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, энергией 190 keV, при температуре 650°C. Для формирования захороненных слоев SiO₂ использовался постимплантационный отжиг при $T = 1320^\circ\text{C}$ в течение 6 h. После формирования таких окисных слоев верхний слой кремния химически удалялся, в результате чего получали структуры Si-SiO₂ с толщиной оксида 360–425 nm. Последующее воздействие электрическим полем осуществлялось при напряжениях, не вызывающих разрушающего пробоя окисного слоя исследуемых структур.

Для исследования зарядового состояния SIMOX-структур использовались методы, основанные на измерении высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВЧ ВФХ), в частности метод послойного профилирования [1], который позволял получать зависимости потенциала плоских зон (V_{fb}) от толщины окисного слоя (d_{ox}) (рис. 1, 2). Положения центроидов, локализованных в окисном слое зарядов (X), определялись как значения толщин окисного слоя, при которых происходит пересечение интерполированных к нулевой толщине сравниваемых зависимостей $V_{fb}(d_{ox})$, а истинные значения зарядов — из тангенса угла наклона этих зависимостей [1,2]. Для определения в едином цикле наличие и относитель-

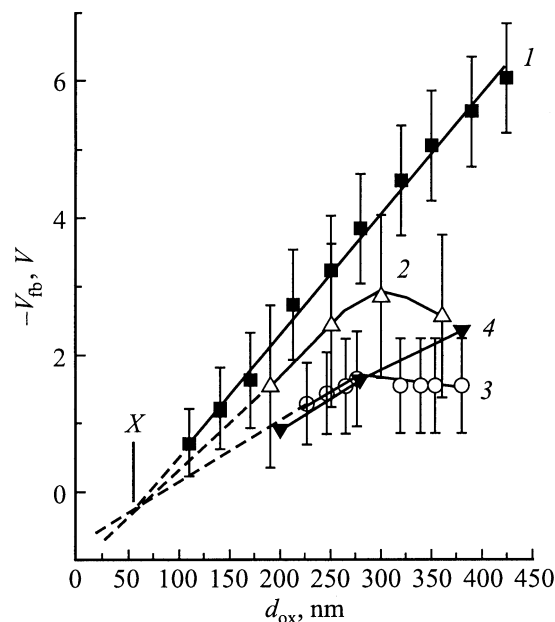


Рис. 1. Зависимости потенциала плоских зон от толщины окисного слоя SIMOX-структур. Имплантация ионов кислорода осуществлялась непосредственно в Si (1) и через маскирующий слой SiO₂: $d_{sc.ox.} = 46.6$ (2), 189.7 (3), 246.4 nm (4).

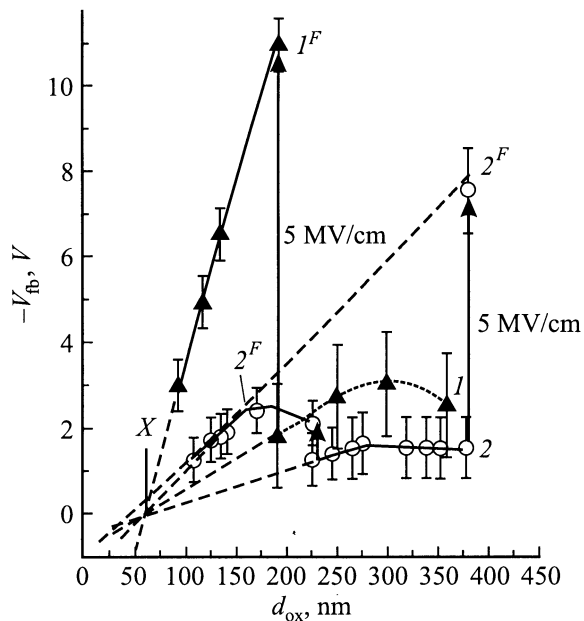


Рис. 2. Влияние полевого воздействия на зависимости потенциала плоских зон от толщины окисного слоя структур Si-SiO₂, сформированных по технологии SIMOX $d_{sc.ox} = 46.6$ (1), 189.7 nm (2); I^F , 2^F — полевое воздействие.

ные концентрации в диэлектрике электрически активных дефектов различных типов использовали метод полевых циклов [1] (рис. 3). Метод электролюминесценции (ЭЛ) (в спектральном диапазоне 250–800 nm) позволял получать информацию о наличии, типе и относительной концентрации дефектов свечения в окисном слое SIMOX-структур по виду спектрального распределения и интенсивности характеристических полос (рис. 4). Все измерения выполнены при температуре 293 K в системе электролит-диэлектрик-полупроводник (ЭДП) [1].

Ранее нами было установлено, что в процессе формирования SIMOX-структур без использования маскирующего слоя в SiO₂ вблизи межфазной границы (МФГ) с Si образуется положительный заряд $Q = (0.4 \pm 0.1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ с центроидом $X = (65 \pm 10) \text{ nm}$ [2]. Использование маскирующего оксида при формировании исследуемых структур приводит к уменьшению величины этого заряда с сохранением значения его центроида (рис. 1). Последующие полевые воздействия на SIMOX-структуры (метод полевых циклов) показали практически полную стабильность зарядового состояния структур в области полей $E_{ox} \leq 2.5 \text{ MV/cm}$ (рис. 3). При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля (начиная с $E_{ox} = 3 \text{ MV/cm}$ в случае структур, созданных без маскирующего оксида; начиная с $E_{ox} = 3.5 \text{ MV/cm}$ при $d_{sc.ox} = 46.6 \text{ nm}$; начиная с $E_{ox} = 4.5 \text{ MV/cm}$ при $d_{sc.ox} = 189.7 \text{ nm}$ и начиная с $E_{ox} = 5.5 \text{ MV/cm}$ при $d_{sc.ox} = 246.4 \text{ nm}$) величина $-V_{fb}$ резко увеличивалась (рис. 3). Это свидетельствовало об образовании в окисле всех рассматриваемых

структур положительного заряда. Его центроид также, как и для структур, сформированных без маскирующего оксида [2], был равен $X = (65 \pm 10) \text{ nm}$ (рис. 2). Величина этого положительного заряда определялась величиной напряженности электрического поля и временем его воздействия.

На основании этого, а также того, что низкотемпературный отжиг не приводил к изменению величины этого заряда [2], полагаем, что образование при полевым воздействии положительного заряда в окисном слое SIMOX-структур связано с трансформацией электрически неактивных центров, образованных при формировании замурованного SiO₂, в электрически активные, положительно заряженные. Сдвиг в область больших значений пороговой напряженности электрического поля, при которой начинался резкий рост величины рассматриваемого заряда при увеличении толщины маскирующего оксида, по-видимому, связан с тем, что с увеличением $d_{sc.ox}$ концентрация таких электрически неактивных центров (трансформируемых при полевым воздействии в электрически активные) уменьшалась и/или для перевода их в электрически активное состояние требовалась большая энергия электронов, а следовательно большая напряженность электрического поля в окисле.

Ранее на основании того, что значение центроида положительного заряда, образованного при полевым воздействии, совпадало со значением центроида положительного заряда, образованного при формировании SIMOX-структур, а также то, что влияние облучения из области ближнего ультрафиолета на оба эти заряда было

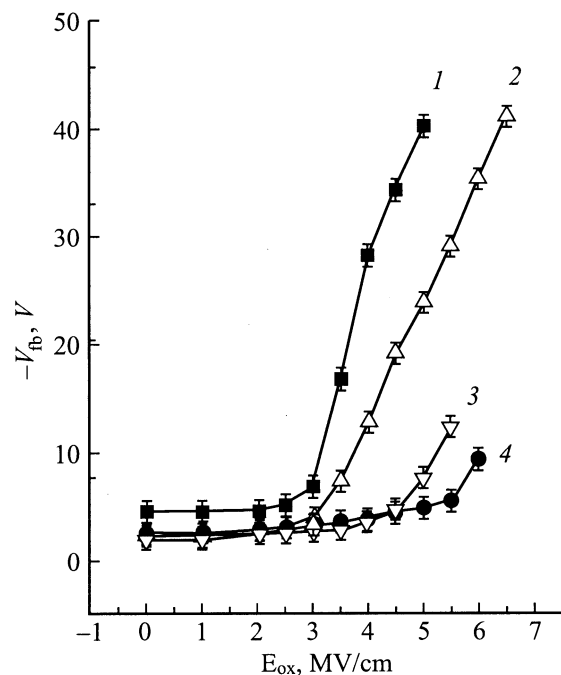


Рис. 3. Зависимости потенциала плоских зон от напряженности электрического поля в окисле структур Si-SiO₂, сформированных по технологии SIMOX. 1 — без маскирующего окисного слоя, $d_{sc.ox} = 46.6$ (2), 189.7 (3), 246.4 nm (4).

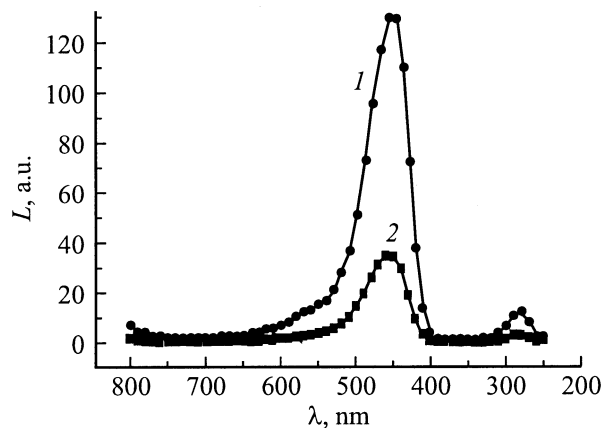


Рис. 4. Спектры ЭЛ структур Si-SiO₂, сформированных по технологии SIMOX. 1 — без маскирующего окисного слоя, 2 — $d_{sc,ox} = 46.6$ nm.

идентичным, а влияние низкотемпературного отжига отсутствовало, предположили, что за данные заряды ответственны дефекты одной природы [2].

Спектры ЭЛ структур Si-термический SiO₂ содержат ряд характеристических полос излучения с энергиями 1.9, 2.3, 2.7, 3.3, 3.8 и 4.6 eV, которые связаны с наличием различных дефектов в окисном слое и в области МФГ Si/SiO₂ [1]. Полоса ЭЛ 1.9 eV возбуждалась термализованными электронами, другие полосы ЭЛ — электронами, разогретыми электрическим полем в окисном слое (в частности, полоса ЭЛ 2.7 eV возбуждалась в полях, больших или равных критическому полю E^* , в котором начинается процесс ударной ионизации матрицы SiO₂) [1].

Спектры ЭЛ исследуемых SIMOX-структур содержали две характерные полосы ЭЛ: (460 nm) и 4.4 eV (280 nm) (рис. 4) [3]. Полоса ЭЛ 2.7 eV имела то же энергетическое расположение и описывалась тем же гауссианом ((0.26 ± 0.07) eV), как и в случае структур с термически выращенным SiO₂, но возбуждалась в полях, меньших E^* , и ее интенсивность была значительно больше, чем в спектрах структур Si-термический SiO₂. В ультрафиолетовой области спектра ЭЛ наблюдалась одна отчетливо выраженная полоса излучения с энергией 4.4 eV, хорошо аппроксимируемая гауссовым распределением со среднеквадратичной дисперсией (0.31 ± 0.11) eV [3].

Интенсивности данных полос не изменялись при послойном стравливании окисного слоя до 250 nm от МФГ с Si. Это позволило установить, что ответственные за их появление центры люминесценции локализованы в окисном слое толщиной не более 250 nm от границы с кремнием.

В данном спектре полностью отсутствовала полоса ЭЛ 1.9 eV, что указывает на отсутствие в окисном слое силанольных групп (которые, как было установлено ранее [1], ответственны за данную полосу свечения). Это объясняется особенностью технологии формирования

таких структур, исключающей проникновение в окисный слой фрагментов воды (водорода и гидроксильных групп).

На рис. 5 представлены зависимости интенсивностей полос ЭЛ 2.7 и 4.4 eV, а также величины положительного заряда, образующегося в SiO₂ при формировании SIMOX-структур, от толщины маскирующего слоя. При увеличении толщины маскирующего SiO₂ интенсивности полос ЭЛ и величина положительного заряда уменьшались и их изменения были существенными уже при использовании маскирующего слоя толщиной 46.6 nm. Причем интенсивности полос ЭЛ 2.7 и 4.4 eV уменьшались в одинаковое число раз, что свидетельствовало в пользу того, что за обе полосы ЭЛ ответственны одни и те же дефекты.

Для выявления роли изменения энергии имплантируемых атомов кислорода после их прохождения через маскирующий слой оксида в наблюдаемом уменьшении

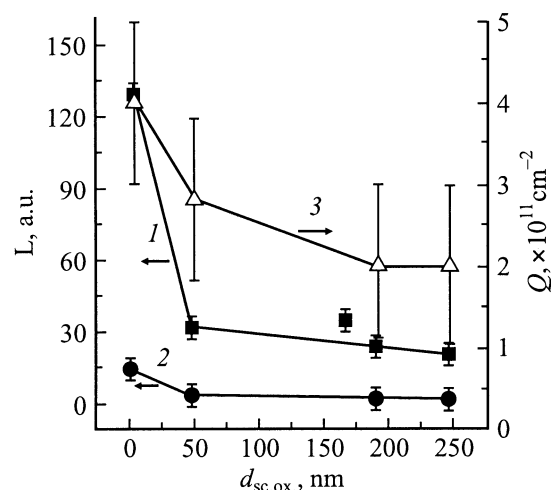


Рис. 5. Зависимости интенсивностей полос ЭЛ в спектрах структур Si-SiO₂, сформированных по технологии SIMOX, и величины положительного заряда в замурованном SiO₂ от толщины маскирующего оксида. 1 — полоса ЭЛ (2.7 eV), 2 — полоса ЭЛ (4.4 eV), 3 — величина положительного заряда.

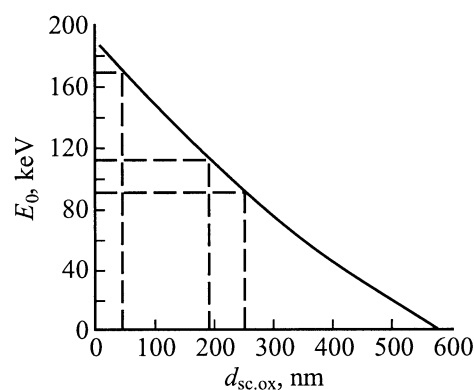


Рис. 6. Зависимость энергии имплантированных ионов кислорода от толщины маскирующего слоя SiO₂.

интенсивностей полос ЭЛ и величины заряда нами были выполнены расчеты потерь энергии атомов кислорода, имплантируемых с начальной $E_0 = 190 \text{ keV}$, после прохождения ими слоя SiO_2 [4] (рис. 6).

Сопоставляя рис. 5 и 6, заметим, что незначительное уменьшение энергии внедряемых атомов кислорода (при малых толщинах маскирующего оксида) сопровождается существенным уменьшением интенсивности полос ЭЛ и величины положительного заряда, причем при дальнейшем значительном уменьшении энергии внедряемого кислорода указанные величины практически не изменяются.

На данном этапе исследований можно предположить, что за положительный заряд в окисле ответственны дефекты типа трехкоординированного атома кремния, модифицированные примесными атомами [2].

На основании ранее полученных нами результатов и анализа литературных данных [3,5], полагаем, что за полосы ЭЛ 2.7 и 4.4 eV ответственны дефекты типа двухкоординированного кислородом кремния ($\text{O}_2 = \text{Si} \cdot$), которые возбуждаются горячими электронами с энергией $\sim 5 \text{ eV}$.

Появление при формировании SIMOX-структур дефектов типа трехкоординированного атома кремния (модифицированных примесными атомами) и дефектов типа двухкоординированного кислородом атома кремния можно связать с образованием в SiO_2 вблизи МФГ с Si микрокристаллических кремниевых вкраплений, наличие которых установлено в ряде работ [6–8]. Уменьшение интенсивностей рассматриваемых полос ЭЛ и величины положительного заряда с увеличением толщины маскирующего оксида коррелирует с уменьшением плотности островковых включений кремния в SiO_2 вблизи тыльной границы с Si [9].

Существенное уменьшение концентраций центров люминесценции, электрически активных дефектов и преддефектов при незначительном уменьшении энергии ионов кислорода, входящих в Si, позволяет утверждать, что данные процессы связаны не с уменьшением энергии налетающих ионов кислорода, а с тем, что при прохождении через аморфный маскирующий слой SiO_2 (даже малой толщины) происходит расфокусировка потока ионов, тем самым хаотизируется направление их движения и уменьшается суммарный импульс внедренных в кремний ионов кислорода. В этом случае практически не происходит проникновения отдельных ионов кислорода на значительное расстояние в глубь кремния и при последующем отжиге практически не образуется область SiO_2 с малым содержанием атомов кислорода, следовательно, создается существенно меньшая концентрация дефектов типа двухкоординированного по кислороду атома кремния и типа трехкоординированного атома кремния.

Уменьшение дефектности образующегося окисного слоя при формировании SIMOX-структур с использованием маскирующего SiO_2 может быть связано и с уменьшением проникающих в Si загрязнений, а также

с перераспределением потерь энергии на электронную и атомную подсистемы кремния влетающих в него атомов кислорода при незначительном уменьшении их энергии, что имеет место в данном случае [4].

Таким образом, наличие на поверхности кремния маскирующего оксида при создании структур кремний–двуокись кремния по SIMOX-технологии приводит к значительному уменьшению в формируемом окисном слое вблизи границы с кремнием концентрации положительно заряженных дефектов, преддефектных состояний и центров люминесценции в полосах 2.7 и 4.4 eV. Уменьшение концентрации преддефектных состояний приводит к повышению полевой стабильности формируемых Si– SiO_2 структур.

Список литературы

- [1] Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO_2 на кремнии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 304 с.
- [2] Аскинази А.Ю., Барабан А.П., Дмитриев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 27. С. 57–61.
- [3] Барабан А.П., Коноров П.П., Малявка Л.В. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 87–90.
- [4] Руссел X., Руже И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 360 с.
- [5] Skuja L.N., Streletsky A.N., Pakovich A.B. // Sol. State Commun. 1984. Vol. 50. N 12. P. 1069–1072.
- [6] Afanas'ev V.V., Stesmans A., Revesz A.G. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. N 5. P. 2184–2199.
- [7] Stahlbush R.E., Campisi G.J. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. NS-39. P. 2086–2097.
- [8] Stoemenos J., Garcia A. et al. // J. Electrochem. Soc. 1995. Vol. 142. N 4. P. 1248–1260.
- [9] Bota S., Perez-Rodriguez A., Morante H.R. et al. // VI Intern. Symposium on Silicon-On-Insulator Tech. and Devices. San Francisco, 1994. P. 179–184.