

Прохождение электромагнитных излучений через тонкие пленки Cu

© *Ё.С. Эргашов*,¹ *З.А. Исаханов*,² *Б.Е. Умирзаков*^{1,2}

¹Ташкентский государственный технический университет,
100095 Ташкент, Узбекистан

²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Республики Узбекистан,
100125 Ташкент, Узбекистан
e-mail: ftmet@rambler.ru

(Поступила в Редакцию 13 января 2015 г. В окончательной редакции 12 октября 2015 г.)

Впервые методом прохождения света исследована электронная структура наноразмерных фаз Cu, полученных на поверхности монокристаллического NaCl(100) методом высоковакуумного напыления. Показано, что нанопленки Cu с толщиной 1–1.5 monolayer обладают свойствами, характерными для узкозонных полупроводников.

Введение

Многослойные свободные нанопленочные структуры на основе металлов могут быть использованы в качестве армирующего материала, а также для изготовления контактов и соединений в приборах и устройствах электронной техники. Известны работы, посвященные изучению физических свойств наноразмерных структур на основе Ti, W, Fe, Ni, Au, Ag с учетом их практического применения [1–6]. В этих работах показано, что наноразмерные кластеры обладают нехарактерными для металлов электронными свойствами. Это объясняется проявлением квантово-размерных эффектов (резким изменением электронной структуры) в кластерах, когда их размеры, уменьшаясь, приближаются к длине волны электрона (≤ 1 nm) [2]. Поэтому изучение электронной структуры наноразмерных пленок металлов различной толщины является актуальной задачей современного электронного приборостроения. Определение ширины запрещенной зоны E_g и плотности электронных состояний материалов затруднительно, так как требует одновременного применения комплекса методов вторичной и фотоэлектронной спектроскопии. Ранее [7,8] нами изучены состав и структура свободных пленок Cu разной толщины ($d = 10.0–100.0$ nm), выращенных на поверхности NaCl(100) при $T = 480–500$ K в условиях сверхвысокого вакуума. Однако до настоящего времени недостаточно изучена начальная стадия формирования нанопленок Cu и практически не изучены их зонно-энергетические параметры. В настоящей работе с использованием метода прохождения света исследованы степень покрытия поверхности NaCl(100) атомами Cu и электронная структура наноразмерных фаз и пленок Cu.

Методика эксперимента

Напыление тонких пленок ($d \leq 1.0–1.5$ nm) Cu на хорошо обезгаженную поверхность монокристаллического NaCl(100) осуществлялось в вакууме 10^{-5} Pa при комнатной температуре по методике, описанной в [9].

Толщина пленок оценивалась по времени и скорости их роста, которые откалиброваны предварительно по относительному изменению интенсивностей оже-пиков Na и Cu. Скорость напыления выбрана 0.1–0.15 nm/min (~ 0.5 monolayer/min). Исследования проводились в сверхвысоковакуумном приборе ($P \leq 10^{-7}$ Pa), состоящем из двух отсеков. В первом отсеке проводились исследования состава, структуры и свойств поверхности с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), а во втором отсеке — степень покрытия поверхности и электронная структура наноразмерных фаз Cu методом прохождения световых лучей через систему Cu + NaCl(100). Исследования проводились с использованием света с длиной волны $\lambda = 6200–300$ nm ($E_c = 0.2–4$ eV). Исследуемые образцы (до 6 шт.) устанавливались в специальную каретку, которая может перемещаться от одного отсека в другой с помощью магнитов.

Результаты и их обсуждение

Перед исследованием система Cu + NaCl обезгаживалась в условиях сверхвысокого вакуума при $T \approx 600$ K в течение 2–3 h. Анализ спектров ОЭС показал, что после обезгаживания поверхностная концентрация атомов O и C не превышает 2–3 at.% и не наблюдается образования оксидов и карбидов Cu.

На рис. 1 приведены кривые зависимости изменения интенсивности I монохроматического света ($E_c \approx 1.5$ eV) и белого света, проходящих через систему Cu + NaCl, от времени напыления пленок Cu. Из рис. 1, а видно, что с ростом времени напыления интенсивность I монохроматического света сначала (до $t = 50–60$ s) резко, а затем (в интервале $t \approx 60–150$ s) медленно уменьшается, и при 160 s практически равняется нулю. Динамику изменения зависимости $I(t)$ можно объяснить следующим образом. На начальном этапе напыления

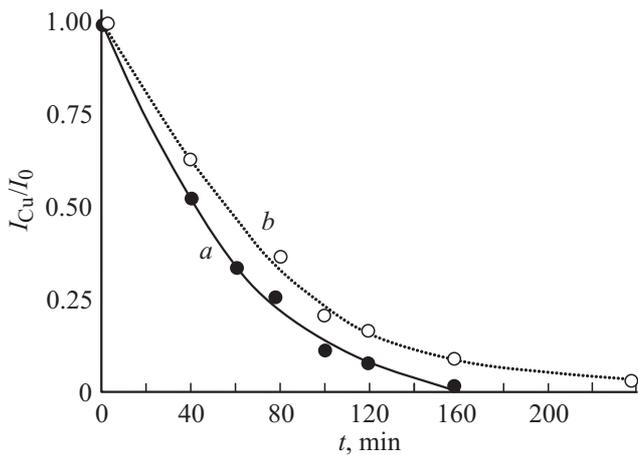


Рис. 1. Изменение интенсивности монохроматического ($h\nu = 1.5 \text{ eV}$) и белого света, проходящего через системы Cu + NaCl, от времени напыления Cu.

адсорбированные атомы Cu, мигрируя по поверхности NaCl, образуют отдельные центры (зародыши). При увеличении t до 60 s диаметры этих центров, быстро увеличиваясь, формируют кластерные фазы, что приводит к резкому уменьшению I , а при $t \geq 60 \text{ s}$ наряду с увеличением диаметров фаз увеличивается их толщина, следовательно, в интервале $t = 60\text{--}150 \text{ s}$ I уменьшается более медленно. С $t = 150\text{--}160 \text{ s}$ границы отдельных кластерных фаз начинают перекрывать друг друга, и поверхность полностью покрывается атомами Cu, следовательно, степень покрытия θ равняется ~ 1 . При толщине пленки $d \leq 1 \text{ monolayer}$ θ можно оценить по формуле

$$\theta = 1 - \frac{I_{\text{Cu}}}{I_0},$$

где I_0 — интенсивность проходящего света при $d_{\text{Cu}} = 0$, т.е. интенсивность света, проходящего через NaCl. Как видно из рис. 1, кривая *a*, при напылении Cu в течение $t \sim 40 \text{ s}$ степень покрытия составляет ~ 0.45 , при $t = 100 \text{ s}$, $\theta \approx 0.15$, а при $t \geq 160 \text{ s}$ ($d \geq 1 \text{ monolayer}$) $\theta = 1$. Анализ результатов показывает, что при малых толщинах ($d \leq 4\text{--}5 \text{ monolayers}$) пленки Cu растут неравномерно: на некоторых участках толщина пленки максимальна (d_{max}), а на некоторых участках минимальна (d_{min}). При $t = 160 \text{ s}$ минимальная толщина Cu составляет 1 монослой ($d_{\text{min}} = 1 \text{ monolayer}$), а максимальная толщина $d_{\text{max}} = 2\text{--}3 \text{ monolayer}$.

В случае белого света (рис. 1, кривая *b*) с ростом времени напыления интенсивность света также уменьшается. Однако скорость уменьшения $I(t)$ немного меньше, чем в случае монохроматического света. При $t = 160 \text{ s}$ ($d_{\text{min}} = 1 \text{ monolayer}$) интенсивность проходящего света уменьшается в 20–30 раз, но не равняется нулю. При этом через пленки Cu проходят только низкочастотные излучения. I равняется нулю начиная с $d_{\text{min}} = 1.5\text{--}2 \text{ monolayer}$ ($t = 240\text{--}300 \text{ s}$).

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности проходящего света от ее энергии для пленок Cu с толщиной $d_{\text{min}} = 1$ и 1.5 monolayer. Видно, что через эти пленки проходит только свет с энергией $E_0 \leq 0.5\text{--}0.6 \text{ eV}$, следовательно, можно полагать, что при $d_{\text{min}} \leq 1.5\text{--}2 \text{ monolayer}$ пленки Cu обладают свойствами узкозонных ($E_g \approx 0.5\text{--}0.6 \text{ eV}$) полупроводников. Известно, что в металлических образцах (пленках) в отличие от полупроводников и диэлектрических пленок между валентной зоной (заполненными электронными состояниями) и зоной проводимости (свободные энергетические состояния) не имеется запрещенная зона. Эти зоны образуют одну зону, и плотность состояний электронов имеет непрерывный характер. Когда размеры

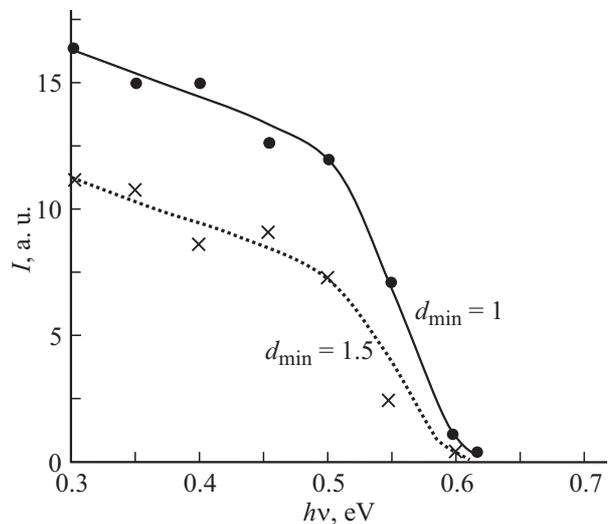


Рис. 2. Зависимость интенсивности света, проходящего через системы Cu + NaCl, от энергии света для разных толщин Cu.

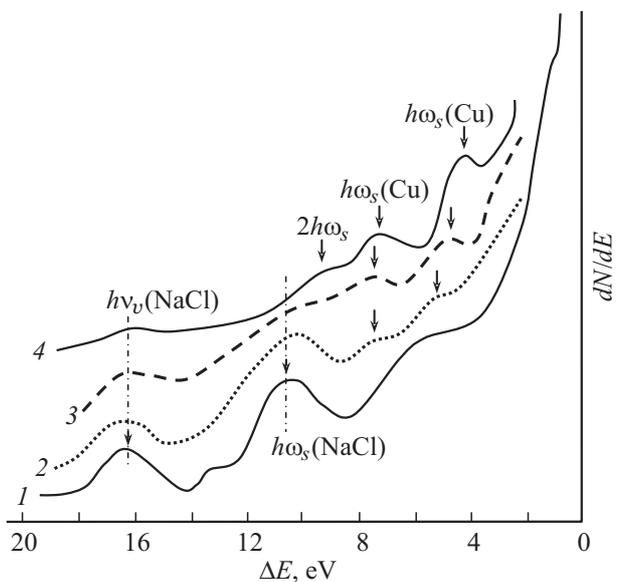


Рис. 3. Спектры ХПЭЭ для NaCl с пленкой Cu с толщиной, d_{min} : 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 monolayer.

металлических пленок (или частиц) уменьшаются в размерах до нескольких сотен атомов (например 1–2 монослоя) непрерывная плотность состояний в зоне заменяется набором дискретных уровней. При этом интервал между верхним заполненным уровнем и нижним свободным уровнем может оказаться больше чем тепловая энергия kT , что приводит к образованию щели (запрещенной зоны) [2]. Таким образом, наши эксперименты показали, что в случае Cu квантово-размерные эффекты проявляются при $d \leq 1.0\text{--}1.5$ monolayer. При $d_{\min} \geq 3$ monolayer через пленки Cu практически не проходят как высокочастотные, так и низкочастотные излучения, и свойства пленки приближаются к свойствам массивного Cu .

Все эксперименты, связанные с прохождением света, проводились в условиях сверхвысокого вакуума. Отметим, что подобные исследования можно проводить и в атмосфере воздуха.

На рис. 3 приведены спектры ХПЭЭ для NaCl , покрытого атомами Cu с разной толщиной. Видно, что пики плазменных колебаний ($\hbar\omega_s$ и $\hbar\omega_v$), характерные для Cu , появляются начиная с $d_{\min} \sim 1\text{--}1.5$ monolayer, что указывает на формирование сплошной пленки. Однако положения пиков $\hbar\omega_v$ и $\hbar\omega_s$ немного смещены в сторону больших потерь энергии и их интенсивности существенно меньше, чем для массивной пленки Cu . Все пики ХПЭЭ, характерные для массивного Cu , устанавливаются при $d_{\min} \geq 3\text{--}4$ monolayer. Таким образом, метод прохождения света через тонкие пленки является эффективным средством оценки степени покрытия поверхности атомами металла (при $d \leq 1$ monolayer) и ширины запрещенной зоны формирующихся наноструктур.

Заключение

Методом прохождения света через тонкие пленки $\text{Cu} + \text{NaCl}$ изучены начальная стадия роста ($d \approx 0.2\text{--}5$ monolayer) пленки Cu на поверхности NaCl . Установлено, что при $d \leq 1$ рост пленки имеет островковый характер, а в интервале $d \approx 1\text{--}5$ monolayers пленка растет неравномерно. Показано, что нанопленки Cu с толщиной 1–1.5 monolayer обладают свойствами, характерными для узкозонных полупроводников ($E_g = 0.5\text{--}0.6$ eV).

Список литературы

- [1] Болтаев А.П., Пудонин Ф.А. // ЖЭТФ. 2006. Т. 130. № 3. С. 2008.
- [2] Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / Пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. М.: Техносфера, 2004. 376 с.
- [3] Wang Liu L., Kim Y., Huang Z., Pantel D., Hesse D., Alexe M. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. N 243, P. 243.
- [4] Болтаев А.П., Пудонин Ф.А. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. № 3. С. 587.
- [5] Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
- [6] Громов Д.Г., Пятилова О.В., Булярский С.В., Белов А.Н., Раскин А.А. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 562.
- [7] Алиев А.А., Исаханов З.А., Мухтаров З.Э., Рузубаева М.К. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 1. С. 110–116.
- [8] Isakhanov Z.A., Ruzibaeva M.K., Umirzakov B.E., Kurbanov R. // J. Surface Investigation. 2011. Vol. 5. N 4. P. 769.
- [9] Алиев А.А., Арипов Х.А. // Радиотехника и электроника. 1983. Вып. 10. С. 2014–2020.