

Краткие сообщения

08

Изучение профилей распределения атомов по глубине свободных нанопленочных систем типа Si–Me

© Б.Е. Умирзаков, З.А. Исаханов, М.К. Рузибаева, З.Э. Мухтаров, А.С. Халматов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУзбекистан,
100125 Ташкент, Узбекистан
e-mail: isakhanov@aie.uz

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2014 г.)

Приведены результаты по изучению состава, кристаллической структуры и профилей распределения атомов по глубине свободной пленки Cu(100) с поверхностной нанопленкой Si различной толщины. Показано, что при толщине кремниевой пленки $d_{Si} = 5.0$ nm атомы кремния и меди образуют соединение типа Cu_xSi_y . С ростом толщины ($d_{Si} > 5.0$ nm) на поверхности силицида формируется пленка кремния. После прогрева на границе Si/Cu образуется переходной слой силицида Cu_2Si_3 толщиной $d = 8.0–10.0$ nm.

Введение

В последние годы широко исследуется кремний с нанопленкой и нанокристаллами силицидов металлов, а также нанопленочные многослойные системы Si–Me–Si–Me, на основе которых разрабатываются современные приборы микро- и нанoeлектроники, спинтроники, оптоэлектроники, солнечной энергетики и т.д. [1]. В частности, соединения 3d-металлов Fe, Co, Mn и их интерметаллические соединения с кремнием имеют перспективы при синтезе магнитных наноразмерных структур [2]. Кремний с наноразмерными кристаллами активных металлов (Ba, Na, Mg) применяется как в создании барьерных слоев и омических контактов, так и в получении наноразмерных МДП (металл–диэлектрик–полупроводник)-, ПДП (полупроводник–диэлектрик–полупроводник)-структур. В настоящее время изучению состава и структурных свойств нанопленочных систем типа Si–Me посвящено большое число работ. Однако свободные тонкопленочные структуры Si/Me до сих пор остаются малоизученными. Ранее нами [3–6] и другими авторами [7,8] всесторонне изучены состав и структура свободных тонких моно- и поликристаллических пленок Cu и Ag толщиной от 20.0 до 100.0 nm, используя методы электронной оже-спектроскопии (ЭОС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), вторичной ионной масс-спектроскопии (ВИМС) и спектроскопии ионов, прошедших через свободные тонкие пленки.

Показано, что в случае монокристаллической пленки в спектре прошедших ионов обнаруживаются три ярко выраженных пика, обусловленных осевым, плоскостным каналированием и ионами, прошедшими пленку беспорядочным (диффузным) образом.

В настоящей работе впервые приведены экспериментальные результаты по изучению состава, кристаллической структуры и профилей распределения атомов по

глубине свободной пленки Cu(100) с поверхностной нанопленкой Si различной толщины ($d_{Si} = 50–500$ nm).

1. Методика эксперимента

Тонкие монокристаллические пленки меди получены методом вакуумного испарения на поверхности искусственно выращенного кристалла NaCl(100) при $T = 350–450$ K в вакууме не хуже 10^{-5} Pa [4]. В этой же установке для устранения различных дефектов получаемую пленку отжигали в вакууме при $T = 650–700$ K в течение 1.5–2 h, затем полученная пленка с подложкой опускалась в дистиллированную воду, отделялась от подложки и вылавливалась медной сеткой с прозрачностью 90–95%. В основном использовались пленки Cu(100) с $d \approx 4.50$ nm, с неоднородностью по толщине не более 3%. Пленка кремния напылялась на поверхность пленки Cu(100) методом распыления Si-электронной бомбардировкой. Толщина пленки кремния варьировалась в пределах 5.0–50.0 nm. Толщина пленок Cu и Si определялась по скорости нанесения пленки, по зафиксированному времени осаждения (сначала проводились контрольные измерения на эталонных пленках). Скорость нанесения пленки Cu составляла ~ 2.0 nm/s, а Si — 0.8–1 nm/s, что обеспечивало получение незагрязненной и качественной пленки при вакууме $\sim 10^{-5}$ Pa.

Исследование проводилось методами ЭОС, СХПЭЭ и получением энергетических зависимостей ионов Na^+ , прошедших через свободные пленки.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Были исследованы свободные тонкие пленки Cu(100) с поверхностной нанопленкой Si толщиной 5.0, 10.0 и

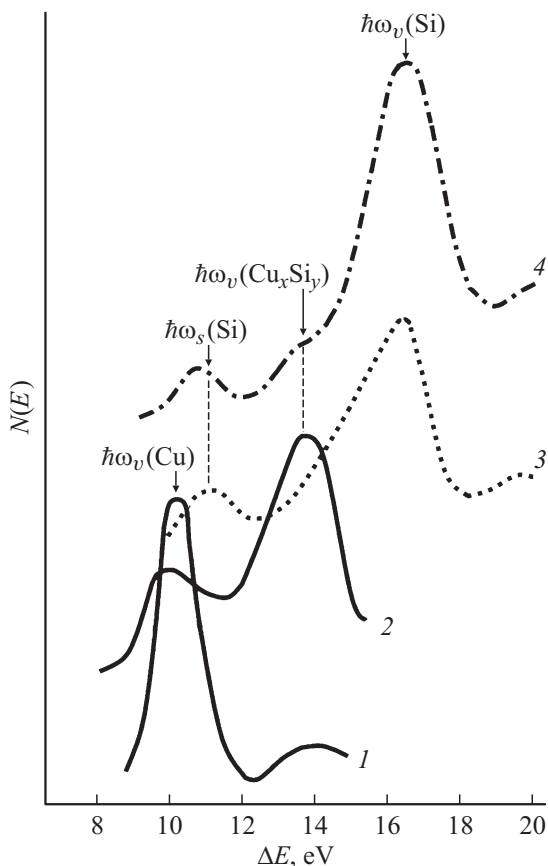


Рис. 1. Спектры ХПЭЭ для системы Si/Cu(100). Толщина пленки кремния d_{Si} : 1 — 0, 2 — 5.0, 3 — 10.0, 4 — 25.0 nm. Во всех случаях $d_{\text{Cu}} = 45.0$ nm. Энергия первичных электронов $E_p = 500$ eV.

20.0 nm. Перед измерением каждый образец обезгаживался при $T = 700\text{--}750$ K в течение 2–3 h при вакууме 10^{-5} Pa. Исследования проводились при вакууме $P \leq 10^{-6}$ Pa.

Сначала было исследовано влияние напыления пленок кремния на спектры ХПЭЭ Cu(100) толщиной 45.0 nm. Из спектров, полученных при энергии первичных электронов $E_p = 500$ eV (рис. 1), видно, что при толщине $d_{\text{Si}} \approx 5.0$ nm высота пика объемного плазмона меди резко уменьшается и появляется новый пик объемного плазмона, характерный для силицида металла. При этом в спектре практически не обнаруживаются пики ХПЭЭ для Si. При толщине пленки кремния 10.0 nm в спектре появляются пики поверхностного и объемного ($\hbar\omega_s$ и $\hbar\omega_v$) плазмонов чистого кремния. При увеличении толщины от 10.0 до 20.0 nm интенсивность пика поверхностного плазмона кремния заметно не меняется, а объемного плазмона увеличивается в 1.5 раза. Исходя из этих данных, можно полагать, что при $d_{\text{Si}} \approx 5.0$ nm основная часть атомов Si, перемешиваясь с атомами меди, образует соединение типа Cu_xSi_y . При $d_{\text{Si}} > 5.0$ nm с ростом толщины на поверхности этого силицида формируется пленка кремния.

На рис. 2 приведены профили распределения атомов кремния и меди по глубине для системы Si/Cu ($d_{\text{Si}} \approx 40.0$ nm), полученные после прогрева при $T = 800\text{--}850$ K. Видно, что, вследствие взаимной диффузии атомов Si и Cu на границе Si/Cu образуется переходной слой силицида Cu_xSi_y толщиной $d = 8.0\text{--}10.0$ nm. При этом глубина проникновения атомов кремния в медь и атомов меди в кремний доходит до 10.0–15.0 nm. Анализ показал, что в переходном слое преимущественно образуется соединение типа Cu_2Si_3 .

На рис. 3 приведены спектры прошедших ионов ($E_0 = 18$ keV) для пленки меди с $d_{\text{Cu}} = 45.0$ nm и для меди с пленками кремния $d_{\text{Si}} = 5.0$ nm и $d_{\text{Si}} = 20.0$ nm. В случае чистой пленки меди в спектре обнаруживаются все три пика, характерных для монокристаллической пленки [9]. В случае системы Si/Cu с $d_{\text{Si}} = 5.0$ nm пик 1 (пик осевого каналирования) практически полностью исчезает и интенсивности пиков 2 (пик плоскостного каналирования) и 3 (пик неканализованных ионов) резко уменьшаются и их положение смещается в сторону больших потерь энергии. При $d_{\text{Si}} = 20.0$ nm пик 2 в спектре практически не обнаруживается, ширина пика 3 существенно увеличивается, а интенсивность резко падает. Смещение положения пиков 2 и 3 и неадекватное изменение их интенсивностей при напылении пленки Si объясняется как изменением состава и увеличением толщины пленок, так и формированием немонотонной пленки. Действительно, как видно из электронограммы, приведенной на рис. 4, пленка меди ($d = 45.0$ nm) имеет монокристаллическую струк-

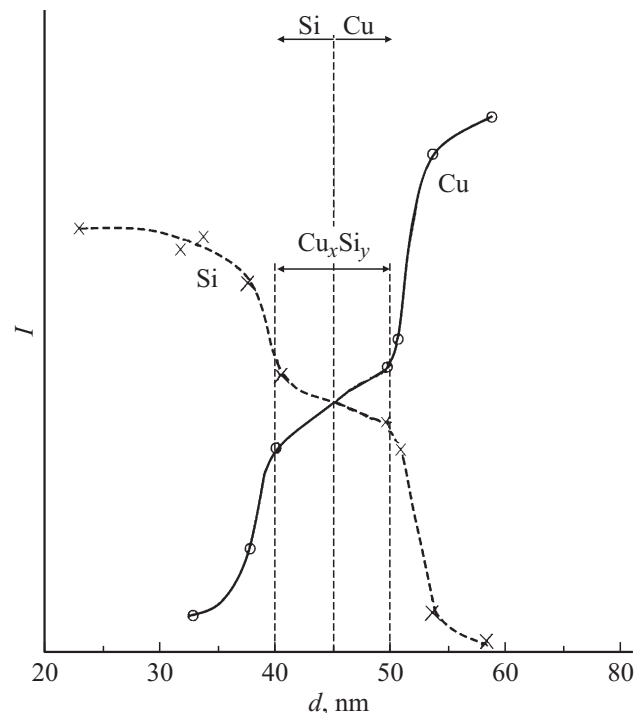


Рис. 2. Изменение интенсивности основных оже-пиков Si (92 eV) и Cu (60 eV) по глубине для системы Si/Cu: $d_{\text{Si}} = 40.0$ nm, $d_{\text{Cu}} = 45.0$ nm.

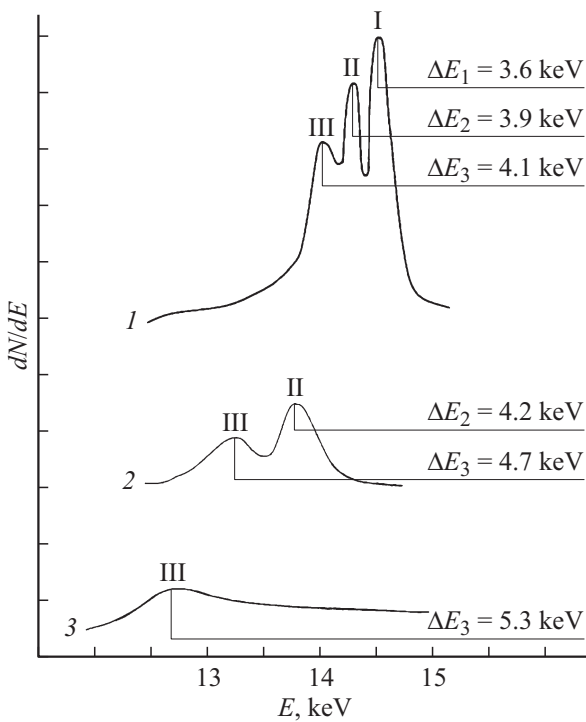


Рис. 3. Энергетические распределения ионов Na^+ , прошедших пленку $\text{Cu}(100)$ с нанопленкой Si толщиной d_{Si} : 1 — 0, 2 — 5.0, 3 — 20.0 nm; $d_{\text{Cu}} = 45.0$ nm. Энергия первичных ионов $E_0 = 18$ keV.

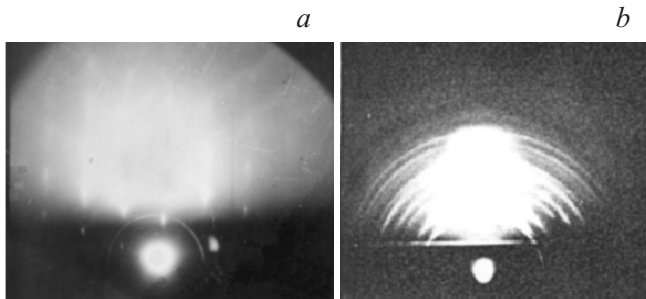


Рис. 4. Электронограмма пленки Cu (a) и пленки Si с $d = 20.0$ nm, выращенной на поверхности Cu (b).

туру (a), а пленка кремния с $d_{\text{Si}} = 20.0$ nm, выращенная на поверхности меди, имеет структуру, близкую к поликристаллической (b).

Отметим, что при увеличении температуры прогрева системы Si/Cu на РЭМ-картине резко уменьшается диффузный фон, однако концентрические кольца, характерные для поликристаллических образцов, сохраняются вплоть до $T = 850$ K. По-видимому, из-за резкого отличия значений постоянных решеток Cu ($a = 0.3615 \text{ \AA}$) и Si ($a = 0.0543 \text{ \AA}$) в случае ультратонких пленок эпитаксиальный рост кремния на поверхности $\text{Cu}(100)$ не происходит. Дальнейшее увеличение температуры приводит к увеличению диффузии Cu к поверхности и частичному испарению атомов меди и кремния.

Заключение

На основе результатов экспериментальных исследований, проведенных для нанопленочной гетероструктуры $\text{Si}-\text{Cu}(100)$ можно сделать следующие основные выводы.

1. При толщине кремниевой пленки примерно 5.0 nm атомы кремния, перемешиваясь с атомами меди, образуют соединение типа Cu_xSi_y . С ростом толщины ($d_{\text{Si}} > 5.0$ nm) на поверхности этого силицида формируется пленка кремния.

2. После прогрева системы Si/Cu ($d_{\text{Si}} \approx 40.0$ nm) при $T = 800-850$ K вследствие взаимной диффузии атомов Si и Cu , на границе Si/Cu образуется переходной слой силицида Cu_2Si_3 толщиной $d = 8.0-10.0$ nm.

3. Выяснено, что пленка меди ($d = 45.0$ nm) имеет монокристаллическую структуру, а пленка кремния с $d_{\text{Si}} = 20.0$ nm, выращенная на поверхности меди, имеет структуру, близкую к поликристаллической.

Настоящая работа выполнена по гранту № Ф2-ФА-Ф161 и финансирована Академией наук Республики Узбекистан.

Список литературы

- [1] Домашевская Э.П., Терехов В.А. и др. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 577–584.
- [2] Усейнов Н.Х. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 602–609.
- [3] Алиев А.А., Исаханов З.А. // Изв. АН УзССР, сер. физ.-мат. наук. 1987. № 5. С. 82–85.
- [4] Исаханов З.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 11. С. 91.
- [5] Исаханов З.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 9. С. 116–118.
- [6] Исаханов З.А., Умирзаков Б.Е., Рузибаева М.К., Курбанов Р. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 8. С. 1–4.
- [7] Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. Наука, 1972.
- [8] Wakashima K., Fukamachi M., Nagakura S. // J. Appl. Phys. 1969. № 8. P. 1167.
- [9] Алиев А.А., Арунов Х.А. // РиЭ. 1983. Вып. 10. С. 2014–2020.