

МОРФОЛОГИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР СОЗДАНЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СВОБОДНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ Si/Cu
З.А. Исаханов¹, И.О. Косимов², Р.М. Ёркулов¹

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, 100125, Дурмон йули 33, Ташкент, Узбекистан.

²Ташкентский государственный технический университет, ул. Университетская 2, 100095

tel: +99893-565-10-89; (998-71) 262-35-39; E-mail: za.isakhanov@gmail.com

Методом низкоэнергетической ($E_0=1-5$ кэВ) имплантации ионов O_2^+ , Ba^+ , Cu^+ и Co^+ с последующим отжигом на поверхности свободно висящей нанопленочной системы Si/Cu(100) получены наночастицы и пленки SiO_2 и силицидов металлов. Определены морфология их поверхности, состав, параметры энергетических зон, максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии, квантовый выход фотоэлектронов. Показано, что ширина запрещенной зоны силицидов металлов составляет 0.3 – 0.4 эВ, а их удельное сопротивление – 100–500 мкОм·см.

Особый интерес представляет получение и изучение свойств наноструктур на основе свободно висящих пленок.

В представляемой работе впервые изучены морфология, электронная структура, эмиссионные, электрофизические и оптические свойства тонких ($d \leq 30-40$ Å) пленок оксидов и силицидов металлов, сформированных на поверхности свободно висящей пленки Si/Cu при ионной имплантации в сочетании с отжигом.

Свободно висящая пленочная система Si/Cu получена методом [1]. В основном использована пленка Si толщиной 400 Å, нанесенная на поверхность монокристаллической пленки Cu(100) толщиной 450 Å. Неоднородность пленки Si по толщине составляла 15–20 Å. Имплантацию ионов, отжиг и основные исследования проводили на одной и той же экспериментальной установке, в вакууме не хуже 10^{-6} Па. Энергия ионов O_2^+ варьировалась в пределах от 1 до 5 кэВ, а их доза – $D \approx 10^{14} - 10^{17}$ см⁻². Для исследования состава, электронной структуры и эмиссионных

свойств использован комплекс методов: ЭОС, ФЭС, СХПЭЭ, измерения коэффициентов ВЭЭ и квантового выхода фотоэлектронов. Исследования морфологии поверхности и кристаллической структуры пленок проводили с использованием РЭМ и ДБЭ.

На рис. 1 приведены РЭМ-изображения и картины ДБЭ для поверхности Si/Cu(100) до и после имплантации ионами O_2^+ с $E_0=1$ кэВ при дозе $D=6 \times 10^{15}$ см⁻². Видно, что поверхность чистого кремния обладает относительно гладким микрорельефом (рис.1а) и имеет структуру близкую к поликристаллической (вставка на рис.1а). После имплантации ионов O_2^+ на поверхности Si появляются отдельные локальные участки (кластеры) с измененной структурой и составом. Поверхностные размеры кластерных фаз лежат в пределах от 10 до 20 нм. Эти фазы занимают половину всей облученной площади. Однако, на электронограмме полностью исчезают концентрические кольца, характерные для поликристаллических пленок

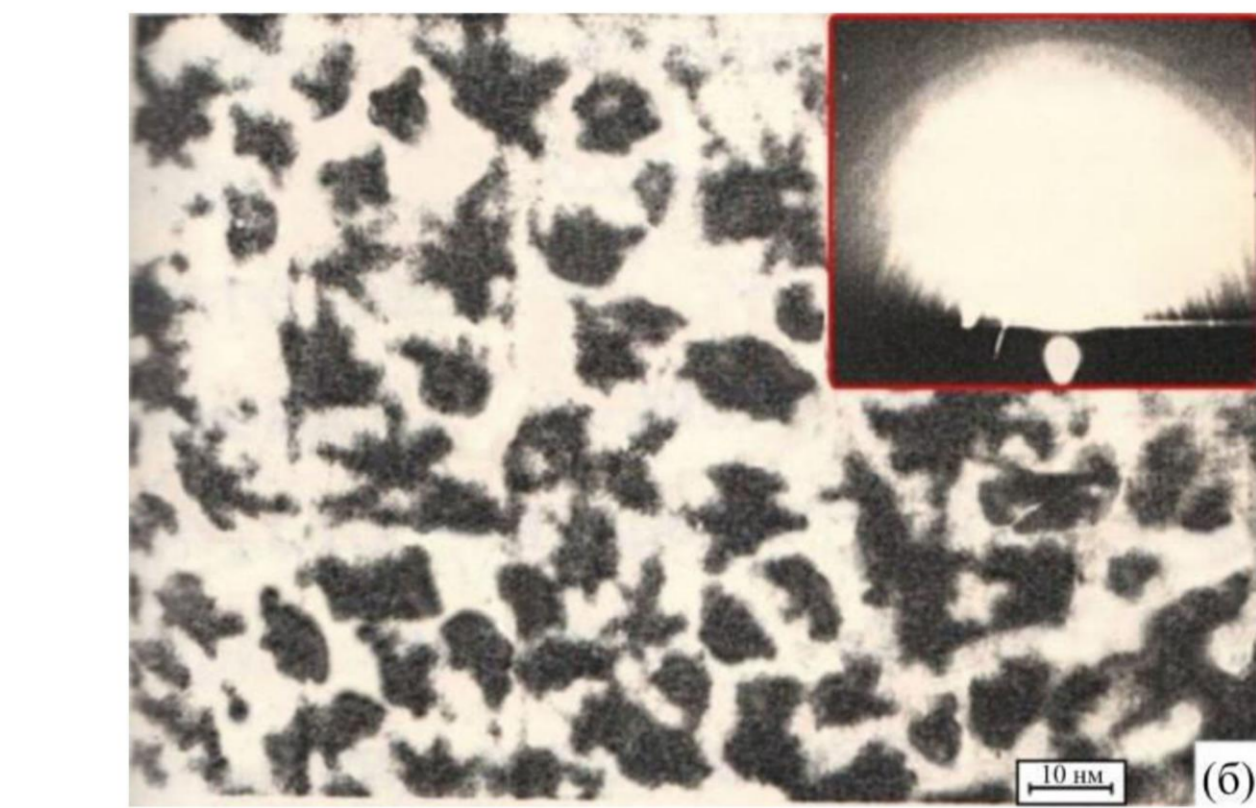


Рис.1. РЭМ-изображения и картины ДБЭ (вставки) для поверхности Si/Cu(100) до (а) и после (б) имплантации ионами O_2^+ с $E_0=1.0$ кэВ при дозе $D=6 \times 10^{15}$ см⁻².

и наблюдаются новые широкие и размытые кольца, присущие сильно разупорядоченной поверхности (вставка на рис.1б). По-видимому, возникновение микронапряжений вблизи локализации кластеров приводит к разупорядочению и других участков облученной поверхности. Начиная с дозы $D \approx 2 \times 10^{16}$ см⁻² наблюдается, перекрывание границ отдельных участков (кластеров) и при $D \approx 8 \times 10^{16}$ см⁻² происходит полное легирование поверхностных слоев и формируется аморфный слой нестехиометрической двуокиси кремния – на электронограмме вместо серии колец наблюдается одно диффузное кольцо – аморфное гало. После отжига при $T=750$ К стехиометрический состав пленки SiO_2 существенно улучшается (концентрация SiO_2 увеличивается до 85–90 ат.%), но высокая степень аморфности сохраняется.

На рис.2 приведены спектры ХПЭЭ для пленки Si/Cu(100) до и после формирования наноразмерной оксидной пленки. Видно, что в спектре

1

2

3

Si/Cu(100) обнаруживается ряд интенсивных пиков. Наличие пиков при значениях энергии $\Delta E_1=3.4$, $\Delta E_2=6.7$ и $\Delta E_4=14$ эВ можно объяснить возникновением межзонных переходов, а другие пики возбуждением поверхностных ($\Delta E_3=h\nu_0=10.4$, $\Delta E_5=2h\nu_0=21$ эВ) и объемных ($\Delta E_6=h\nu_0=17$ эВ) плазменных колебаний [2]. В спектре нанопленки SiO_2 обнаруживаются два максимума, обусловленные межзонными переходами $\Delta E_1=9.1$, $\Delta E_3=19$ эВ и два максимума – плазменными колебаниями: $\Delta E_2=h\nu_0=15$ и $\Delta E_4=h\nu_0=23$ эВ. Отметим, что энергия плазменных колебаний и межзонных переходов в свободной нанопленке SiO_2/Si отличается от энергии, в случае толстой пленки SiO_2 . Природа смещения максимумов, обусловленных межзонными электронными переходами, вероятно связана с деформацией функций электронных состояний при уменьшении толщины пленки SiO_2 и увеличении влияния подложки.

В случае имплантации ионов металлов после отжига на поверхности Si в зависимости от дозы облучения образовались наночастицы и пленки ($d=20-50$ Å) силицидов типа $BaSi_2$ и $CoSi_2$. Таким образом, после отжига свободно висящих пленок Si/Cu, имплантированных ионами O_2^+ и Ba^+ , формируются трехслойные системы $SiO_2/Si/Cu$ и $BaSi_2/Si/Cu$. В таблице приведены параметры энергетических зон, максимальные значения коэффициентов вторичной электронной эмиссии σ_m , квантовый выход фотоэлектронов Y , удельное сопротивление ρ нанопленок SiO_2 и силицидов металлов.

Видно, что при образовании силицидов металла значение E_g кремния уменьшается в три раза, удельное сопротивление – в 10^4 раза, значения σ_m и Y – в полтора-два раза, а в случае формирования SiO_2 E_g – увеличивается примерно в четыре раза, ρ – в 300 раз, а σ_m и Y – в два-три раза. Однако эти данные заметно отличаются от данных, для аналогичных пленок, полученных на поверхности массивных пленок Si. Например, значение E_g для SiO_2 и $BaSi_2$, созданных на поверхности массивных пленок Si составляет 7.9 и 0.7 эВ соответственно.

4

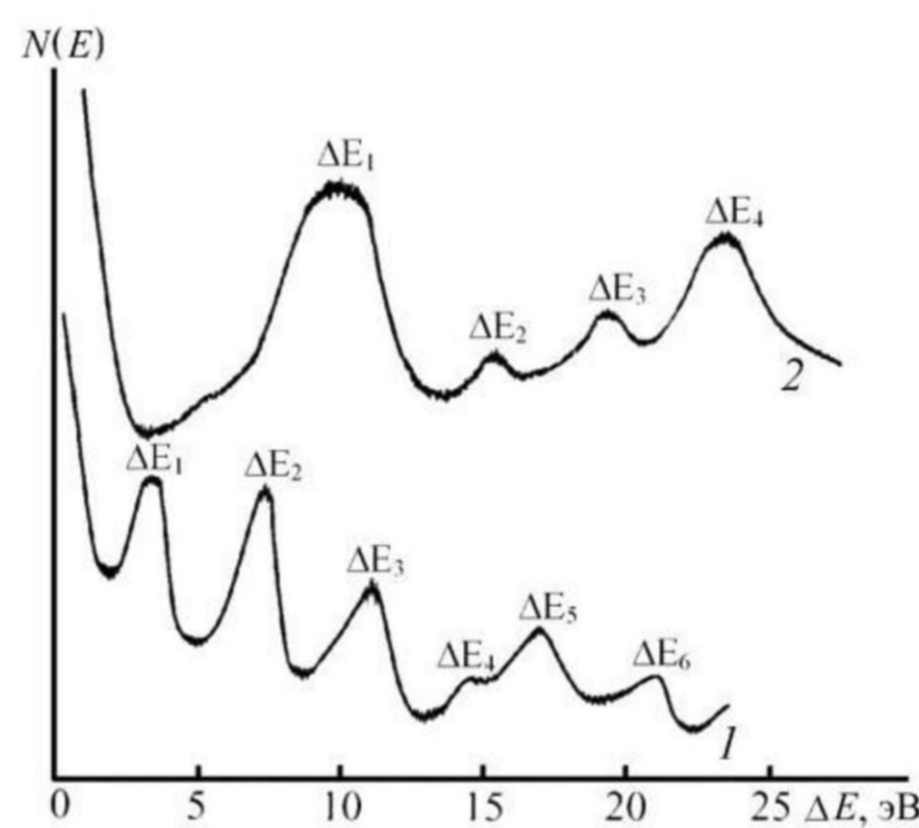


Рис.2. Спектры ХПЭЭ пленки Si/Cu(100) до (1) и после (2) формирования пленки SiO_2 , $E_p=1000$ эВ.

Таблица
Параметры энергетических зон, максимальные коэффициенты вторичной электронной эмиссии (σ_m), квантовый выход фотоэлектронов (Y) и удельное сопротивление (ρ) полученных пленок

Параметры	Si, $d=400$ Å	SiO_2/Si , $d=20$ Å	$BaSi_2/Si$, $d=50-60$ Å	$CoSi_2/Si$, $d=50-60$ Å
$e\phi$, эВ	5.1	3.9	3.1	—
E_g , эВ	1.1	4.1	0.3	0.4
ρ , мкОм·см	6×10^3	2×10^8	100–150	80–100
Φ , эВ	5.2	4.9	3.9	4.1
χ	4.1	0.8	3.6	3.7
σ_m	1.2	2.2	2	1.7
Y	8×10^{-5}	6×10^{-4}	4×10^{-4}	—

* $e\phi$ и Φ – термоэлектронная и фотоэлектронная работы выхода, E_g – ширина запрещенной зоны, χ – сродство к электрону.

5

Эти отличия объясняются тем, что в пленках SiO_2 (и силицидов металлов), созданных на поверхности свободных пленок, из-за ограничения температуры отжига содержится некоторое количество несвязанных атомов кремния и оксида типа SiO_x ($1 \leq x < 2$) [3].

Заключение

Таким образом, в работе впервые изучены морфология поверхности, параметры энергетических зон, эмиссионные и оптические свойства наноразмерных фаз и пленок SiO_2 , $BaSi_2$ и $CoSi_2$, созданных на поверхности свободно нанопленочной системы Si/Cu. Показано, что физические свойства этих пленок существенно отличаются от свойств пленок, полученных на поверхности массивных пленок. В частности это отличие в случае пленок SiO_2 составляет примерно два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang D. and Zou Z-Q. // Nanotechnology. 2009. V.20. P.275607.
2. Komarov F., Vlasukova L., Greben M., Milchanin O., Zuk J., Wesch W., Wendler E., Togambaeva A. // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B. 2013. V.307. P.102.
3. Donaev S.B., Djurabekova F., Tashmukhamedova D.A., Umirzakov B.E. // Phys. stat. sol. C. 2015. V.12. Is.1-2. P.89. https://doi.org/10.1002/pssc.201400156.

6