

УДК 537.563
EDN: KBVGON

PACS: 84.60.Jt

Влияние термического отжига на свойства пленок оксида меди, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления© А. В. Саенко^{1,*}, Г. Е. Билык¹, С. А. Хубежов², К. А. Козюменко¹, В. А. Смирнов¹¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, 344006 Россия

* E-mail: avsaenko@sfnu.ru

² Харбинский инженерный университет, г. Циндао, 266000 Китай

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; после доработки 8.04.2025; принята к публикации 2.06.2025

Шифр научной специальности: 2.2.2

Проведено осаждение пленок оксида меди методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления в бескислородной среде при комнатной температуре. Исследовано влияние температуры отжига на воздухе после осаждения на морфологию поверхности, структурные и оптические свойства пленок оксида меди. Показано, что все пленки имеют равномерную нанокристаллическую зернистую структуру. При этом пленки оксида меди, полученные без термического отжига и при температуре отжига 250 °С, имеют высокую однородность и состоят из зерен размером порядка 25–30 и 23–27 нм соответственно. При температуре отжига 500 °С размер зерен в пленке существенно возрастает до 50–55 нм и они становятся менее однородными. Получено, что все пленки имеют относительно гладкую поверхность со средней шероховатостью в диапазоне от 5,94 до 10,46 нм. Показано, что пленки, полученные без термического отжига, состоят из кристаллической фазой Cu_2O , которая полностью переходит в фазу CuO после отжига при температуре 500 °С. Установлено, что ширина запрещенной зоны осажденной пленки без термического отжига составляет 2,18 эВ и уменьшается до 1,63 эВ после отжига при температуре 500 °С. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования структур солнечных элементов на основе оксида меди.

Ключевые слова: оксид меди; магнетронное распыление; термический отжиг; кристаллическая структура; ширина запрещенной зоны.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-66-73

Введение

В последнее время активно ведутся исследования в области наноструктурных оксидных полупроводников для их применения в солнечных элементах и других оптоэлектронных устройствах (оптические мемристоры, газовые датчики, тонкопленочные транзисторы), поскольку они обладают перспективными структурными, электрофизическими и оптическими свойствами, широко распространены и безопасны для окружающей среды, а также

не требуют сложных технологических процессов осаждения, что делает их многообещающими материалами для создания потенциально недорогих и эффективных устройств [1–4]. Для формирования структур солнечных элементов широко исследуются оксиды меди (Cu_2O и CuO), которые относятся к полупроводникам р-типа проводимости с шириной запрещенной зоны 2,1–2,6 и 1,2–1,7 эВ соответственно и обладают относительно высоким коэффициентом спектрального поглощения (10^4 – 10^5 см^{-1}) [4–8]. Максимальная теоретиче-

ская эффективность солнечных элементов на основе оксидов меди может составлять порядка 20 %, однако на практике она пока не превышает 5 %, что связано с качеством осаждаемых оксидных пленок, в частности наличием вторичных фаз (например, в пленке Cu_2O наличие фазы CuO), высокой шероховатости поверхности, а также наличием дефектов на межфазных гетерограницах [2, 9–11].

При осаждении пленок оксидов меди широко используются такие методы, как магнетронное распыление на постоянном токе и в высокочастотном режиме, химическое осаждение из газовой фазы, электрохимическое осаждение, импульсное лазерное осаждение и золь-гель метод (центрифугирование) [4–8, 10]. Метод магнетронного распыления имеет такие преимущества, как возможность точного управления параметрами растущей пленки в процессе осаждения, высокая стабильность процесса во времени и отсутствие нагрева подложки до высоких температур [10]. Возможность варьирования технологическими параметрами при осаждении пленок позволяет управлять их структурными и оптическими свойствами, а также расширяет области применения структур на их основе. В работах [4–7] показано, что температура подложки и параметры магнетронного распыления, состав газа в вакуумной камере и температура последующего отжига способны существенно изменять свойства пленки оксида меди, что может быть перспективным для применения в качестве фотоактивного слоя в структурах солнечных элементов.

В данной работе проведены исследования влияния температуры отжига после высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления в бескислородной среде при комнатной температуре (25 °С) на морфологию поверхности, структурные и оптические свойства пленок оксида меди для применения в структурах солнечных элементов и других оптоэлектронных устройствах.

Методы и материалы

Пленки оксида меди были получены на стеклянных подложках при ВЧ магнетронном распылении в бескислородной среде при комнатной температуре на установке VSE-PVD-

DESK-PRO (ООО «АкадемВак»). Перед осаждением пленок оксида меди подложки очищались в ультразвуковой ванне поочередно в течение 5 мин в ацетоне, изопропиловом спирте и дистиллированной воде для удаления органических загрязнений. Для распыления использовалась керамическая мишень Cu_2O (ООО «Гирмет») чистотой 99,9 %, диаметром 50 мм и толщиной 6 мм. Вакуумная камера перед осаждением откачивалась до базового давления менее 8×10^{-5} мбар и заполнялась газообразным аргоном высокой чистоты (99,998 %). Мишень предварительно распылялась в течение не менее 5 мин для удаления поверхностных загрязнений и достижения оптимальных условий осаждения. При осаждении расстояние между мишенью и подложкой было порядка 70 мм. Мощность распыления составляла 75 Вт, а рабочее давление аргона в вакуумной камере было 5×10^{-3} мбар. При этом скорость осаждения пленок оксида меди составляла 15,4 нм/мин. После осаждения пленки отжигались на воздухе в муфельной печи ЭКПС-10 (АО «Смоленское СКТБ СПУ») при температурах 250 и 500 °С в течении 1 часа.

Толщина полученных пленок оксида меди измерялась на профилометре Alpha-Step D-100 (KLA-Tencor), который позволяет осуществлять сканирование поверхности образцов для анализа высоты ступеньки. Морфология поверхности и структурные свойства пленок исследовались методами сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ) на установке Nova Nanolab 600 (FEI Company). Исследование шероховатости поверхности пленок выполнялось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме на нанолaborатории NTEGRA (НТ-МДТ). Обработка АСМ-изображений осуществлялась с использованием программного комплекса Nova Image Analysis. Химический состав пленок определялся рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (РФЭС) на спектрометре K-Alpha (Thermo Scientific) с применением монохроматического $\text{Al}_{K\alpha}$ излучения (энергия фотонов 1486,6 эВ, размер пятна 400 мкм). Коэффициент пропускания пленок в ультрафиолетовой и видимой области спектра (300–800 нм) определялся на спектрофотометре UV-VIS Evolution-300 (Thermo) при использовании стеклянной под-

ложки без пленки в качестве эталонного образца.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок оксида меди, полученных методом ВЧ магнетронного распыления без последующего термического отжига (осаждение при 25 °С) и с последующим отжигом в муфельной печи при температурах 250 и 500 °С, а также поперечные сколы пленок толщиной порядка 100 нм. Все пленки имеют равномерную нанокристаллическую зернистую структуру. При этом пленки оксида меди, полученные без термического отжига и при температуре отжига 250 °С, имеют высокую однородность без трещин и пор и состоят из плотно упакованных зерен схожего размера, который составляет порядка 25–30 и 23–27 нм соответственно. При температуре отжига 500 °С размер зерен в пленке существенно возрастает до 50–55 нм и они становятся менее однородными. Кроме того, на поверхности пленки, полученной при температуре отжига 500 °С, заметны темные пятна, показывающие

наличие некоторых пор или трещин, возникающие возможно в результате разницы коэффициентов теплового расширения между пленкой и подложкой [4, 5, 12].

Толщина пленки оксида меди практически не зависит от температуры отжига, а на поперечном сколе проявляется характерная столбчатая структура с направлением перпендикулярным к плоскости подложки, которая часто наблюдается при магнетронном осаждении оксидных полупроводников [12, 13]. Кроме того, на поперечном сколе пленок оксида меди, полученных при температуре отжига 500 °С, наблюдается более шероховатая поверхность, что является результатом высокой температуры отжига, которая способствует диффузии атомов и увеличению размера зерен [4, 5]. Таким образом, высокотемпературный отжиг после осаждения приводит к росту кристаллитов в пленке оксида меди, что может способствовать улучшению её качества и возрастанию фототока, поскольку для достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии необходима полупроводниковая пленка, состоящая, в частности, из больших кристаллических зерен [9, 14].

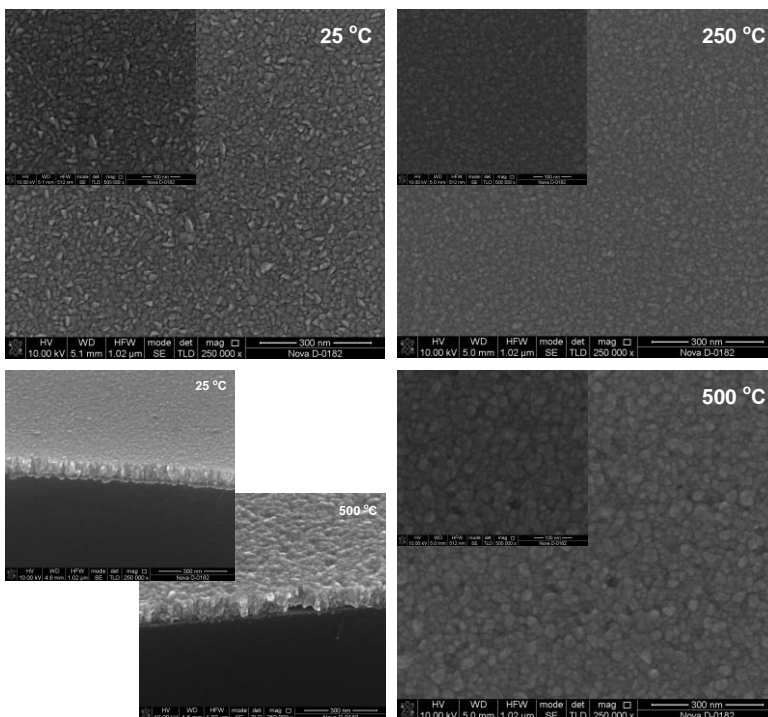


Рис. 1. РЭМ-изображения морфологии поверхности пленок оксида меди и поперечный скол толщиной порядка 100 нм

На рис. 2 представлены АСМ-изображения поверхности пленок оксида меди, полученных методом ВЧ магнетронного распыления без последующего термического отжига

(осаждение при 25 °С) и с последующим отжигом в муфельной печи при температурах 250 и 500 °С, которые показывают, что все пленки имеют относительно гладкую поверх-

ность. Причем пленки оксида меди, полученные без термического отжига и при температуре отжига 250 °С, имеют практически одинаковую шероховатость поверхности равную 6,12 и 5,94 нм соответственно, а при температуре отжига 500 °С шероховатость поверхно-

сти существенно возрастает до 10,46 нм. Увеличение шероховатости поверхности объясняется присутствием в пленке зерен большего размера из-за возрастания температуры отжига, что способствует диффузии атомов и увеличению размера зерен [4, 5, 12].

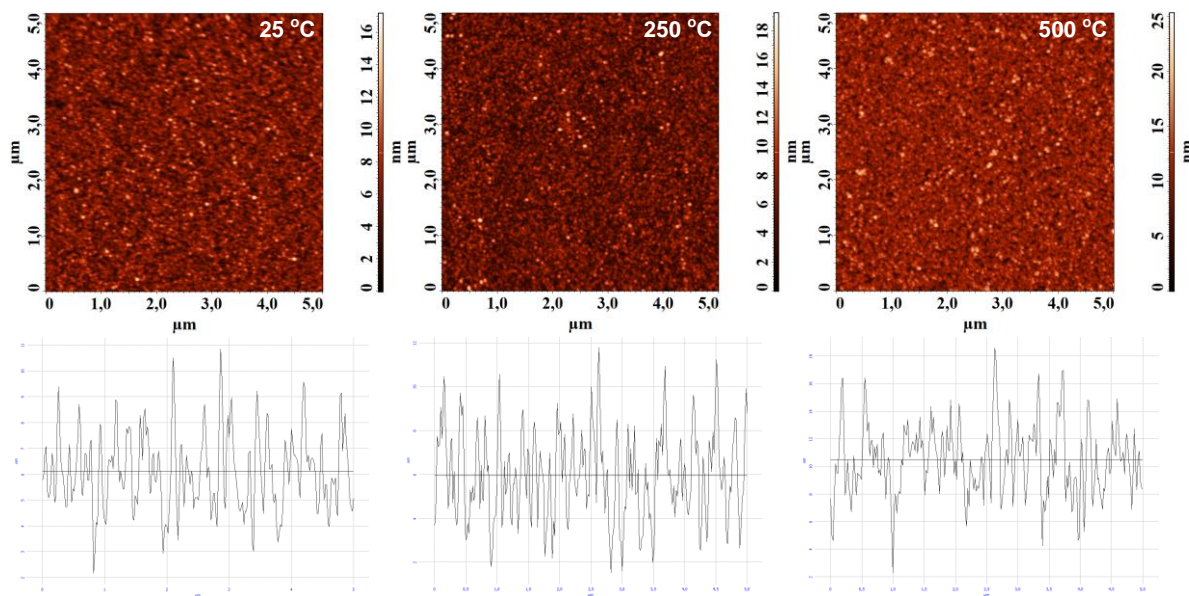


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности пленок оксида меди

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) использовался для подтверждения химического состояния элементов в пленках оксида меди. На рис. 3 представлены обзорные РФЭС-спектры и спектры высокого разрешения уровней меди и кислорода пленок оксида меди, полученных методом ВЧ магнетронного распыления без последующего термического отжига (осаждение при 25 °С) и с последующим отжигом в муфельной печи при температурах 250 и 500 °С. Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры получены в диапазоне энергий связи 0–1350 эВ, которые позволяют определить все элементы, присутствующие на поверхности пленок Cu_2O . Спектры высокого разрешения отдельных элементов получены для более точного определения положения пиков.

Согласно обзорным спектрам на поверхности пленок оксида меди присутствуют медь, кислород и углерод. Наличие пика углерода $\text{C}1s$ (284,5–284,7 эВ) свидетельствует о его адсорбции на поверхности пленки из окружающей атмосферы [15].

Спектр высокого разрешения уровня $\text{Cu}2p$ пленки оксида меди, полученной без

термического отжига, показывает, что интенсивные фотоэлектронные пики, относящиеся к $\text{Cu}2p_{3/2}$ и $\text{Cu}2p_{1/2}$, наблюдаются при 932,4 и 952,3 эВ и соответствуют степени окисления Cu^+ фазы Cu_2O [10, 15–17]. При этом между $\text{Cu}2p_{3/2}$ и $\text{Cu}2p_{1/2}$ наблюдаются небольшие сателлитные пики с энергией связи в диапазоне 940–946 эВ, а также одиночный сателлитный пик при 962,3 эВ, что соответствует дублетным состояниям степени окисления Cu^{2+} фазы CuO [15]. Наличие фазы CuO на поверхности пленок Cu_2O неизбежно связано с окислением Cu_2O до CuO , поскольку фаза CuO является наиболее стабильной в условиях окружающей среды [15–17].

Спектр высокого разрешения уровня $\text{Cu}2p$ пленки оксида меди, полученной при температуре отжига 250 °С, показывает, что интенсивные пики, относящиеся к $\text{Cu}2p_{3/2}$ и $\text{Cu}2p_{1/2}$, наблюдаются при 933,7 и 954,4 эВ и соответствует степени окисления Cu^{2+} преобладающей фазы CuO [10, 15–17]. При этом продолжают наблюдаться небольшие пики при 932,4 и 952,3 эВ, что соответствует степени окисления Cu^+ вторичной фазы Cu_2O . Спектр высокого разрешения уровня $\text{Cu}2p$

пленки оксида меди, полученной при температуре отжига 500 °С, показывает, что интенсивные пики, относящиеся к $\text{Cu}2p_{3/2}$ и $\text{Cu}2p_{1/2}$, также наблюдаются при 933,7 и 954,2 эВ и соответствуют степени окисления Cu^{2+} фазы CuO . Помимо основных пиков энергии связи, также наблюдаются сателлитные пики на стороне с более высокой энергией связи в диапазоне при 940–946 эВ, а также одиночный сателлитный пик при 962,3 эВ для фазы CuO [15–17].

На спектрах уровня $\text{O}1s$ присутствует асимметричный пик с плечом при более высоких энергиях связи, который соответствует кислороду (O^{2-}) кристаллической решетки ок-

сида меди при 530,0 (25 °С) и 529,7 эВ (250 и 500 °С), а также кислороду (O_i), адсорбированному на поверхности и входящему в состав поверхностных гидроксильных групп при 531,2 (25 °С) и 531,5 эВ (250 и 500 °С) [15, 16].

Таким образом, показано, что пики уровня $\text{Cu}2p$ смещаются в сторону более высоких значений энергии связи от 932,4 до 933,7 эВ и от 952,3 до 954,4 эВ, когда пленка оксида меди подвергается термическому отжигу при 500 °С. Это указывает на изменение степени окисления меди с Cu^+ на Cu^{2+} , а соответственно и фазы Cu_2O в пленке, полученной без термического отжига, на фазу CuO в пленке, полученной при термическом отжиге 500 °С.

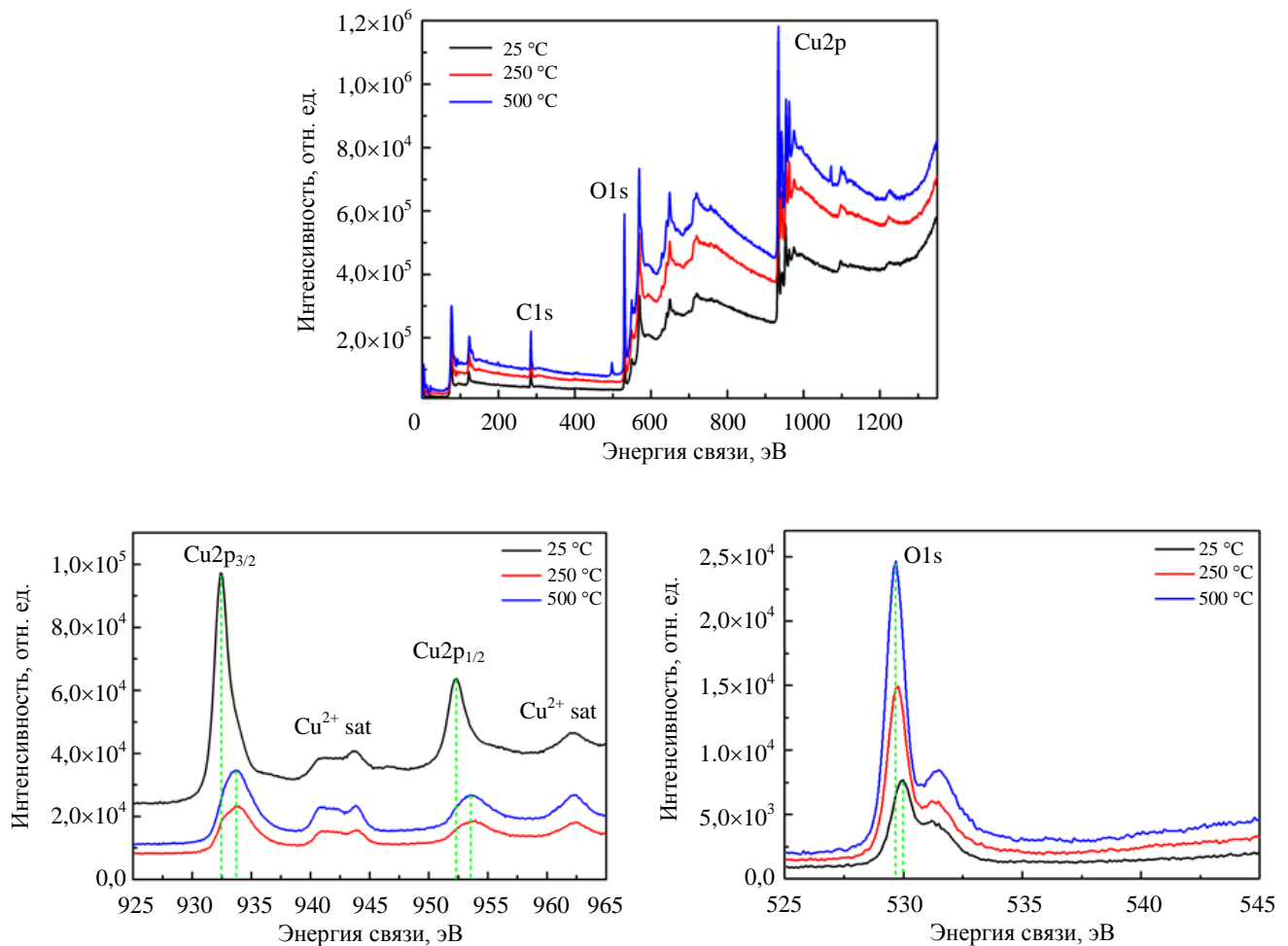


Рис. 3. Обзорный РФЭС-спектр и спектры высокого разрешения уровней меди и кислорода пленок оксида меди при комнатной температуре и последующем термическом отжиге при 250 и 500 °С

Оптические свойства пленки оксида меди исследовались с помощью измерения коэффициента пропускания в диапазоне длин волн 300–800 нм. На рис. 4 представлены спектры пропускания пленок оксида меди, по-

лученных методом ВЧ магнетронного распыления без последующего термического отжига (осаждение при 25 °С) и с последующим отжигом в муфельной печи при температурах 250 и 500 °С. Пленка оксида меди, полученная

без термического отжига, имеет высокое оптическое поглощение до порядка 550 нм, в то время как после отжига при температуре 500 °С поглощение пленки возрастает и смещается в сторону инфракрасной области спектра до порядка 750 нм, что может быть связано с уменьшением ширины запрещенной зоны, а также улучшением кристалличности и снижением концентрации дефектов в пленке за счет окисления [4, 6, 10, 15]. Так на вставке рис. 4 приведены зависимости $(\alpha hv)^2 = f(hv)$, где α является коэффициентом поглощения, а hv – энергией фотонов. Ширина запрещенной зоны пленок оксида меди определялась экстраполяцией прямолинейного участка на ось энергий. Таким образом, показано, что пленка оксида меди, полученная без термического отжига, имеет ширину запрещенной зоны 2,18 эВ, что соответствует кристаллической структуре Cu_2O , а пленка оксида меди, полученная при температуре отжига 500 °С, имеет ширину запрещенной зоны 1,63 эВ, что соответствует кристаллической структуре CuO .

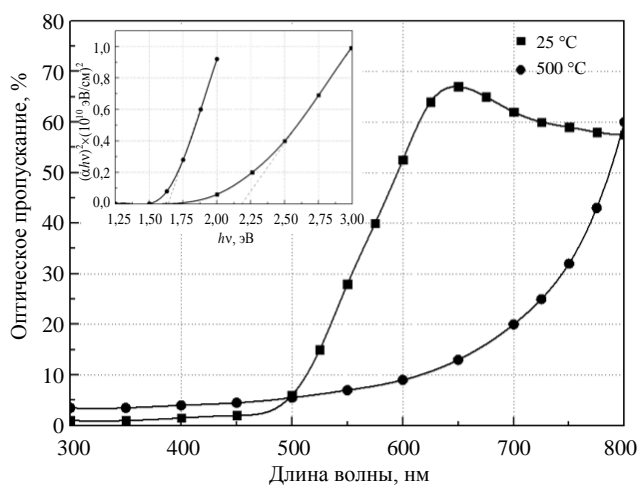


Рис. 4. Спектр пропускания и определение ширины запрещенной зоны пленок оксида меди

Заключение

Проведено осаждение пленок оксида меди методом ВЧ магнетронного распыления в бескислородной среде при комнатной температуре. Исследовано влияние температуры отжига в муфельной печи на воздухе после осаждения на морфологию поверхности, структурные и оптические свойства пленок оксида меди. Показано, что все пленки имеют

равномерную нанокристаллическую зернистую структуру. При этом пленки оксида меди, полученные без последующего термического отжига и при температуре отжига 250 °С, имеют высокую однородность без трещин и пор и состоят из плотно упакованных зерен размером порядка 25–30 и 23–27 нм соответственно. При температуре отжига 500 °С размер зерен в пленке существенно возрастает до 50–55 нм и они становятся менее однородными. Получено, что все пленки имеют относительно гладкую поверхность со средней шероховатостью в диапазоне от 5,94 до 10,46 нм. Анализ РФЭС спектров показал, что пленки, полученные без термического отжига, состоят из кристаллической фазой Cu_2O , которая полностью переходят в фазу CuO после отжига при температуре 500 °С. Кроме того, установлено, что ширина запрещенной зоны осажденной пленки без термического отжига составляет 2,18 эВ и уменьшается до 1,63 эВ после отжига при температуре 500 °С. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования структур солнечных элементов на основе оксида меди.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00827,
<https://rscf.ru/project/23-29-00827/>
в Южном федеральном университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhigang Zang, Wensi Cai, Yong Zhou / Metal Oxide Semiconductors: Synthesis, Properties, and Devices. 2023. Ch. 6. P. 171–210.
2. Saenko A. V., Bilyk G. E., Smirnov V. A. / Russian Microelectronics. 2024. Vol. 53 (4). P. 319–328.
3. Саенко А. В., Бильк Г. Е., Малюков С. П. / Прикладная физика. 2023. № 4. С. 66–77.
4. Salam Surjit Singh, Biraj Shougaijam, Mir Waqas Alam, Naorem Khelchand Singh / Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2023. Vol. 34. P. 854.
5. Ozaslan D., Erken O., Gunes M., Gumus C. / Physica B: Physics of Condensed Matter. 2020. Vol. 580. P. 411922.
6. Lee Wen-Jen, Wang Xin-Jin / Coatings. 2021. Vol. 11. P. 864.
7. Baka Ouidad, Bacha Oussama, Khel-ladi Mohamed Redha, Azizi Amor / Bulletin of Materials Science. 2023. Vol. 46. P. 84.

8. Murali Dhanya S., Kumar Shailendra, Choudhary R. J., Wadikar Avinash D., Jain Mahaveer K., Subrahmanyam A. / AIP Advances. 2015. Vol. 5. P. 047143.
9. Perez-Tomas Amador / Advanced Materials Interfaces. 2019. Vol. 6. P. 1900471.
10. Lakshmanan A., Alex Zachariah C., Meher S. R. / Materials Science in Semiconductor Processing. 2022. Vol. 148. P. 106818.
11. Perez-Tomas Amador, Mingorance Alba, Tanenbaum David, Lira-Cantu Monica / The Future of Semiconductor Oxides in Next-Generation Solar Cells. 2018. Vol. 8. P. 267–356.
12. Umar Medina, Swinkels Milo Y., De Luca Marta, Fasolato Claudia, Moser Lucas, Gadea Gerard, Marot Laurent, Glatzel Thilo, Zardo Ilaria / Thin Solid Films. 2021. Vol. 732. P. 138763.
13. Kudryashov D. A., Gudovskikh A. S., Babichev A. V., Filimonov A. V., Mozharov A. M., Agekyan V. F., Borisov E. V., Serov A. Yu., Filosofov N. G. / Semiconductors. 2017. Vol. 51 (1). P. 110–114.
14. Sinuo Chen, Lichun Wang, Chunlan Zhou, Jinli Yang / Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2023. Vol. 15. P. 062701.
15. FeiFan Yang, WenBo Peng, YiJian Zhou, Rong Li, GuoJiao Xiang, JinMing Zhang YueLiu, Jia-Hui Zhang, Yang Zhao, Hui Wang / Vacuum. 2022. Vol. 198. P. 110876.
16. Jun-A Kim, Jung-Hwan Park, Sang-Geon Park, Chang-Sik Son, Young-Guk Son, Dong-Hyun Hwang / Crystals. 2023. Vol. 13. P. 643.
17. Qiang Yu, Huwei Zhao, Yuhong Zhao, Yue Zhao / Physica B: Condensed Matter. 2024. Vol. 690. P. 416253.

PACS: 84.60.Jt

Effect of thermal annealing on the properties of copper oxide films obtained by radio-frequency magnetron sputtering

A. V. Saenko^{1,*}, G. E. Bilyk¹, S. A. Khubezhov², K. A. Kozyumenko¹ and V. A. Smirnov¹

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia

* E-mail: avsaenko@sfedu.ru

² Harbin Engineering University, Qingdao, 266000 China

Received 15.11.2024; revised 8.04.2025; accepted 2.06.0000

In this paper copper oxide films were deposited by radio-frequency (RF) magnetron sputtering in an oxygen-free environment at room temperature. The effect of annealing temperature in air after deposition on the surface morphology, structural and optical properties of copper oxide films was studied. It was shown that all films have a uniform nanocrystalline granular structure. At the same time, copper oxide films obtained without thermal annealing and at an annealing temperature of 250 °C have high homogeneity and consist of grains of about 25–30 and 23–27 nm in size, respectively. At an annealing temperature of 500 °C, the grain size in the film increases significantly to 50–55 nm and they become less uniform. It was found that all films have a relatively smooth surface with an average roughness in the range from 5.94 to 10.46 nm. It is shown that the films obtained without thermal annealing consist of the crystalline phase Cu₂O, which completely transforms into the CuO phase after annealing at a temperature of 500 °C. It is established that the band gap of the deposited film without thermal annealing is 2.18 eV and decreases to 1.63 eV after annealing at a temperature of 500 °C. The obtained results can be used in the development of technological processes for the formation of solar cells structures based on copper oxide.

Keywords: copper oxide; magnetron sputtering; thermal annealing; crystal structure; band gap.

REFERENCES

1. Zhigang Zang, Wensi Cai and Yong Zhou, Metal Oxide Semiconductors: Synthesis, Properties, and Devices, Ch. 6, 171–210 (2023).
2. Saenko A. V., Bilyk G. E. and Smirnov V. A., Russian Microelectronics **53** (4), 319–328 (2024).

3. Saenko A. V., Bilyk G. E. and Malyukov S. P., *Applied Physics*, № 4, 66–77 (2023) [in Russian].
4. Salam Surjit Singh, Biraj Shougaijam, Mir Waqas Alam and Naorem Khelchand Singh, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **34**, 854 (2023).
5. Ozaslan D., Erken O., Gunes M. and Gumus C., *Physica B: Physics of Condensed Matter*. **580**, 411922 (2020).
6. Lee Wen-Jen and Wang Xin-Jin, *Coatings* **11**, 864 (2021).
7. Baka Ouidad, Bacha Oussama, Khelladi Mohamed Redha and Azizi Amor, *Bulletin of Materials Science* **46**, 84 (2023).
8. Murali Dhanya S., Kumar Shailendra, Choudhary R. J., Wadikar Avinash D., Jain Mahaveer K. and Subrahmanyam A. *AIP Advances* **5**, 047143 (2015).
9. Perez-Tomas Amador, *Advanced Materials Interfaces* **6**, 1900471 (2019).
10. Lakshmanan A., Alex Zachariah C. and Meher S. R., *Materials Science in Semiconductor Processing* **148**, 106818 (2022).
11. Perez-Tomas Amador, Mingorance Alba, Tanenbaum David and Lira-Cantu Monica, *The Future of Semiconductor Oxides in Next-Generation Solar Cells* **8**, 267–356 (2018).
12. Umar Medina, Swinkels Milo Y., De Luca Marta, Fasolato Claudia, Moser Lucas, Gadea Gerard, Marot Laurent, Glatzel Thilo and Zardo Ilaria, *Thin Solid Films* **732**, 138763 (2021).
13. Kudryashov D. A., Gudovskikh A. S., Babichev A. V., Filimonov A. V., Mozharov A. M., Agekyan V. F., Borisov E. V., Serov A. Yu. and Filosofov N. G. *Semiconductors* **51**(1), 110–114 (2017).
14. Sinuo Chen, Lichun Wang, Chunlan Zhou and Jinli Yang, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* **15**, 062701 (2023).
15. FeiFan Yang, WenBo Peng, YiJian Zhou, Rong Li, GuoJiao Xiang, JinMing Zhang YueLiu, JiaHui Zhang, Yang Zhao and Hui Wang, *Vacuum* **198**, 110876 (2022).
16. Jun-A Kim, Jung-Hwan Park, Sang-Geon Park, Chang-Sik Son, Young-Guk Son and Dong-Hyun Hwang, *Crystals* **13**, 643 (2023).
17. Qiang Yu, Huwei Zhao, Yuhong Zhao and Yue Zhao, *Physica B: Condensed Matter*. **690**, 416253 (2024).

Об авторах

Саенко Александр Викторович, доцент, к.т.н., Южный федеральный университет (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42). E-mail: avsaenko@sfedu.ru SPIN-код РИНЦ 3925-7237, Author ID 726573

Бильик Герман Евгениевич, ведущий инженер-конструктор, Южный федеральный университет (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42). E-mail: bilyk@sfedu.ru

Хубежов Сослан Арсенович, научный сотрудник, к.т.н., Харбинский инженерный университет (266000, Китай, г. Циндао, ул. Наньтун, 145). E-mail: soslan.khubezhov@gmail.com SPIN-код РИНЦ 4782-2452, Author ID 755773

Козюменко Константин Алексеевич, лаборант-исследователь, Южный федеральный университет (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42). E-mail: koziumenko@sfedu.ru

Смирнов Владимир Александрович, заведующий кафедрой, к.т.н., доцент, Южный федеральный университет (344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42). E-mail: vasmirnov@sfedu.ru