

УДК 537.9

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Вакулов Д.Е., Вакулов З.Е., Замбург Е.Г., Ивонин М.Н., Шумов А.В.

ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет»

Ростов-на-Дону, e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com

Получены прозрачные проводящие нанокристаллические пленки на основе оксида цинка. Проведены исследования влияния расстояния мишень-подложка при импульсном лазерном осаждении на электрофизические параметры нанокристаллических пленок ZnO. Установлено, что с увеличением расстояния мишень-подложка подвижность электронов в полученных нанокристаллических пленках ZnO уменьшается от 24 до 13 см²/В·с; удельное сопротивление увеличивается в пределах от $2,4 \cdot 10^{-3}$ до $5,3 \cdot 10^{-3}$ Ом·см; шероховатость уменьшается от 3,2 до 2,7 нм; средний диаметр зерна лежит в диапазоне от 76 до 82 нм. Полученные нанокристаллические пленки ZnO имеют малую шероховатость поверхности и низкое электрическое сопротивление в достаточно широком диапазоне технологических режимов, необходимых для создания прозрачных проводящих покрытий. Результаты исследований могут быть использованы при разработке чувствительных элементов сенсорных устройств, оптоэлектронных приборов, солнечных элементов, фотогальванических преобразователей, транзисторных структур на основе прозрачных проводящих пленок ZnO.

Ключевые слова: нанотехнологии, прозрачные проводящие покрытия, нанокристаллические пленки, оксид цинка, импульсное лазерное осаждение

FORMING TRANSPARENT CONDUCTIVE NANOCRYSTALLINE ZNO FILMS BY PULSED LASER DEPOSITION

Vakulov D.E., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Ivonin M.N., Shumov A.V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Southern Federal University», Rostov-on-Don, e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com

We have developed a technology of producing transparent conductive nanocrystalline films of ZnO. Experimental researching were carried out in the module of pulsed laser deposition at multifunctional ultrahigh nanotechnological facilities NanoFab STC-9. Exploration of the surface morphology of ZnO films used Probe NanoLaboratory NTEGRA Vita, and Hall-effect measurements for measure electrical parameters. We have done analysis of the relationship electrical and morphological characteristics of target-substrate distance at pulsed laser deposition. It was found that increasing target-substrate distance facilitates reducing electron mobility and roughness of surface in the nanocrystalline ZnO films; resistivity increase with augmentation this distance. Transparent conductive nanocrystalline ZnO films which have been obtained, have a low surface roughness and electrical resistance in a wide range of process condition required to create transparent conductive coverage. The researching results can be used to develop sensors, optoelectronic devices, solar cells, photovoltaic inverters, transistor structures based on transparent conductive films of ZnO.

Keywords: nanotechnology, transparent conductive oxides, ZnO, nanocrystalline films, pulsed laser deposition (PLD)

Оксид цинка является одним из наиболее перспективных материалов для создания приборов наноэлектроники и наносистемной техники. Интерес обусловлен рядом электрофизических свойств ZnO: высокой температурой плавления и теплопроводностью, фоточувствительностью, пьезо- и пирозэффектом, широкой запрещенной зоной, большой экситонной энергией, химической стабильностью, биологической совместимостью, что позволяет использовать ZnO в качестве прозрачного проводящего оксидного материала. Оксид цинка обладает низким удельным сопротивлением и хорошими оптическими свойствами и является одним из самых перспективных материалов для создания прозрачных проводящих покрытий [5].

Задача получения покрытий с высокой проводимостью при низких температурах подложки (ниже 300°C) и без последую-

щей операции отжига является актуальной, например, при изготовлении многослойных покрытий солнечных батарей (так как при низкой температуре замедляются процессы взаимной диффузии слоев), или при напылении проводящих покрытий на полимерные подложки при температурах, не превышающих температуру размягчения материала.

Однако разработанные к настоящему времени способы термического испарения обеспечивают получение прозрачных проводящих пленок на основе ZnO с низким удельным сопротивлением только при температуре выше температуры размягчения полимерных подложек, что ограничивает область их возможного применения [4].

Целью работы является получение прозрачных проводящих нанокристаллических пленок на основе оксида цинка методом импульсного лазерного осаждения.

Материалы и методы исследования

Одним из наиболее перспективных методов получения наноструктурированных пленок оксидов является метод импульсного лазерного осаждения (ИЛО) [2]. В ходе ИЛО происходит распыление мишени в вакууме импульсами лазера и осаждение ма-

териала мишени на подложку, как показано на рис. 1. Достоинствами этого метода является простота реализации, высокая скорость напыления, одинаково хорошее испарение всех химических элементов, содержащихся в мишени [3]. При испарении мишеней при определенных условиях можно получить пленку необходимого стехиометрического состава.

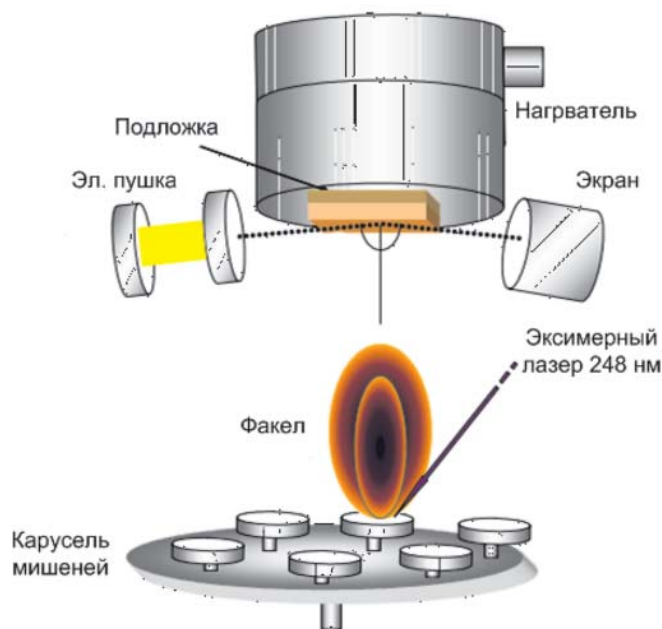


Рис. 1. Схема метода ИЛО

Электрофизические свойства нанокристаллических пленок оксида цинка зависят от энергии испаренных частиц, которая регулируется изменением расстояния мишень-подложка при ИЛО [1].

Экспериментальные исследования проводились в модуле импульсного лазерного осаждения многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (ЗАО «НТ – МДТ», Зеленоград), представленного на рис. 2.



Рис. 2. Модуль ИЛО многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9

Для исследований морфологии поверхности пленок ZnO использовалась Зондовая Нанолaborатория NTEGRA Vita (ЗАО «НТ – МДТ», Зеленоград). Измерения электрических параметров проводились с помощью системы измерений эффекта Холла HMS-3000 (EcopiaCorp., Корея).

Камера модуля импульсного лазерного осаждения откачивалась с помощью турбомолекулярного насоса до давления $1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Осаждение ZnO проводилось на ситалловые подложки размером $1,5 \times 1,5$ см. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени

ZnO составляла 2 Дж/см^2 , длина волны лазерного излучения 248 нм, длительность импульса 20 нс. Расстояние мишень-подложка изменялось в диапазоне 75–135 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного эксперимента получены нанокристаллические пленки n-ZnO, АСМ-изображения которых представлены на рис. 3.

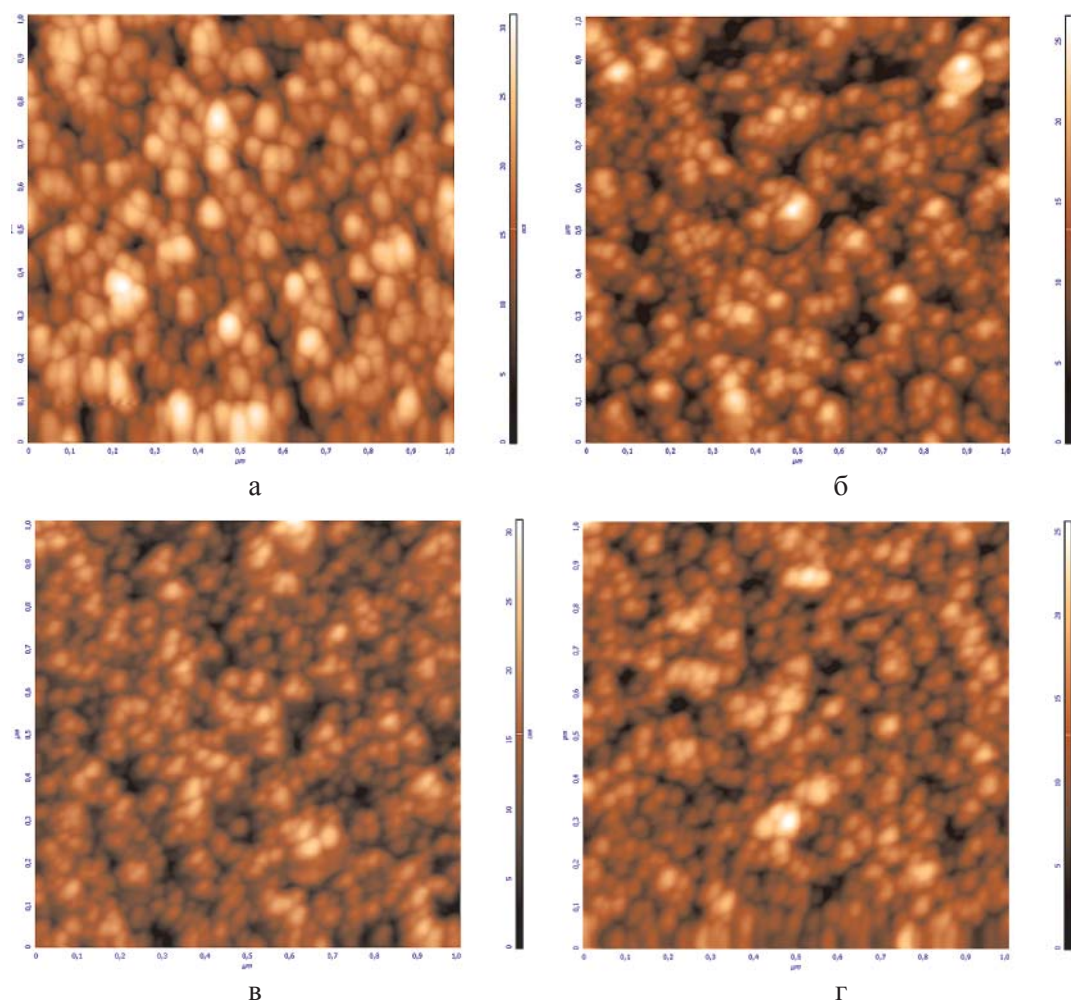


Рис. 3. АСМ-изображения нанокристаллических пленок ZnO, полученных при расстоянии мишень-подложка 75 мм (а), 85 мм (б), 95 мм (в), 135 мм (г)

Установлено, что с увеличением расстояния мишень-подложка подвижность электронов в полученных нанокристаллических пленках ZnO уменьшается от 24 до $13 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; удельное сопротивление увеличивается в пределах от $2,4 \cdot 10^{-3}$ до $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; шероховатость уменьшается от 3,2 до 2,7 нм; средний диаметр зерна лежит в диапазоне от 76 до 82 нм. Данные зависимости представлены на рис. 4. Таким образом, параметры полученных прозрачных проводящих нанокристаллических пленок ZnO являются стабильны-

ми в широком диапазоне технологических режимов.

Полученные нанокристаллические пленки ZnO имеют малую шероховатость поверхности и низкое электрическое сопротивление в достаточно широком диапазоне технологических режимов, необходимых для создания прозрачных проводящих покрытий. Таким образом, при совмещении технологии создания структур с использованием прозрачных проводящих покрытий на основе ZnO с кремниевой технологией снижаются требования к выбору режимов.

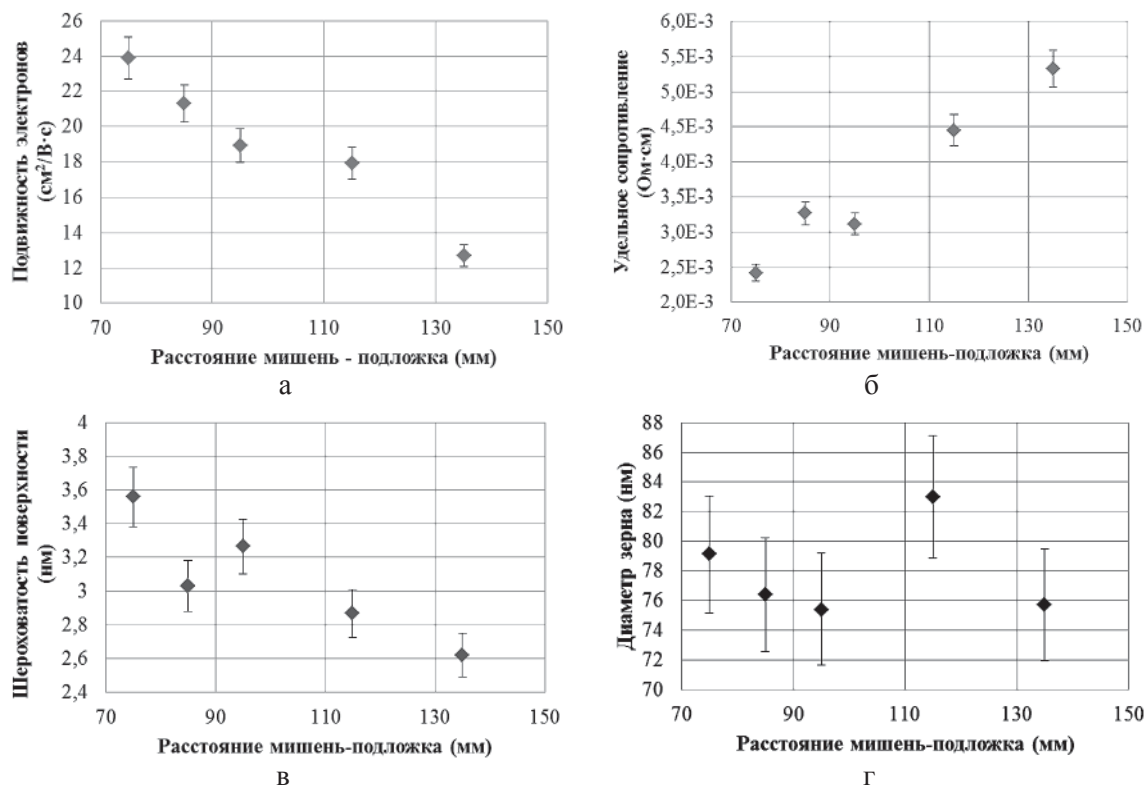


Рис. 4. Зависимость подвижности электронов (а), удельного сопротивления (б), шероховатости поверхности (в), диаметра зерна (г) нанокристаллических пленок ZnO от расстояния мишень-подложка

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы при разработке чувствительных элементов сенсорных устройств, оптоэлектронных приборов, солнечных элементов, фотовольтаических преобразователей, транзисторных структур на основе прозрачных проводящих пленок ZnO.

Работа выполнена при поддержке государственных соглашений № 14. A18.21.0107, № 12-08-90045/12, № 14. A18.21.0126, № 14.A18.21.0923, № 14. A18.21.0933, № 14.A18.21.0900, № 14. A18.21.0887, № 14.A18.21.1206 в рамках проектов РФФИ и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 / О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.В. Михайличенко, В.А. Смирнов, В.В. Пташник, М.С. Солодовник, А.А. Федотов, Е.Г. Замбург, В.С. Климин, О.И. Ильин, А.Л. Громов, А.В. Рукомойкин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 114. – № 1. – С. 109–116.
2. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. Эллионные зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165–175.
3. Caricato A.P., Creti A., Luchesa A., Lomascolo M., Martino M., Rella R., Valerini D. Zinc Oxide Nanostructured Layers for Gas Sensing Applications // Laser Physics. – 2011. – Т. 21. – № 3. – P. 588–597.

4. May-Smith T. Pulsed laser deposition of thick multilayer garnet crystal films for waveguide laser devices // Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. University of Southampton. – 2005. – P. 31.

5. Zhong Lin Wang. ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology // Materials Science and Engineering R. – 2009. – № 64. – P. 33–71.

References

1. Ageev O.A., Kolomijcev A.S., Mihajlichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomojkin A.V., Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2011, T. 114, no. 1, pp. 109–116.
2. Konoplev B.G., Ageev O.A., Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki, 2008, no. 12 (89), pp. 165–175.
3. Caricato A. P., Creti A., Luchesa A., Lomascolo M., Martino M., Rella R., Valerini D., Laser Physics, 2011, T. 21, no. 3, pp. 588–597.
4. May-Smith T., Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. University of Southampton, 2005, p.31.
5. Zhong Lin Wang, Materials Science and Engineering R., 2009, no. 64, pp. 33–71

Рецензенты:

Жорник А.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии, Физико-математического факультета, ФГБОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт имени А.П. Чехова, г. Таганрог;

Рындин Е.А., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН), г. Ростов-на-Дону.

Работа поступила в редакцию 16.10.2012.