

05;06;11;12

Образование и электронно-лучевой отжиг имплантационных дефектов в тонкопленочной гетероструктуре Si—SiO₂

© А.Ф. Зацепин,¹ С. Касчиева,² Д.Ю. Бирюков,¹ С.Н. Дмитриев,³ Е.А. Бунтов¹

¹ Уральский государственный технический университет,
620002 Екатеринбург, Россия
e-mail: zats@dpt.ustu.ru

² Институт физики твердого тела Болгарской АН,
1874 София, Болгария

³ Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 4 июня 2008 г.)

Методом фотостимулированной электронной эмиссии (Optically Stimulated Electron Emission — OSEE) исследованы радиационные дефекты в пленках SiO₂ (20 nm) на кремниевой подложке. Под воздействием ускоренных ионов кремния (12 keV) обнаружено образование различных кислородно-дефицитных центров, среди которых доминирующими являются дефекты E'-типа. Последующее облучение электронами с энергией 23 MeV вызывает трансформацию дефектной структуры пленки SiO₂, состоящую в эффективном распаде дефектов, индуцированных ионной имплантацией.

PACS: 61.80.Fc, 68.55.Ln, 79.60.-I

Длительное время система Si—SiO₂ является основным элементом современной полупроводниковой микро- и оптоэлектроники и, вероятно, останется таковой в течение последующих лет. Пленки SiO₂ в основном успешно используются для изоляции затвора КМОП-транзисторов в современных интегральных микросхемах. Создание новых типов приборов и интегральных схем на основе МОП-структур постоянно ужесточает требования к характеристикам тонких приповерхностных слоев полупроводника, а также к стабильности диэлектрических покрытий. Увеличение степени интеграции неизбежно приводит к снижению размеров элементов микросхем, в результате чего толщина слоя диэлектрика достигает единиц нанометров.

С другой стороны, в рамках современной технологии ионная имплантация является отдельным технологическим приемом производства полупроводниковых приборов. Но несмотря на все свои достоинства сама имплантация создает дефекты, которые желательно устранять. Было показано, что термический отжиг дефектов ионной имплантации в МОП-структурах существенно зависит от пространственного распределения этих дефектов по отношению к границе раздела Si—SiO₂ [1]. Было также показано, что эффект УФ-облучения ионно-имплантированных структур Si—SiO₂ зависит от дозы облучения. Процесс генерации новых дефектов конкурирует с процессом отжига дефектов ионной имплантации [2]. В зависимости от вида ионной имплантации УФ-облучение может частично или полностью отжечь созданные ею дефекты [3]. Рентгеновское облучение ионно-имплантированных МОП-структур уменьшает температуру термического отжига и отжигает имплантационные дефекты [4–6]. Изучение процессов взаимодействия высокоэнергетических электронов с имплантированными МОП-структурами показало, что дан-

ный вид облучения приводит к образованию новых собственных дефектов, однако при этом может уменьшать плотность дефектов ионной имплантации [7,8].

В этой связи целью настоящей работы явилось изучение возможного отжига дефектов ионной имплантации, а также исследование структурного состояния тонкой пленки SiO₂ на подложке кремния, имплантированной ионами Si⁺ и подвергнутой облучению быстрыми электронами.

Методом фотостимулированной электронной эмиссии (Optically Stimulated Electron Emission — OSEE) были исследованы пленки SiO₂ толщиной 20 nm, выращенные на пластинах кремния *n*-типа с ориентацией (100). Измерение спектров OSEE проводилось в вакууме $2 \cdot 10^{-4}$ Pa с помощью вторично-электронного умножителя ВЭУ-6 в диапазоне длин волн 200–400 nm. На первом этапе пленки были имплантированы ионами Si⁺ с энергией 12 keV и флюенсом $1 \cdot 10^{16}$ cm⁻². Затем образцы подвергались облучению электронами с энергией 23 MeV и флюенсом $2.88 \cdot 10^{16}$ cm⁻².

Обработка и анализ полученных спектральных зависимостей OSEE производились с использованием специализированного пакета прикладных программ по оригинальной методике [9,10]. Выделение эмиссионного вклада отдельных дефектных центров в спектре OSEE диоксида кремния возможно благодаря представлению спектральной зависимости в виде суперпозиции селективной и неселективной составляющих:

$$I(h\nu) = C' [I_1(h\nu) + I_2(h\nu)]. \quad (1)$$

Здесь C' — параметр, учитывающий влияние радиационной электризации поверхностного слоя образца; $I_2(h\nu)$ — неселективная составляющая спектра, которая обусловлена фотоионизацией хвоста зоны поверхностных состояний и хорошо описывается правилом

Урбаха [9]; селективная составляющая $I_1(h\nu)$, характеризующая вклад дефектных центров, аппроксимируется суммой гауссовых функций. По интенсивности селективных полос OSEE с использованием модифицированной формулы Смакулы можно определить концентрацию N соответствующих эмиссионно-активных дефектов в поверхностном слое исследуемого объекта [9,10]:

$$N = 6.942 \cdot 10^{16} \frac{KS_{OSEE}}{f\eta h_{OSEE}}, \quad (2)$$

здесь S_{OSEE} — интегральная интенсивность индивидуальной полосы; K — аппаратная калибровочная константа; f — сила осциллятора оптического перехода; η — квантовый выход фотоэмиссии; h_{OSEE} — толщина эмиссионно-активного слоя образца. Для объемных образцов толщина эмиссионно-активного слоя обычно имеет значение 100–500 nm. В нашем случае значение данного параметра было принято равным толщине пленки SiO_2 и составило 20 nm.

Спектральные кривые OSEE, полученные для образцов исходных и имплантированных пленок SiO_2 , приведены на рис. 1. Процесс имплантации приводит к росту интенсивности OSEE. В то же время после облучения электронами 23 MeV спектральная зависимость OSEE имплантированных пленок SiO_2 практически совпадает со спектром неимплантированных пленок. Среднее значение урбаховского параметра E_0 спектральных зависимостей OSEE составляет 0.21–0.23 eV. Данная характеристика отражает степень атомного беспорядка в структуре исследуемого материала, а полученное значение E_0 соответствует степени структурного разупорядочения аморфного SiO_2 [9]. Имплантация и последующее электронное облучение не приводит к существенному изменению параметра E_0 .

Для выделения селективных максимумов OSEE радиационных дефектов спектры облученных образцов

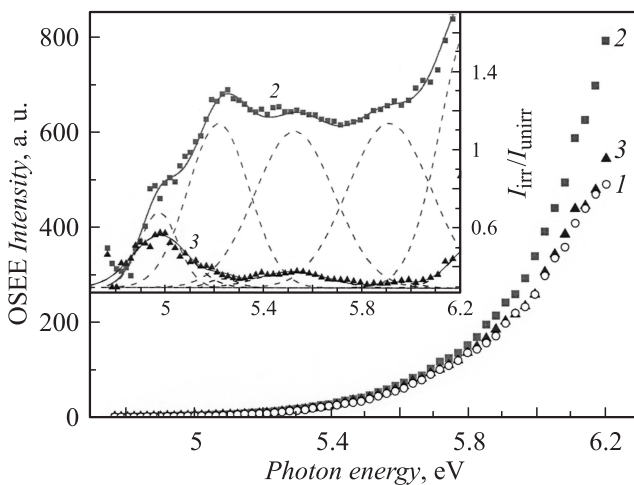


Рис. 1. Спектральные зависимости OSEE системы Si–SiO₂. 1 — исходный образец; 2 — ионно-имплантированный образец; 3 — ионно-имплантированный образец после облучения электронами. На врезке показаны нормированные спектры OSEE с разложением на гауссианы.

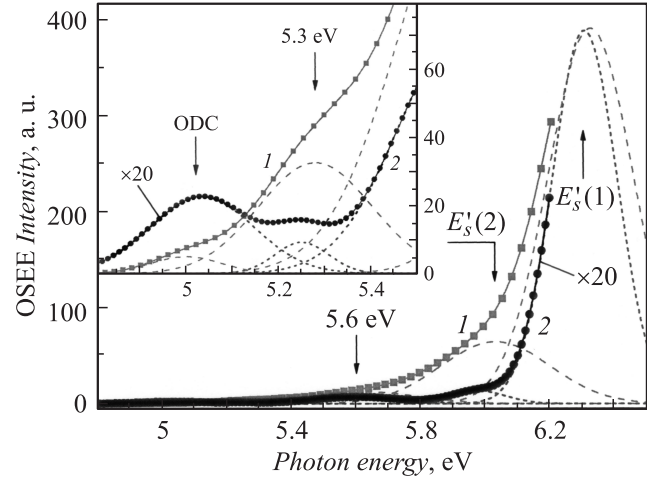


Рис. 2. Спектры OSEE радиационных дефектов в оксидном слое Si–SiO₂. 1 — ионно-имплантированный образец; 2 — ионно-имплантированный образец после облучения электронами. Врезка демонстрирует спектры в увеличенном масштабе.

Спектральные параметры селективных полос OSEE

Параметр	ODC	5.3 eV	5.6 eV	$E'_s(2)$	$E'_s(1)$
	Имплантированный образец				
E, eV	5	5.28	5.63	6.03	6.32
$FWHM, \text{eV}$	0.15	0.25	0.32	0.34	0.26
N_v, cm^{-3}	$3.08 \cdot 10^{15}$	$3.21 \cdot 10^{16}$	—	—	—
N_s, cm^{-2}	—	—	—	$5.87 \cdot 10^{12}$	$1.67 \cdot 10^{13}$
После облучения электронами					
E, eV	5.03	5.25	5.60	5.98	6.30
$FWHM, \text{eV}$	0.22	0.12	0.28	0.17	0.20
N_v, cm^{-3}	$1.02 \cdot 10^{15}$	$2.17 \cdot 10^{14}$	—	—	—
N_s, cm^{-2}	—	—	—	$1.74 \cdot 10^{11}$	$1.88 \cdot 10^{12}$

нормировались на спектр необлученного эталона. На врезке рис. 1 показаны полученные таким образом нормированные спектры OSEE. После их разложения на элементарные полосы и обработки по методике [9,10] восстанавливается селективная составляющая $I_1(h\nu)$ спектральной зависимости OSEE, характеризующая эмиссионный вклад дефектов, индуцированных облучением. Полученные таким образом селективные спектры OSEE имплантированной пленки SiO_2 содержат пять элементарных полос (рис. 2), параметры которых представлены в таблице.

Полоса OSEE при 5.05 eV обусловлена диамагнитными кислородно-вакансионными дефектами типа ODC (Oxygen-deficient centers) [11]. Наблюдаются также OSEE-полосы парамагнитных дефектов поверхностного типа: $E'_s(1)$ и $E'_s(2)$ -центров [10–12]. В спектрах ионно-имплантированных образцов доминирует OSEE-полоса 6.3 eV, обусловленная $E'_s(1)$ -центрами [12]. Неидентифицированные полосы OSEE 5.3 и 5.6 eV по своим спектральным свойствам наиболее близки к дефектам

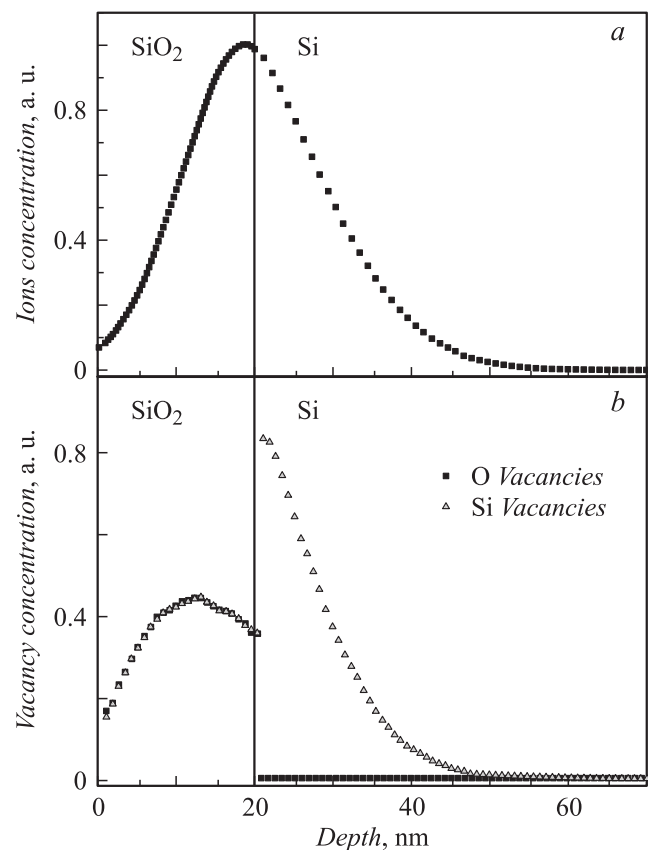


Рис. 3. Распределение имплантированных ионов (а) и вакансий (б) в структуре Si–SiO₂.

ODC- и E' -типа соответственно. Данные полосы предварительно можно отнести к модификациям вышеуказанных центров, которые локализованы в переходном слое интерфейса Si–SiO₂.

Определение концентрации дефектов с известными параметрами (силой осциллятора оптического перехода и квантового выхода OSEE) показывает, что в результате ионной имплантации наиболее эффективно образуются дефекты семейства E' . Концентрация центров поверхностного типа (E'_s) рассчитана в двумерных координатах. Из данных таблицы следует, что плотность поверхностных E'_s -центров примерно на порядок превышает таковую для поверхности массивных образцов SiO₂ [10,12]. Особенностью исследуемой тонкопленочной системы Si–SiO₂ является полное отсутствие объемных E'_v -центров, характерных для объемных аморфных и стеклообразных образцов диоксида кремния [10]. Наблюдаемый эффект обусловлен накоплением ионов на границе раздела Si–SiO₂.

Энергия ионов кремния при имплантации была выбрана равной 12 keV с целью обеспечения максимума концентрации дефектов на границе раздела Si–SiO₂. Указанная величина энергии ионов, а также распределение дефектов по глубине (рис. 3) рассчитаны с помощью программы SRIM 2006. В таких условиях ионы проникают сквозь оксидную пленку и локализируются в переход-

ном слое, образуя дополнительные дефекты. При этом малая толщина пленки в значительной степени снижает вероятность образования дефектов объемного типа. Однако в отличие от процесса ионной имплантации, когда при выбранной энергии ионов радиационные нарушения создаются в основном на границе раздела Si–SiO₂, при электронном облучении формируется система дефектных комплексов, пространственно-распределенных по всей структуре. Именно электронное облучение обеспечивает эффект радиационно-стимулированного отжига дефектных центров, созданных при ионной имплантации (рис. 1, врезка). Поскольку при высокой энергии электронов ударный механизм из взаимодействия с атомами тонкой пленки маловероятен, можно предположить, что в данном случае реализуется рекомбинационный механизм аннигиляции имплантационных дефектов (recombination-enhanced-defect-reactions mechanism — REDR). Указанный механизм предполагает возбуждение электронной подсистемы материала с образованием электронно-дырочных пар, энергия рекомбинации которых обеспечивает отжиг дефектных центров [13].

Следует также отметить, что в отличие от объемных образцов SiO₂ в нашем случае не наблюдается радиационного заряжения поверхности, которое проявляется обычно в виде смещения спектральных кривых OSEE по шкале интенсивности [10]. Этот факт объясняется эффективным стеканием радиационного заряда благодаря малой толщине оксидной пленки SiO₂ на полупроводниковой подложке Si. При этом вариации интенсивности OSEE на рис. 1 после ионного и электронного облучения связаны с изменением концентрации дефектных центров.

Таким образом, в результате выполненных измерений OSEE нами были изучены особенности трансформации дефектной структуры тонкопленочных образцов SiO₂ после ионной имплантации и высокоэнергетического электронного облучения. Выявлены радиационные дефекты, характерные для тонкой пленки SiO₂. Зарегистрировано преобладающее образование дефектов поверхностного типа после ионной имплантации. Обнаружен эффект радиационно-стимулированного отжига имплантационных дефектов под воздействием быстрых электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 08-02-01072; 07-02-12015).

Список литературы

- [1] Kaschieva S., Danesh P., Djakov A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1984. Vol. 83. P. 141.
- [2] Kaschieva S., Nedev N., Danesh P., Djakov A. // Rad. Effects Lett. 1985. Vol. 85. P. 225.
- [3] Kaschieva S. and Danesh P. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B. 1997. Vol. 129. P. 551.
- [4] Kaschieva S., Djakov A. // Rad. Effects Lett. 1986. Vol. 87. P. 185.
- [5] Kaschieva S. and Yorukov I. // Sol. State Electr. 1998. Vol. 42. P. 1835.

- [6] *Kaschieva S. and Yorukov I.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B. 2000. Vol. 170. P. 385.
- [7] *Kaschieva S., Stefanov K., Karpusov D.* // Appl. Phys. A. 1998. Vol. 66. P. 561.
- [8] *Kaschieva S. and Alexanrdova S.* // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B. 2001. Vol. 174. P. 324.
- [9] *Zatsepin A.F., Biryukov D.Yu., Kortov V.S.* // Phys. Stat. Sol. (a). 2005. Vol. 202. N 10. P. 1935–1947.
- [10] *Зацепин А.Ф., Бирюков Д.Ю., Кортков В.С.* // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 2. С. 229–238.
- [11] *Skuja L.* // J. Non-Cryst. Solids. 1998. Vol. 239. P. 16–48.
- [12] *Радциг В.А.* // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 8. С. 125.
- [13] *Balasiniski A., Ma T.P.* // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 62. P. 3170.