

УДК 621.793.18

**ИОННО-ПУЧКОВЫЙ СИНТЕЗ ПРОЗРАЧНЫХ МЕДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ****Телеш Е.В., Гутенко Н.Д., Данилович С.В.***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Исследовано влияние температуры подложки на характеристики прозрачных медных электродов, полученных прямым осаждением из ионных пучков. Установлено, что сопротивление снизилось почти в 2 раза при  $T_{\text{п}} \sim 500$  К. Это связано с ростом размеров зерен меди, что подтверждено исследованием микроструктуры пленок. Нагрев подложки способствовал отжигу дефектов, неоднородностей, десорбции примесей, что привело к улучшению оптических параметров покрытий. Оптимальная температура подложки для формирования прозрачных медных электродов с высокой прозрачностью и низким сопротивлением должна составлять 520–540 К.

**Ключевые слова:** ионный пучок, медные электроды, оптическое пропускание, температура подложки.

**ION BEAM SYNTHESIS OF TRANSPARENT COPPER ELECTRODES****Telesh E.V., Gutenko N.D., Danilovich S.V.***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The effect of substrate temperature on the characteristics of transparent copper electrodes obtained by direct deposition from ion beams was studied. It was found that the resistivity decreased by almost 2 times at  $T_s \sim 500$  K. This is due to an increase in the size of copper grains, which was confirmed by studying the microstructure of the films. Heating the substrate contributed to the annealing of defects, inhomogeneities, and desorption of impurities, which led to an improvement in the optical parameters of the coatings. The optimal substrate temperature for the formation of transparent copper electrodes with high transparency and low resistance should be 520–540 K.

**Key words:** ion beam, copper electrodes, optical transmission, substrate temperature

*Адрес для переписки: Телеш Е.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: eteles@mail.ru*

Прозрачные электроды с использованием оксида индия (ITO) давно и широко используются в промышленности и занимают 95 % рынка прозрачных проводящих покрытий. ITO обладает высокой проводимостью и прозрачностью, однако склонен к растрескиванию, а потому неприменим для создания гибких дисплеев. В последнее время в технологии отмечается тенденция использования полупрозрачных слоев металла (серебро, медь). Медные пленки находят применение в качестве полупрозрачных электродов в гибких ЖК дисплеях [1], органических светодиодах [2], сенсорных экранах [3].

Для нанесения медных пленок в основном применяют магнетронное распыление, химическое и электрохимическое осаждение. Недостатки этих методов связаны с низкой энергией (< 2–5 эВ) осаждаемых частиц, что не позволяет обеспечить высокие адгезию и плотность пленок при низких температурах подложки. Осаждение металлических пленок непосредственно из пучков ионов дает возможность управления энергией осаждаемых ионов, позволяет изменять адгезию пленок к подложке, структуру и состав растущей пленки, а, следовательно, и ее свойства. Авторами ранее был применен новый метод для нанесения тонких медных пленок, исследовано влияние параметров ионного пучка на электрофизические характеристики пленок [4].

Задачей настоящей работы является исследование влияния температуры подложки на характеристики прозрачных медных электродов.

Покрытия наносили на подложки из стекла с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Исследовано влияние температуры подложки на удельное объемное сопротивление  $\rho_v$  пленок меди. Установлено, что  $\rho_v$  снизилось почти в 2 раза при  $T_{\text{п}} \sim 500$  К (рисунок 1).

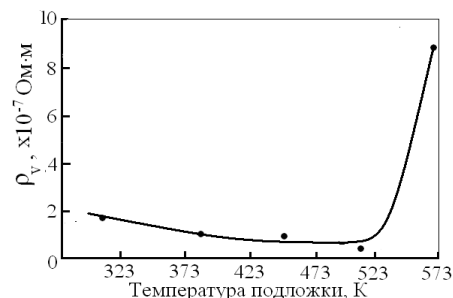


Рисунок 1 – Зависимость удельного объемного сопротивления пленок меди от температуры подложки

Это связано с ростом размеров зерен меди и, соответственно, уменьшением рассеяния электронов на границах зерен. Однако дальнейшее повышение  $T_{\text{п}}$  привело к резкому росту  $\rho_v$  в 9–10 раз. Это объясняется усилением химического взаимодействия атомов меди с газами остаточной

атмосферы в вакуумной камере и появлением диэлектрической прослойки на границах зерен.

Структура пленок исследовалась методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра *Rigaku Ultima IV*. У пленок, сформированных при  $T_{\text{п}} = 510$  К, наблюдалось увеличение интенсивности отражения от основной плоскости (111) (рисунок 2). Также появились небольшие пики отражения плоскостей (220) и (311), которые отсутствовали у пленок, полученных при низких температурах подложки.

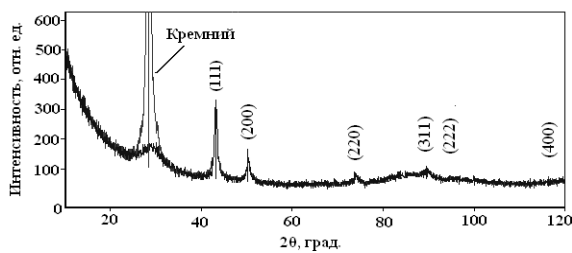


Рисунок 2 – Рентгенограмма пленки меди

АСМ изображение морфологии поверхности пленки, полученной при  $T_{\text{п}} = 510$  К, также свидетельствовало о ее крупнозеренной структуре (рисунок 3).

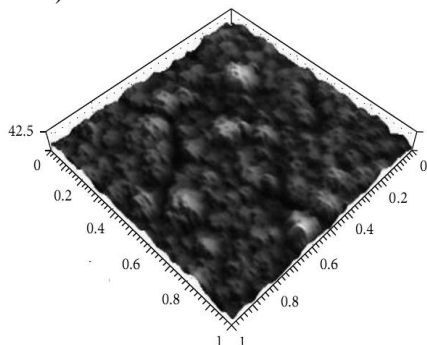


Рисунок 3 – АСМ изображение морфологии поверхности медной пленки

Измерение оптических параметров покрытий осуществлялось в диапазоне 300–900 нм с помощью спектрофотометра *MC-121 PROSCAN*.

Нагрев подложки до 520 К привел к снижению пропускания в инфракрасной области спектра (рисунок 4). Зависимость оптических параметров на длине волны 555 нм показала, пропускание снизилось на 5–7 % при нагреве подложки от 373 до 423 К. Это можно связать с увеличением степени химического взаимодействия атомов меди с газами остаточной атмосферы (рисунок 5).

Дальнейший нагрев подложки способствовал отжигу дефектов, неоднородностей, десорбции примесей, что привело к улучшению оптических

параметров покрытий. При  $T_{\text{п}} = 573$  К произошло существенное снижение пропускания и рост поглощения, что связано с процессом кристаллизации пленки меди, ростом зерен.

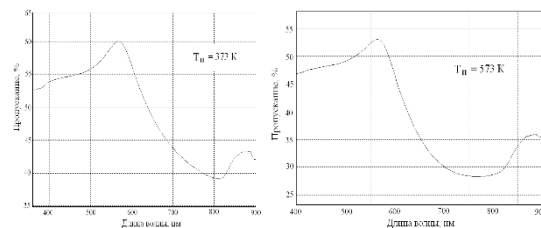


Рисунок 4 – Спектральные зависимости пропускания медных покрытий

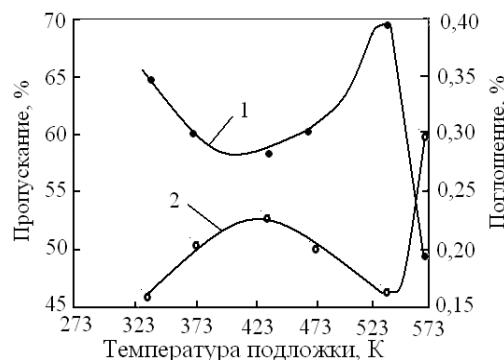


Рисунок 5 – Зависимость оптического пропускания (1) и поглощения (2) на  $\lambda = 555$  нм пленок меди от температуры подложки

Таким образом, оптимальная температура подложки для формирования прозрачных медных электродов с высокой прозрачностью и низким сопротивлением должна составлять 520–540 К.

### Литература

1. Properties of ITO/Cu/ITO multilayer films for application as low resistance transparent electrodes / D.-J. Kim [et.al.] // *Trans. on electrical and electronic materials*. – 2009. – V. 10, № 5. – P. 185–186.
2. Kang, M.-G. Semitransparent Cu electrode on a flexible substrate and its application in organic light emitting diodes / M.-G. Kang, L.G. Guo // *J. of Vac. Sci. and Technol. B*. – 2007. – V. 25, № 6. – P. 2637–2641.
3. Indium-free, highly transparent, flexible Cu<sub>2</sub>O/Cu/Cu<sub>2</sub>O mesh electrodes for flexible touch screen panels / D.-J. Kim [et al.] // *Sci. Rep.* – 2012. – V. 5, 16838.
4. Телеш, Е.В. Электрофизические характеристики наноразмерных пленок меди, полученных прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, Н.Д. Гутенко // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 540–544.*