

УДК 537.311.33

ПАССИВИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ОКСИДОВ КРЕМНИЯ, НАНЕСЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ $p-n$ ПЕРЕХОДОВ МЕТОДОМ КАТОДНО-РЕАКТИВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В. М. Волле, В. Б. Воронков, В. А. Козлов, Е. Штейнбайс, К. Штанбек, В. Экке

Показано, что применение пленок оксидов кремния со встроенным положительным зарядом для пассивации поверхности приборов силовой электроники приводит к уменьшению обратных токов и стабилизации их вольтамперных характеристик. Пленки получены в реакторе магнетронного типа.

Максимальная блокирующая способность $p-n$ перехода ограничена величиной напряжения объемного пробоя его слоев $U_{пр. об.}$. Однако достижению предельных блокируемых $p-n$ переходом напряжений может препятствовать развитие поверхностного пробоя при напряжениях $U_{пр. пов.} < U_{пр. об.}$. Известно, что одной из причин преждевременного пробоя по поверхности является наличие на ней поверхностного заряда. Так, для $p-n$ переходов на кремнии в типичном случае на поверхности имеется положительный заряд, который сужает ширину слоя объемного заряда (СОЗ) в приповерхностных областях [1]. В результате напряженность электрического поля на поверхности достигает критического значения, достаточного для развития пробоя, при низких напряжениях. Расширение СОЗ на поверхности с целью устранения поверхностного пробоя обычно достигают путем придания краевому контуру $p-n$ перехода определенного профиля.

В некоторых случаях, однако, ширина поверхности краевого контура оказывается недостаточной для размещения СОЗ при полном обратном напряжении. Такая ситуация реализуется, например, в приборах с ограничением СОЗ ($p^+ - n - n^+$ переходы) и особенно для супервысоковольтных приборов на основе Si с малой концентрацией легирующей примеси ($\sim 5 \cdot 10^{12}$ и менее). В этих случаях для достижения максимальной блокирующей способности приборов оказывается полезным сжать СОЗ на поверхности с целью предотвращения поверхностного пробоя вблизи $n-n^+$ перехода [2]. Достижение оптимального распределения электрического поля на поверхности таких приборов возможно при положительном поверхностном заряде определенной величины, что предъявляет соответствующие требования к способу пассивации поверхности.

В настоящей работе приведены результаты исследования пассивации поверхности краевого контура $p^+ - n - n^+$ диодов пленками SiO_2 , создающими на поверхности однородный заряд положительного знака. Диоды изготавливались по стандартной технологии путем диффузии алюминия и бора в n -Si в открытой трубе. Удельное сопротивление исходного Si составляло 150—300 Ом·см. Пленки SiO_2 наносились на положительные фазки $p^+ - n - n^+$ структур с помощью катодного реактивного напыления в реакторе магнетронного типа [3]. На катоде-мишени, роль которого выполняла пластина кремния толщиной 2 мм, поддерживалось постоянное напряжение. Разряд создавался в атмосфере, которая образуется при внедрении $0.03 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ газовой смеси, состоящей из O_2 (25 %), Ar (65 %) и паров H_2O (10 %) при общем давлении 0.4 Па и мощности

~350 Вт. Толщина пленки SiO_2 получалась $d_{\text{ок}} \approx 1$ мкм при расстоянии диода от катода 6 см и времени напыления 12 мин. Для контрольных исследований слои SiO_2 напыляли на чистые пластины Si n -типа. После напыления структуры отжигались на воздухе в течение 1 ч при 200—500 °С.

Исследовались обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) $p^+ - n - n^+$ диодов, а также параметры глубоких уровней путем измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) и методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) при постоянной емкости [4]. ВФХ измерялись на частоте 100 кГц при $T = 295$ К. Кроме того, из напряжения плоских зон U_{FB} определялся эффективный заряд в окисле $Q_{\text{ок}}$ на границе с Si в различных местах поверхности фаски.

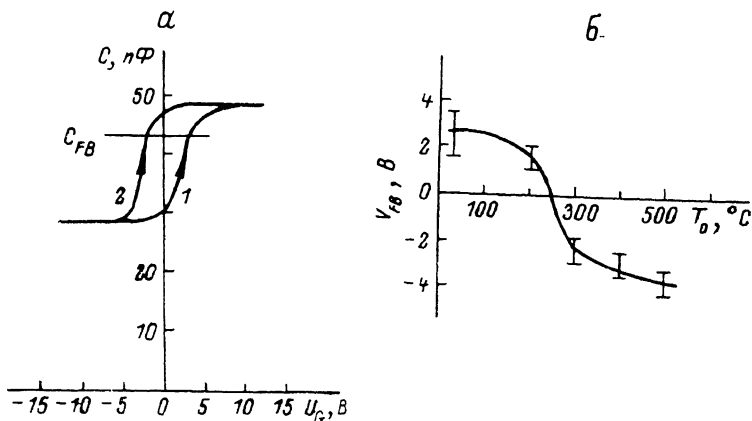
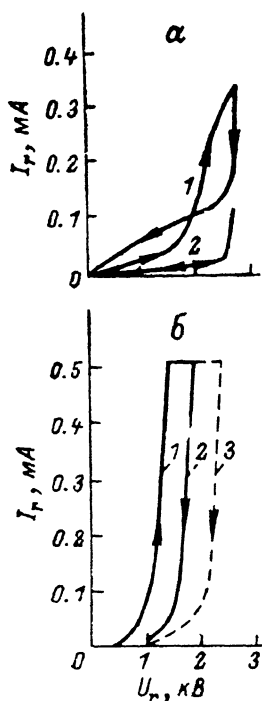


Рис. 1.

На рис. 1, а представлены ВФХ МОП структуры на n -Si с катодно-напыленным слоем SiO_2 сразу после напыления (1) и после отжига в течение часа при $T = 300$ °С (2). Видно, что непосредственно после напыления пленки SiO_2 имеют отрицательный заряд. Величина этого заряда зависит от размеров радиационных дефектов пленки, вызванных воздействием УФ излучения, заряженных и нейтральных частиц во время напыления и увеличивается с ростом мощности разряда. Отжиг образцов приводит к изменению величины, а затем и знака поверхностного заряда (рис. 1, б). При $T > 250$ °С он отжигается настолько, что результирующий заряд становится положительным. Такое действие отжига характерно для эмиссии электронов с трехкратно связанных кислородом атомов кремния $\equiv \text{Si}^-$ в зону проводимости SiO_2 [5]: предполагается, что избыточный электрон дефекта $\equiv \text{Si}$ [5, 6] образует энергетический уровень около 1.8 эВ ниже зоны проводимости SiO_2 . Донорное состояние этого дефекта имеет уровень несколько выше дна зоны проводимости Si и в незаполненном состоянии дает положительный результирующий заряд в слое SiO_2 [6]. Из рис. 1, б видно, что путем соответствующего выбора температуры отжига можно создавать на поверхности фаски встроенный заряд требуемой величины: $Q = -U_{\text{FB}} C_{\text{ок}} / A$, где $C_{\text{ок}}$ — емкость окисла, A — площадь МОП структуры, U_{FB} — напряжение плоских зон ($\rho_{\text{Si}} = 5$ Ом·см, $d_{\text{ок}} = 0.32$ мкм, $A = 0.05$ см²).

Рис. 2, а иллюстрирует стабилизирующее влияние пассивирующих пленок SiO_2 на ВАХ диодов. Видно, что до нанесения пленки обратный ток I_r $p^+ - n - n^+$ диода нестабилен (по всей видимости, из-за дрейфа подвижных ионов на поверхности [7]). Он сильно зависит от условий окружающей среды (в частности, от влажности и времени выдержки после травления в травителе СР-4). Пассивация ведет к уменьшению и стабилизации I_r , при правильном выборе Q достигаются расчетные напряжения пробоя. Стабилизирующие свойства исследованных пленок объясняются наличием в них радиационных дефектов, способных в значительной мере уменьшить дрейф подвижных ионов (как правило, ионов щелочных металлов) в пленках SiO_2 на границе с Si [8, 9]. Такие дефекты с глубокими уровнями наблюдались в катодно-напыленных окислах ранее [10]. Однородность распределения заряда по поверхности фаски

исследовалась измерением напряжения плоских зон МОП структур, созданных непосредственно на пленке SiO_2 готового диода. Проведенные измерения показали высокую однородность Q при условии сохранения во время напыления



стационарных условий разряда. В то же время при напылении в условиях нестабильности разряда (или при перемещении образца во время напыления) заряд по фаске оказывается распределенным неоднородно. ВАХ такого диода показана на рис. 2, б. Малые значения $U_{пр}$ в данном случае объясняются наличием на фаске областей с неотожженным отрицательным зарядом, вызывающих образование в этих местах каналов инверсии и резкое повышение I_r . При выдержке таких структур под напряжением обратный ток несколько уменьшается. Это иллюстрируют кривые 2 и 3, снятые после выдержки диода под напряжением соответственно 2 и 10 мин. Выдержка диода без напряжения в течение 24 ч приводит к восстановлению исходного вида ВАХ (кривая 1 на рис. 2, б). Такое влияние обратного напряжения на величину I_r объясняется следующим образом. Из спектров НЕСГУ исследованных структур

Рис. 2. Обратные ВАХ $p^+ - n - n^+$ диода при $T = 295^\circ\text{K}$ (а) и диода с неоднородно распределенным зарядом в слое SiO_2 при $T = 295^\circ\text{K}$ (б).

а: 1 — после травления фаски и выдержки на воздухе в течение 1 месяца; 2 — после катодного напыления SiO_2 ($d_{ок} = 1 \text{ мкм}$) и отжига при $T_0 = 300^\circ\text{C}$; б: 1 — исходная; 2, 3 — после выдержки под обратным напряжением при $I_r = 0.5 \text{ mA}$ соответственно 2 и 10 мин.

следует, что вблизи середины запрещенной зоны кремния наблюдается перезарядка объемных состояний (ОС) в пленке SiO_2 за счет туннельного перехода носителей из зоны проводимости кремния [11]. Значение плотности ОС имело величину $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Такая высокая плотность ОС (примерно на 2 порядка величины выше, чем в термически выращенном SiO_2) позволяет заметно уменьшить степень инверсии каналов на поверхности при приложении к прибору напряжения за счет выброса электронов с ОС пленки SiO_2 в обедненный носителями SiO_2 , в результате чего заряд оксида становится более положительным и каналы инверсии сужаются. После снятия напряжения происходит постепенное заполнение ОС электронами из приграничных к SiO_2 слоев n -базы.

На рис. 3 представлены типичные обратные ВАХ диода, снятые при температуре 383 (1, 2) и 413 К (1', 2'). Кривые 1, 1' сняты при указанных температурах для диода с положительной фаской после травления, но без пассивации поверхности, а кривые 2, 2' сняты при тех же температурах после пассивации поверхности этого же диода катодно-напыленным слоем SiO_2 и отжига при температуре 300°C , что соответствовало плотности встроенного положительного заряда $\sim 1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что нанесение оксида проводилось через несколько дней после снятия кривых 1, 1'. При этом диоды хранились в чашке Петри и перед нанесением оксида дополнительно не очищались. Из рис. 3 видно, что после пассивации обратный ток уменьшается примерно в 2 раза. Результат может быть существенно лучше, если перед пассивацией поверхность дополнительно обработать в травителе СР-4 в течение нескольких секунд. Выдержка пассивированных $p^+ - n - n^+$ структур в течение трех

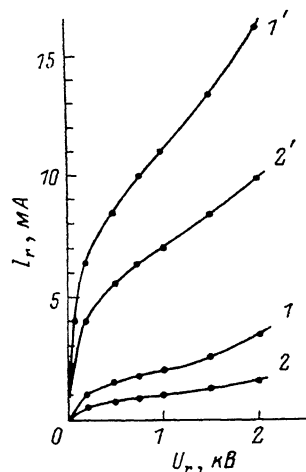


Рис. 3.

месяцев не привела к изменению обратных токов, что говорит о неплохой стабильности пассивирующего катодно-напыленного окисла.

Таким образом, проведенные исследования показали, что катодно-напыленный окисел может быть успешно использован для целей пассивации поверхности высоковольтных $p-n$ переходов на кремнии, обеспечивая высокую однородность плотности поверхностного заряда нужной величины, стабилизацию и уменьшение токов обратносмещенных $p-n$ переходов.

Литература

- [1] Герлах В. Тиристоры. М.: Энергоиздат, 1985. 328 с.
- [2] Brieger K. P., Gerlach W., Pelka J. IEEE Trans. El. Dev., 1984, ED-31, N 6, p. 733—738.
- [3] Steenbeek K., Steinbeiß B. E., Ufert K. Thin Solid Films, 1982, v. 92, N 4, p. 371—380.
- [4] Johnson N. M. J. Vac. Sci. Technol., 1982, v. 21, N 2, p. 303—314.
- [5] Di Maria D. J. Physic of SiO₂ and its interfasis. Edit Pantelides S. T. N. Y.: Pergamon, 1978. 488 p.
- [6] Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. Рига, 1985. 244 с.
- [7] Shockley W., Hooper W. W., Queisser H., Schroen W. Surface Science, 1964, v. 2, N 1, p. 277—287.
- [8] Демидович Г. Б., Козлов С. Н., Шебликин Ю. В. Поверхность, 1983, в. 12, с. 82—83.
- [9] Бекерис Ю. Я., Виртманис А. С., Фелтънь И. А., Фрейберг Л. А. Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук, 1984, в. 4, с. 17—23.
- [10] Лебедев А. А., Экке В. ФТП, 1985, т. 19, № 5, с. 831—835.
- [11] Лебедев А. А., Экке В. ФТП, 1985, т. 19, № 6, с. 1087—1091.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 января 1987 г.