

ОБЩАЯ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЛОВУШЕК ПО ТОЛЩИНЕ АМОРФНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО SiO₂ НА Si

© О.В.Романов, И.А.Котов

Научно-исследовательский институт физики
Санкт-Петербургского государственного университета,
198904 Санкт-Петербург, Россия
(Получена 5 декабря 1994 г. Принята к печати 3 октября 1995 г.)

В работе решалась задача экспериментального анализа общей и тонкой структуры распределения по глубине собственных ловушек донорного и акцепторного типа в тонких слоях термического аморфного диоксида кремния на монокристаллическом кремнии, полученных различными промышленными технологиями ($d_i = 30 \div 60$ нм). С использованием методов комплексного эффекта поля в электролитах, прецизионного послойного химического растворения пленки SiO₂ и лазерной эллипсометрии было впервые установлено существование трех областей локализации собственных ловушек структурно химической природы по толщине тонкого аморфного слоя SiO₂: область вблизи внутренней границы раздела Si/SiO₂ толщиной 3.5 ÷ 5 нм; область вблизи внешней границы раздела SiO₂-воздух толщиной 4 ÷ 6 нм и область, которая разделяет две предыдущие области и характеризуется низкой плотностью акцепторных и донорных ловушек. Полученные результаты позволяют разработать совершенно новые подходы как в области фундаментальных представлений о тонких и сверхтонких диэлектриках, так и в технологии сверхбольших интегральных схем следующего поколения.

Уже давно и надежно установлено, что в тонких ($d_i = 10 \div 200$ нм) и сверхтонких ($d_i = 2 \div 10$ нм) слоях SiO₂ на кремнии интегрально доминируют ловушки донорного типа, положительный заряд которых пространственно локализован вблизи границы раздела (ГР) Si/SiO₂ на глубине 2 ÷ 5 нм. Это — так называемый положительный встроенный заряд [1–5]. Кроме того, результаты исследования процессов фотостимулированного и полевого захвата носителей заряда на ловушки в SiO₂ продемонстрировали устойчивый во времени, особенно при низких температурах, захват электронов из кремния в окисел вблизи ГР [6–8], либо на донорные положительно заряженные ловушки с их последующей нейтрализацией, либо на акцепторные с последующей локализацией отрицательного заряда вблизи ГР. Однако экспериментальный анализ распределения плотности собственных и генерированных различными физическими воздействиями ловушек по толщине тонких и сверхтонких пленок SiO₂ на Si оказался до сих пор нерешенной задачей из-за отсутствия адекватных методов. Попытки использования

для этой конкретной цели метода внутренней фотоэлектронной спектроскопии дали весьма приблизительный и спорный результат, так как этот эффективный в других областях метод работает корректно только в предположении одного типа ловушек, а кроме того может сам по себе воздействовать на электронную структуру исходных SiO_2 -слоев [9].

В нашей работе решалась задача экспериментального анализа общего и детального (тонкая структура) распределения по глубине собственных ловушек донорного и акцепторного типа в тонких слоях термической двуокиси кремния на монокристаллическом кремнии, полученных разными технологиями. С этой целью были использованы методы лазерной эллипсометрии, прецизионного послойного химического растворения SiO_2 и оригинальный метод комплексного эффекта поля в электролитах (КЭПЭ) [10–12], который позволяет регистрировать объемную плотность донорных и акцепторных заряженных ловушек в любых диэлектрических слоях в диапазоне $\rho = 10^{15} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ с разрешением по толщине около 0.1 нм

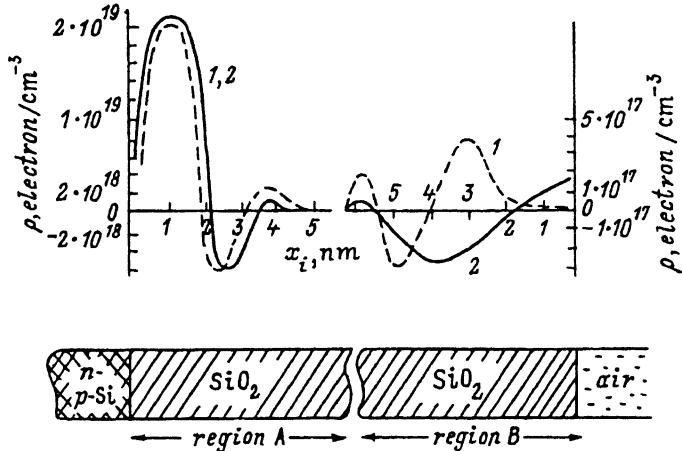
Методом КЭПЭ при $T = 293 \text{ K}$ после каждого удаления очередного нанослоя SiO_2 снимались высокочастотные (ВЧ ВФХ), квазистатистические (КС ВФХ) и вольт-амперные (ВАХ) характеристики системы Si-SiO_2 -электролит. Это позволяло одновременно регистрировать потенциал плоских зон V_{FB} в шкале электродных потенциалов, толщину оставшегося слоя и спектр поверхностных состояний на ГР Si/SiO_2 [11,12]. Исследования были выполнены на двух сериях образцов SiO_2/Si , приготовленных по промышленной технологии после стандартных операций химической предобработки. Первая серия была изготовлена на пластинах $p\text{-Si}$ (4–11 Ом·см) с ориентацией (100) методом низкотемпературного ($T_0 = 400^\circ\text{C}$) фотостимулированного окисления в сухом O_2 до толщины оксида $d_i = 30 \text{ нм}$ (НТО серия). Вторая серия была изготовлена на пластинах $n\text{-Si}$ (6–8 Ом·см) с ориентацией (100) и $p\text{-Si}$ (6–8 Ом·см) с ориентацией (100) традиционным методом высокотемпературного ($T_0 = 1050^\circ\text{C}$) окисления в сухом O_2 до толщины диоксида $d_i = 30\text{--}60 \text{ нм}$ (ВТО серия). Толщина исходного аморфного термического SiO_2 на всех пластинах измерялась эллипсометрически, а ее независимый контроль методом КЭПЭ в предположении диэлектрической постоянной $\epsilon(\text{SiO}_2) = 3.9$ удостоверял хорошее согласие двух методов.

Обработка экспериментальных результатов, полученных на образцах обоих типов методом КЭПЭ при послойном химическом удалении диоксида кремния, выявили как общие закономерности, так и индивидуальные различия контролируемых способов окисления. Оба типа образцов имели положительный по знаку, но различный по величине интегральный электрический заряд, локализованный в основном в непосредственной близости от внутренней границы раздела Si/SiO_2

$$Q_{\text{tot}}(\text{НТО серия}) = +(5.61 \pm 0.41) \cdot 10^{11} \text{ электрон/см}^2,$$

$$Q_{\text{tot}}(\text{ВТО серия}) = +(4.55 \pm 0.26) \cdot 10^{11} \text{ электрон/см}^2.$$

Образцы НТО серии имели только один максимум плотности быстрых поверхностных состояний (БПС) в верхней половине запрещенной зоны с энергией $E_{ss} - E_v = 0.7 \text{ эВ}$. В то же время образцы ВТО



Распределение по глубине плотности собственных акцепторных ($\rho < 0$) и донорных ($\rho > 0$) ловушек в тонких слоях термической двуокиси кремния SiO_2 на монокристаллических подложках n - и p -Si с ориентацией рабочей поверхности в плоскости (100) для НТО (1) и ВТО (2) серий образцов.

серии обнаружили основной максимум плотности БПС с энергией $E_{ss} - E_v = 0.4 \text{ эВ}$ и более слабый максимум БПС с $E_{ss} - E_v = 0.7 \text{ эВ}$.

Распределения по глубине плотности собственных акцепторных и донорных ловушек в тонких слоях SiO_2 обоих типов оказались близкими по характеру и представлены на рисунке. Ясно видно, что изученные пленки термического диоксида кремния имеют три основные области в распределении собственных ловушек: область A толщиной 3.5–5 нм, прилегающих к внутренней ГР Si/SiO_2 и характеризующаяся аномально высокими плотностями пространственно разделенных акцепторных и донорных собственных ловушек; область B толщиной 4–6 нм, прилегающая к внешней ГР и характеризующаяся существенно более низкими плотностями пространственно разрешенных акцепторных и донорных собственных ловушек; область C , включающая независимо от общей толщины слоя SiO_2 всю его срединную часть и характеризующаяся очень низкой плотностью собственных ловушек на уровне $|\rho| < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

В свою очередь область A включает в себя три пространственно разделенных субслоя собственных ловушек: субслоем донорных ловушек с плотностью заряда $\rho = +(0.3-1.8) \cdot 10^{18} \text{ электрон/см}^3$ на глубине $3 < x_i < 5 \text{ нм}$ от границы Si/SiO_2 , субслоем акцепторных ловушек с плотностью заряда $\rho = -(0.5-3.0) \cdot 10^{18} \text{ электрон/см}^3$ на глубине $2 < x_i < 4 \text{ нм}$ и субслоем аномально высокой плотности донорных ловушек с плотностью заряда $\rho = +(0.7-2.0) \cdot 10^{19} \text{ электрон/см}^3$ непосредственно у ГР Si/SiO_2 на глубине $0 < x_i < 2 \text{ нм}$.

Область B также имеет тонкую структуру пространственно разделенных донорных и акцепторных собственных ловушек, которые демонстрируют некоторое отличие образцов двух типов окисления. Как видно из рисунка, эта область включает две, а возможно, и три субобласти пространственной локализации донорных и акцепторных ловушек с существенно меньшими плотностями $|\rho| < 5 \cdot 10^{17} \text{ электрон/см}^3$. При этом важно акцентировать внимание на их последовательности, харак-

герной для обоих типов окисла. На самой поверхности пленки SiO_2 локализован субслой донорных ловушек, далее в глубину SiO_2 следует субслой акцепторных ловушек, который, вероятно, снова сменяется субслоем донорных ловушек, переходящим в «безловушечный» разделительный слой C .

Измерявшееся нами одновременно распределение скоростей химического растворения пленок термического диоксида SiO_2 по их глубине обнаружило однозначную их корреляцию с общим распределением собственных ловушек по толщине. Область A соответствует уменьшающейся к ГП Si/SiO_2 скорости растворения SiO_2 . В области B , наоборот, наблюдается максимум скорости растворения SiO_2 . В серединной же области C скорость растворения диоксида остается постоянной и различающейся для двух типов технологии выращивания SiO_2 :

$$v_{\text{dis}}(\text{НТО серия}) = (0.23 \pm 0.02) \text{ нм/с},$$

$$v_{\text{dis}}(\text{ВТО серия}) = (0.16 \pm 0.02) \text{ нм/с}.$$

Таким образом, нам впервые удалось экспериментально установить общий вид трехслойного пространственного распределения и его тонкую структуру для собственных донорных и акцепторных ловушек в тонких слоях термической двуокиси кремния на монокристаллическом кремнии. Полученные результаты позволяют разработать совершенно новые подходы как в фундаментальных представлениях о тонких и сверхтонких диэлектриках, так и в технологии сверхбольших интегральных схем следующего поколения.

В заключение авторы выражают свою искреннюю благодарность инженерам В.П.Летавину и В.А.Лебедеву за техническую помощь в работе, а фирме «Светлана» за предоставление некоторых образцов.

Список литературы

- [1] J.E. Thomas, D.R. Young. IBM J. Dev. Res., **8**, 368 (1964).
- [2] A.S. Grove, B.E. Deal, E.H. Snow, C.T. Sah. Sol. St. Electron., **8**, 145 (1965).
- [3] Л.К. Думиньш, В.Н. Ребров, Ю.В. Федорович. Электрон. приборостроение, вып. 4, 45 (1968).
- [4] О.В. Романов. ФТП, **16**, 419 (1982).
- [5] *Instabilities in Silicon Devices*, ed. By G.Barbotin, A.Vapaille (Elsevier, Amsterdam, 1989).
- [6] А.В. Плотников, В.С. Вавилов. ФТП, **7**, 878 (1973).
- [7] D.B. Mott, S.P. Buchner. Appl. Phys. Lett., **51**, 1643 (1987).
- [8] А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, В.Ю. Осипов, С.К. Бойцов, Ю.С. Зинчик, Т.Л. Макарова. ФТП, **26**, 146 (1992).
- [9] V.K. Adamchuk, V.V. Afanas'ev. Progr. Surf. Sci., **41**, 111 (1992).
- [10] W.H. Brattain, P.J. Boddy. J. Electrochem. Soc., **109**, 574 (1962).
- [11] О.В. Романов, П.П. Копоров. ФТТ, **8**, 13 (1966).
- [12] O.V. Romanov. Anal. de Fis., Ser. B, **86**, 34 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

General and fine structures of intrinsic traps distribution over the width of an amorphous thermic SiO₂ on Si

O.V.Romanov, I.A.Kotov

St.Petersburg State University, 198216 St.Petersburg, Russia
