



ENERGETIKA VA ELEKTROTEXNIKA

УДК 530.1

ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР
СОЗДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СВОБОДНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ СИСТЕМЫ
Si/Cu

Худайбердиев Аъзам

Кандидат физико-математических наук, доцент

Жураева Хуррият

ассистент преподавателя

Экономический и педагогический Университет (ЭПУ)

Kam energiyali ($E_0=1-5$ keV) O_2^+ , Ba^+ , Cu^+ va Co^+ ionlarini implantatsiya qilish usulidan foydalanib, keyinchalik erkin Si/Cu(100) nanofilm tizimi, nanofazalar va SiO_2 plyonkalari yuzasida tavlaniş. metall silisidlar olingan. Ularning sirt morfologiyasi, tarkibi, energiya diapazonlarining parametrlari, ikkilamchi elektron emissiya koeffitsientining maksimal qiymatlari va fotoelektronlarning kvant rentabelligi aniqlandi. Xususan, metall silisidlarning tarmoqli oralig'i 0,3-0,4 eV, o'z qarshiligi esa 100-500 mOm sm ekanligi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: nanostruktura, erkin plyonka, elektron o'tish, ion implantatsiyasi, nanofilm, plazma tebranishlari.

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

Ключевые слова: наноструктура, свободная пленка, электронный переход, ионная имплантация, нанопленка, плазменные колебания.

Nanophases and films of SiO_2 and metal silicides were obtained by the method of low-energy ($E_0=1-5$ keV) implantation of O_2^+ , Ba^+ , Cu^+ and Co^+ ions with subsequent annealing on the surface of a free nanofilm system Si/Cu(100). Their surface morphology, composition, parameters of energy bands, maximum values of the secondary electron emission coefficient, and quantum yield of photoelectrons were determined. In particular, it was shown that the width of the band gap of metal silicides is 0.3-0.4 eV, and their specific resistance is 100-500 μ Ohm cm.

Keywords: nanostructure, free film, electron transition, ion implantation, nanofilm, plasma oscillations.

В последние время наноразмерные пленки и кластерные фазы, созданные на поверхности и приповерхностной области полупроводников и диэлектрических пленок, широко исследуется. В [1, 2] изучены процессы формирования наноразмерных пленок SiO_2 и $MeSi_2$ на поверхности тонкой пленочной системы Si/Cu. Однако, до

сих пор недостаточно хорошо изучены их основные физические свойства. Поэтому данная работа посвящена изучению электронной структуры, эмиссионных, электрофизических и оптических свойств тонких ($d \leq 30-40 \text{ \AA}$) оксидных пленок и силицидов металлов, сформированных на поверхности свободной пленки Si/Cu

при ионной имплантации в сочетании с отжигом.

Сначала методом вакуумного испарения получены тонкие монокристаллические пленки меди с толщиной $d \approx 450 \text{ \AA}$ на поверхности искусственно выращенного кристалла $\text{NaCl}(100)$ при $T \approx 350-450 \text{ K}$ в вакууме не хуже 10^{-5} Па [3]. Неоднородность пленки по толщине составляла $\sim 15-20 \text{ \AA}$. Пленки кремния с толщиной $\sim 50-500 \text{ \AA}$ созданы напылением электронной бомбардировкой расплывенных атомов Si на поверхность $\text{Cu}(100)$. В основном были использованы пленки Si с толщиной $d=400 \text{ \AA}$. Толщины пленок Cu и Si определялись по скорости нанесения пленки, по зафиксированному времени осаждения (сначала проводились контрольные измерения на эталонных пленках).

Имплантация ионов, прогрев и все исследования проводились в одном и том же экспериментальной установке, при вакууме не хуже 10^{-6} Па . Энергия ионов варьировались в пределах от 1 до 5 кэВ, а их доза - $D \approx 10^{14} - 10^{17} \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2}$. Для исследования состава и свойства использованы комплекс методов: ЭОС, УФЭС, СХПЭЭ, РЭМ, и дифракция быстрых электронов ДБЭ.

Аморфные пленки SiO_2 , с $d=20-25 \text{ \AA}$ созданы имплантацией ионов O_2^+ в $\text{Si}/\text{Cu}(100)$ с энергией $E_0=1 \text{ кэВ}$ с вариацией дозы облучения от $D=5 \cdot 10^{14}$

см^{-2} до $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с последующим прогревом при температуре $T=700 \text{ K}$ [1].

На рисунке 1,а и 1,б приведены РЭМ-изображения и ДБЭ картины поверхности $\text{Si}/\text{Cu}(100)$ до и после имплантации ионов O_2^+ с $E_0=1 \text{ кэВ}$ при дозе $D=6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Видно, что поверхность чистого кремния обладает относительно гладким микрорельефом (рис.1,а) и имеет структуру близкую к поликристаллической (вставка на рис.1,а). После имплантации ионами O_2^+ , на поверхности Si появляются отдельные локальные участки (кластеры) с измененной структурой и составом. При этом кластерные фазы занимают одну третью часть всей облученной площади. Несмотря на это, на электронограмме полностью исчезают кольца, характерные для поликристаллов и появляются новые широкие и размытые кольца, характерные для сильно разупорядоченной поверхности (вставка на рис.1,б). По-видимому, возникновение микронапряжений вблизи локализации кластеров приводит к разупорядочению и других участков облученной поверхности. Начиная с дозы $D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается, перекрывание границ отдельных участков (кластеров) друг с другом.

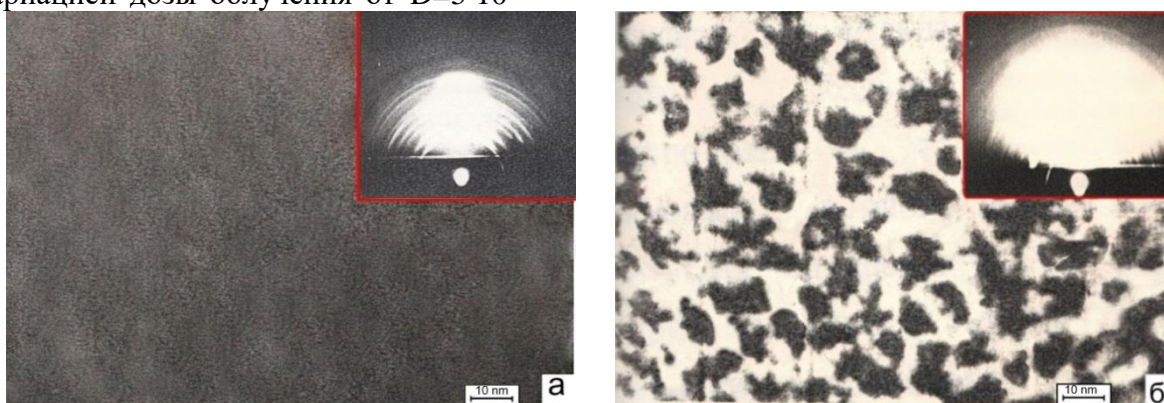


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображения (а) и картины ДБЭ (вставка на каждом рисунке) поверхности $\text{Si}(111)$, легированного ионами O_2^+ с $E_0=1,0 \text{ кэВ}$ при дозах $D, \text{ см}^{-2}$: а- 0 (нелегир. Si); б- $6 \cdot 10^{15}$

Увеличение дозы ионов O_2^+ до $D \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к полному

перекрытию кластеров и в приповерхностной области



формируется аморфный слой SiO_2 . Последнее подтверждается установлением на электронограмме вместо серии колец одного диффузного кольца - аморфное «галло».

Таким образом после ионной имплантации ионов O_2^+ и Ba^+ и последующего прогрева формируется

трехслойная система $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Cu}$ и $\text{BaSi}_2/\text{Si}/\text{Cu}$. В таблице 1 приведены зонно-энергетические параметры, максимальные значения коэффициентов ВЭЭ σ_m , квантовый выход фотоэлектронов χ , удельное сопротивление ρ нанопленок SiO_2 и силицидов металлов.

Таблица 1

Зонно-энергетические параметры и значения σ_m , χ и ρ полученных пленок

Различные параметры*	Si d=400Å	SiO_2/Si d=20 Å	$\text{Cu}_2\text{Si}_3/\text{Cu}$ d=50-60 Å	BaSi_2/Si d=50-60 Å	CoSi_2/Si d= 50-60 Å
ϵ_f , эВ	5.1	3.9	4	3.1	-
E_g , эВ	1.1	4.1	0.3	0.3	0.4
ρ , мкОм·см	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^8$	500	100-150	80-100
Φ , эВ	5.2	4.9	4	3.9	4.1
σ_m	1.2	2.2	1.2	2	1.7
χ	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	-

* ϵ_f и Φ - термоэлектронная и фотоэлектронная работа выхода, E_g - ширина запрещенной зоны, χ - сродство к электрону.

Видно, что при образовании силицида металла значение E_g уменьшается в 3 раза, удельное сопротивление 10^4 раза, значение σ_m и χ - в 1,5-2 раза, а в случае формирования SiO_2 значение E_g - увеличивается ~4 раза, ρ - в 10^4 раза, а σ_m и χ - в 2-3 раза. Однако эти данные заметно отличались от данных, полученных 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. Эти отличия объясняется тем, что в пленках SiO_2 (и силицидов металлов), созданных на поверхности свободных пленок из-за ограничения температуры прогрева содержится некоторые количества несвязанных атомов кремния и оксида типа SiO_x ($1 \leq x < 2$) [2]. На основе данных таблицы 1, можно построит примерная зонно-энергетическую диаграмму трехслойной системы.

Таким образом, в работе впервые изучены морфология поверхности, параметры энергетических зон,

эмиссионные и оптические свойства наноразмерных фаз и пленок SiO_2 , Cu_2Si_3 , BaSi_2 и CoSi_2 , созданных на поверхности свободной нанопленочной системы Si/Cu. Показано, что физические свойства этих пленок существенно отличается от таковых для пленок, полученные на поверхности массивных пленок. В частности E_g пленок SiO_2 , полученных на поверхностях тонких и массивных пленок Si отличается примерно два раза.

В настоящее время, широко изучаются кремний с нанопленкой, нанокристаллами и нанофазами силицидов металлов, а также нанопленочные многослойные системы Si - Me - Si - Me, на основе которых разрабатываются современные приборы микро- и наноэлектроники, спинтроники, оптоэлектроники, солнечной энергетики и т.д.

Кремний с наноразмерными кристаллами активных металлов применяется, как в создании барьерных слоев и омических контактов, так и в получении наноразмерных МДП, ПДП

– структур. Однако физические свойства свободных тонкопленочных структур Si/Me до сих пор остаются малоизученными.

В этой работе впервые приведены экспериментальные результаты по изучению состава, электронной структуры и профилей распределения атомов по глубине свободной пленки Al(100) с поверхностной нанопленкой Si различной толщины ($d_{Si} \approx 50-500 \text{ \AA}$).

Тонкие монокристаллические пленки алюминия получены методом вакуумного испарения и описано в работе [1]. Пленка кремния получена напылением атомов кремния на поверхность пленки Al(100) методом распыления Si электронной бомбардировкой при вакууме $\sim 10^{-5}$ Па [2]. Исследование проводилось методами ЭОС, СХПЭЭ и снятием энергетических зависимостей ионов Na^+ , прошедших через свободные пленки.

Перед исследованием образцы прогревались при $T=700\text{K}$, в течение 2-3

часов при вакууме $P \approx 10^{-7}$ Па. На рисунке 1 приведены оже-спектры алюминия с пленкой Si толщами 0, 25-30 \AA и 100-120 \AA . Из рисунка 1 (кривой 1) видно, что на спектре наряду с интенсивным оже-пиком Al ($E=68 \text{ эВ}$), обнаруживаются пики характерные для оксидов алюминия ($E=49$ и 53 эВ). Анализ показал, что при этом, в основном, образуется соединение типа Al_2O_3 и его концентрация составляет $\sim 5-8 \text{ ат.}\%$. Отметим, что в случае свободной пленки Al прогрев производился при $T \approx 700-750\text{K}$. Дальнейший рост температуры приводило к испарению атомов Al. Следовательно, более полной очистки Al не было возможным. При напылении Si с толщиной $d_{Si} = 20-25 \text{ \AA}$ на спектре появляется интенсивный пик $L_{2,3}VV$ кремния с $E=92 \text{ эВ}$, при этом интенсивность $L_{2,3}VV$ пика Al уменьшается почти в два раза, а пики Al_2O_3 становятся незаметными (кривая 3).

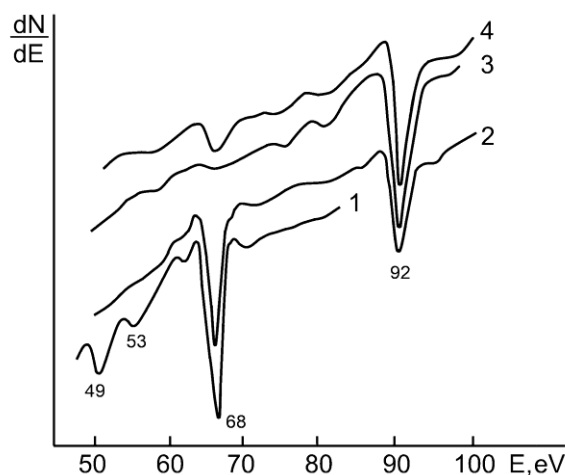


Рис.1. Оже-спектры Al с пленкой Si разной толщины: 1 - 0; 2 - 25 \AA ; 3 - 120 \AA . 4 – после прогрева 3-его при $T=800\text{K}$ в течение 30 мин

При прогреве этой системы до $\sim 750\text{K}$ не наблюдается образование соединения между Al и Si. Однако происходит некоторая диффузия Al через пленки Si на поверхность (рис.1, кривая 4). Следующим шагом наших исследований было снятие спектров проходящих ионов Na^+ через систему Si/Al. Толщины пленок составляла 20-

25 \AA , 50-60 \AA и 100-120 \AA . Для каждой толщины снимались спектры прошедших ионов Na^+ с $E_0=18 \text{ кэВ}$ (рис.2). В случае чистой пленки Al в спектре обнаруживается все три пики характерные для монокристаллов [3]. После напыления Si с $d_{Si} \approx 20-25 \text{ \AA}$, в отличие от системы Si-Cu [4], положения этих пиков заметно не

меняются, однако их интенсивность резко уменьшается и появляется четвертый пик. При $d_{Si} \approx 50-60 \text{ \AA}$ пики I и II на спектре полностью исчезают, пик III становится более широкой, а интенсивность пика IV резко увеличивается.

При $d_{Si} \approx 100-120 \text{ \AA}$ остается только четвертый пик с большой шириной. Эти результаты можно объяснить следующим образом. По-видимому, свободные тонкие пленки Al не

является идеально плоским, т.е. имеет волнообразную форму (гофрировано). Al и Si не образует химическую связь, поэтому при начальном этапе напыления (при $d_{Si} \leq 20-25 \text{ \AA}$) атомы Si в основном располагаются на «минимумах» волнистой поверхности и формирует шнуровидные полосы (островки) Si. При этом часть ионов Na^+ проходит через полосы Al не закрытых пленкой Si.

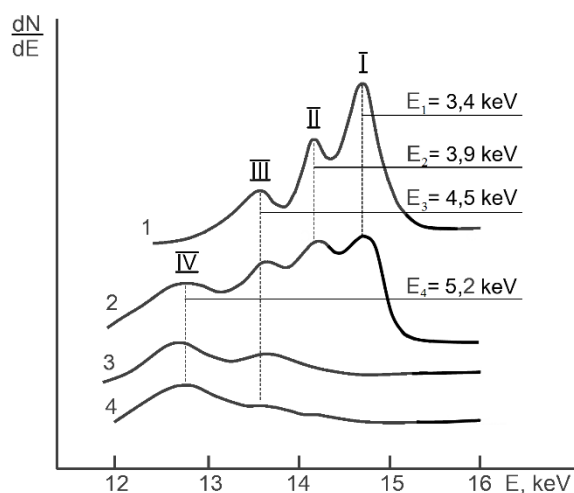


Рис.2. Энергетические распределения ионов Na^+ прошедших через пленки Al(100) с нанопленкой Si толщиной d , \AA : 1–0; 2–25; 3–50; 4–120. $\Delta E_1=3.4$; $\Delta E_2=3.9$; $\Delta E_3=4.5$; $\Delta E_4=5.2 \text{ keV}$

Поэтому I пик, характерный для осевого каналирования и II пик, характерный для плоскостного каналирования с малыми интенсивностями сохраняются. III пик характерный для аморфного материала также относится Al, а IV пик- относится аморфному Si. При $d_{Si} \approx 50-60 \text{ \AA}$ поверхность Al полностью покрывается атомами Si и начинает, формироваться сплошная аморфная пленка Si. При $d_{Si} \approx 120 \text{ \AA}$ толщина сплошной пленки составляет $50-60 \text{ \AA}$ и на спектре прошедших ионов наблюдается широкий 4 пик, а 3 пик остается на фоне 4-го пика. При $T \geq 800 \text{ K}$ наблюдается испарение поверхностных атомов сначала Al и затем Si.

Анализ картин РЭМ показали, что при $d_{Si} \leq 20-25 \text{ \AA}$ расстояние между центрами полос Si составляет $100-150 \text{ нм}$, а оценочная толщина полосы

кремния - $\sim 5-10 \text{ нм}$. Эти результаты очень важно для создания однородных, регулярно расположенных нанопроволок, с приблизительно одинаковой толщиной. Можно полагать, что этим способом можно получить проволоку и нанотрубок различных материалов на поверхности гофрированных пленок, в особенности, на поверхности графена.

Таким образом, в работе впервые обнаружено, что поверхности свободных пленок Al являются не сплошными, а волнообразными. Напылением Si на поверхность этих пленок получены регулярно расположенные (шаг $\sim 100-150 \text{ нм}$) нанопроволоки Si с толщиной $10-20 \text{ нм}$.

**Литература:**

1. Umirzakov B. E., Ruzibaeva M. K., Isakhanov Z. A. and Erkulov R. M. // ISSN 1063-7842, Technical Physics, 2019, Vol. 64, No. 6, pp. 887–889.
2. Isakhanov Z.A., Kosimov I.O., Umirzakov B.E. and Erkulov R.M. // Technical Physics, 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 114–117. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.
3. Isakhanov Z.A., Mukhtarov Z.E., Umirzakov B.E., Ruzibaeva M.K. // Technical Physics, V.56, Issue 4, April 2011. P. 546-549.
4. А.А. Алиев, З.А. Исаханов «Характеристические потери энергии электронами при отражении и прохождении через тонкие слои кристаллов». *Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат. наук*, №5, С.82-85, 1987.
5. З.А. Исаханов, Б.Е. Умирзаков, Т. Кодиров, А.С. Халматов, Ё.С. Эргашов, *Патент* “Способ получения свободной многослойной наноплёнки кремний-силицид-металл” №18145, **IAP 20150434**, 23.11.2018.
6. А.А. Алиев, Х.А. Арипов «Угловое и энергетическое распределение ионов, прошедших через монокристаллические пленки металлов». *Журн. “Радиотехника и электроника”*, вып. 10, С. 2014-2020, 1983.
7. Б.Е. Умирзаков, З.А. Исаханов, М.К. Рузибаева, З.Э. Мухтаров, А.С. Холматов “Изучения профилей распределения атомов по глубине свободных нанопленочных систем типа Si – Me” / *ЖТФ*, Т. 85, вып.4. С.123–125, 2015.