

## Структурные, оптические и термоэлектрические свойства тонких ZnO : Al пленок, полученных атомно-слоевым осаждением

© И.А. Тамбасов<sup>1</sup>, М.Н. Волочаев<sup>1</sup>, А.С. Воронин<sup>2</sup>, Н.П. Евсевская<sup>1,3</sup>, А.Н. Масюгин<sup>4</sup>,  
А.С. Александровский<sup>1,5</sup>, Т.Е. Смолярова<sup>2,5</sup>, И.В. Немцев<sup>1</sup>, С.А. Лященко<sup>1</sup>,  
Г.Н. Бондаренко<sup>3</sup>, Е.В. Тамбасова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Красноярский научный центр, ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Институт химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева,  
Красноярск, Россия

<sup>5</sup> Сибирский федеральный университет,  
Красноярск, Россия

E-mail: tambasov\_igor@mail.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 15 апреля 2019 г.

Принята к публикации 17 апреля 2019 г.

Тонкие пленки оксида цинка легированного алюминием были выращены с помощью атомно-слоевого осаждения при температуре 200°C. С помощью рентгеновской дифракции было обнаружено, что тонкие ZnO : Al пленки имеют пики от плоскостей (100), (002), (110) и (201) гексагональной фазы ZnO. Плоскости (101) и (102) были обнаружены также с помощью электронной дифракции. Тонкие ZnO : Al пленки растут гладкими со среднеквадратичной шероховатостью  $R_q$  равной 0.33 nm и характерными размерами нанокристаллита  $\sim 70$  и  $\sim 15$  nm без дополнительных фаз связанных с алюминием или оксидами алюминия. Пропускание на длине волны 550 nm с учетом подложки составляло  $\sim 96\%$ . Были найдены коэффициенты преломления и поглощения тонких ZnO:Al пленок в диапазоне длин волн 250–900 nm. Максимальные значения для коэффициентов преломления и поглощения были 2.09 на длине волны 335 nm и 0.39 на длине волны 295 nm соответственно. Оптическая ширина запрещенной зоны составляла 3.56 eV. Удельное сопротивление, коэффициент Зеебека и фактор мощности тонких ZnO:Al пленок составляли  $\sim 1.02 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ ,  $\sim -60 \mu\text{V/K}$  и  $340 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  при комнатной температуре соответственно. Максимальный фактор мощности достигал  $620 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  при температуре 200°C.

**Ключевые слова:** атомно-слоевое осаждение, тонкие пленки, легированный алюминием оксид цинка, структурные и оптические свойства, термоэлектрические свойства.

DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48274.455

### 1. Введение

В настоящее время широко исследуются проводящие прозрачные оксиды, такие как  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO,  $\text{TiO}_2$  и др. [1–6]. Это связано с тем, что указанные материалы обладают одновременно прозрачностью ( $\sim 90\%$ ) в видимом диапазоне и способностью проводить электрический ток [1,5,6]. В большинстве случаев проводящие оксиды используются в виде тонких пленок толщиной от несколько десятков до сотен нанометров.

Представленные оксиды применяются при изготовлении тонких дисплеев, органических и неорганических светоизлучающих диодов, солнечных батарей, тонкопленочных транзисторов, газовых сенсоров и т.д. [1,7–11]. Эти оксиды обычно легируют донорными атомами для увеличения электрической проводимости за счет увеличения концентрации электронов [12]. На сегодняшний день одним из самых промышленно востребованных

проводящих оксидов является  $\text{In}_2\text{O}_3$  легированный атомами Sn (ITO) [13]. Однако постоянный рост цен на индий стимулирует поиск и исследования альтернативных материалов, по своим электрическим и оптическим свойствам не уступающим ITO. Одним из главных альтернативных материалов является оксид цинка легированный алюминием (ZnO:Al) [14].

В настоящее время существуют различные методы синтеза прозрачных проводящих оксидов, включающие: термическое вакуумное осаждение, магнетронное распыление, импульсно-лазерное осаждение, газофазное осаждение, атомно-слоевое осаждение, золь-гель метод и др. [15] Традиционно, для активации донорной примеси используется нагрев подложки до 500°C [16]. В условиях развития оптоэлектроники, микроэлектроники и нанoeлектроники на полимерных подложках, которые чувствительны к высоким температурам обработки, появляются определенные технологические трудности

при синтезе тонких пленок на термочувствительных подложках [10,16]. Поэтому снижение температурной обработки при синтезе тонких пленок является одной из прикладных задач.

Проводящие прозрачные оксиды в настоящее время также рассматриваются в качестве термоэлектрических материалов [17]. Ключевыми свойствами являются наличие высокой электронной проводимости  $\sigma$  ( $S \cdot m^{-1}$ ), наличие высокого коэффициента Зеебека  $S$  ( $V \cdot K^{-1}$ ), а также наименьшего коэффициента теплопроводности  $\kappa$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) в термоэлектрических материалах [18]. Общей интегральной характеристикой термоэлектрических материалов является термоэлектрическая добротность  $ZT = (S^2\sigma/\kappa)T$ , где  $T$  — средняя температура между горячей и холодной стороной термоэлектрического преобразователя. Однако, как показали исследования, проводящие прозрачные оксиды с высокими термоэлектрическими свойствами должны быть наноструктурированными [17]. Это связано с тем, что за счет структурных особенностей можно изменять термоэлектрическую добротность [19–21]. Например, важным моментом в наноструктурированных термоэлектрических материалах является перенос тепла. Структурные особенности могут выступать как центры рассеивания тепловых фононов и тем самым может снижаться коэффициент теплопроводности [22]. В конечном счете, за счет снижения коэффициента теплопроводности увеличивается термоэлектрическая добротность [22].

Таким образом, существует возможность реализации нескольких функциональных свойств, таких как электропроводность, высокая оптическая прозрачность и термоэлектрические свойства в рамках одного материала. Тонкие пленки прозрачных проводящих оксидов, обладающие вышеперечисленными свойствами, могут быть использованы для прозрачной электроники, в качестве источников питания, позиционированных на прозрачном носителе [23]. Работы, связанные с созданием альтернативных прозрачных проводящих материалов с помощью низкотемпературных методов и исследования их физических свойств, в том числе термоэлектрических свойств, являются актуальными.

В данной работе представлены результаты синтеза тонких ZnO : Al пленок с помощью атомно-слоевого осаждения. Кроме этого, представлены исследования структурных, оптических и термоэлектрических свойств тонких ZnO : Al пленок.

## 2. Методика получения и исследования пленок

Тонкие ZnO : Al пленки были выращены с помощью атомно-слоевого осаждения на установке Picosun R200. Монокристаллический кремний и дисплейное стекло производства AGC использовались как подложки. В качестве прекурсоров использовались диэтилцинк  $Zn(C_2H_5)_2$  (чистота 99.999%), триметилалюми-

ний  $Al(CH_3)_3$  (чистота 99.999%) и водяной пар  $H_2O$  деионизированной воды. В качестве газа-носителя использовался азот  $N_2$  высокой чистоты 99.9999%. Для легирования во время роста использовалась следующая методика. На каждые 20 циклов роста  $Zn(C_2H_5)_2 + H_2O$  проводился 1 цикл роста  $Al(CH_3)_3 + H_2O$ . Таким образом, максимальное легирование составляло порядка 5 at% Al. Длительность импульса каждого газового прекурсора была 0.1 s. Длительность каждой продувки азотом камеры после прекурсора составляла 4 s. Температура подложек при росте тонких ZnO : Al пленок была 200°C. Детальное описание методики выращивания и легирования тонких ZnO пленок можно найти в работах [14,24,25].

Морфология поверхности тонких пленок определялась с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S5500 и атомно-силового микроскопа DPN 5000 производства Nanoink. Для оценки толщины и исследования микроструктуры тонких ZnO : Al пленок использовался просвечивающий электронный микроскоп Hitachi TM7700 при ускоряющем напряжении 100 kV в режиме съемки поперечного сечения [26,27]. Поперечные срезы изготавливались методом фокусируемого ионного пучка на установке Hitachi FB2100 с жидкометаллическим источником ионов  $Ga^+$  при ускоряющем напряжении 40 kV. Заключительная ионно-плазменная полировка была проведена на установке Unimill pro 4 (Linda Technoorg) ионами  $Ar^+$  при ускоряющем напряжении 2 kV. Рентгеноструктурный анализ полученных пленок проводился на дифрактометре ДРОН-4-07 ( $CuK_\alpha$ -излучение).

Оптические свойства тонких пленок исследовались при помощи спектрометра Shimadzu UV-3600 и спектрального эллипсометра Эллипс-1891.

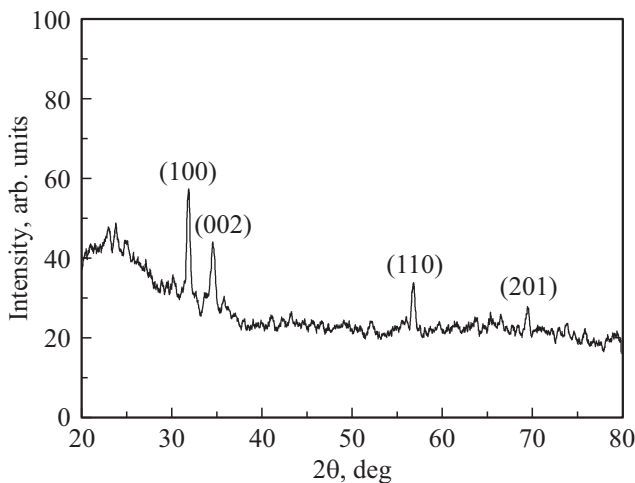
Контактные серебряные площадки были изготовлены с помощью вакуумной установки k575x Emitech. Толщина контактов была  $\sim 500$  нм. Измерения термоэлектрических свойств (коэффициента Зеебека и электрического сопротивления) тонких пленок от комнатной температуры до 200°C были проведены на установке собственной разработки. Разработанная установка состоит из термостата, прецизионного источника тока Keithley 2400, специально разработанного держателя для образца (задает градиентный нагрев образца), 2-х термодатчиков К-типа, а также 24-битного аналогово-цифрового преобразователя LTR114 на базе крейта LTR-EU-2 фирмы „Л Кард“ (Россия). Подробное описание установки и методики проведения термоэлектрических измерений можно найти в работе [28].

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

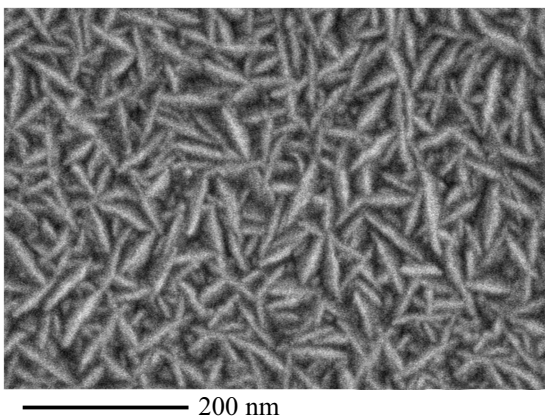
Рентгеновская дифракция была использована для определения фазового состава полученных тонких ZnO : Al пленок. На рис. 1 представлена рентгеновская

дифрактограмма тонкой ZnO : Al пленки. Как видно из рис. 1, на дифрактограмме присутствуют только четыре пика. Эти пики соответствуют гексагональной фазе (пространственная группа  $P6_3mc$ ) ZnO. Рентгеновские пики соответствовали плоскостям (100), (002), (110) и (201). На рентгеновской дифрактограмме не обнаружено пиков, связанных с алюминием или оксидами алюминия. Возможно это связано с тем, что произошло легирование ZnO алюминием. Для оценки среднего размера нанокристаллитов  $d$  использовалась формула Шеррера  $d = 0.89\lambda / \Delta(2\theta) \cos(\theta)$ , где  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $\Delta(2\theta)$  длина волны, брегговский угол и полная ширина на половине высоты дифракционного пика (в радианах) соответственно. В рамках данной оценки средний размер нанокристаллитов составлял  $\sim 20$  nm.

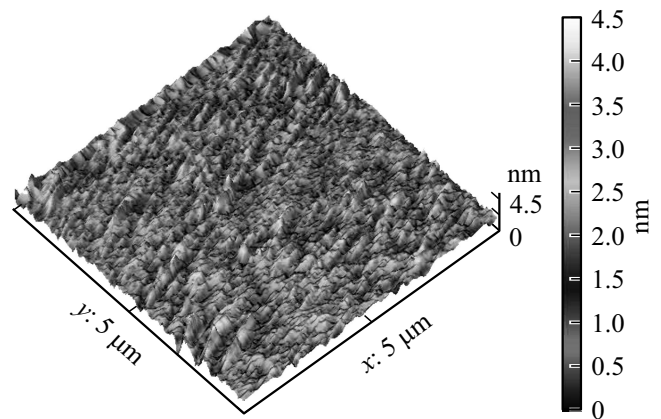
Сканирующая электронная микроскопия показала (рис. 2), что поверхность тонких ZnO : Al пленок имеет наноструктурированную морфологию, состоящую из нанокристаллитов типа „нанопалочек“. Используя рис. 2 и программу ImageJ, были проанализированы 100 на-



**Рис. 1.** Рентгеновская дифракция 146 nm тонкой пленки оксида цинка, легированного алюминием.



**Рис. 2.** Изображение поверхности ZnO : Al пленки, полученное при помощи сканирующей электронной микроскопии.

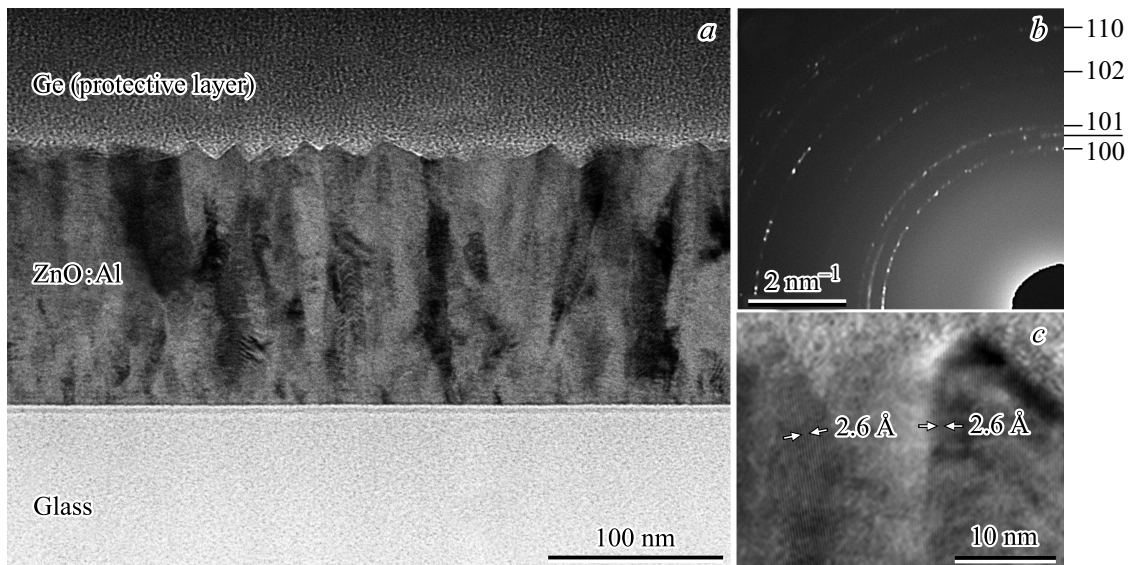


**Рис. 3.** Изображение поверхности тонкой пленки оксида цинка, легированного алюминием, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии.

нокристаллитов по их длине и ширине. Характерные размеры длины и ширины были  $\sim 70$  и  $\sim 15$  nm соответственно. Здесь стоит отметить, что полученный размер ширины нанокристаллита  $\sim 15$  nm достаточно хорошо сопоставим со средним размером  $\sim 20$  nm, полученным по формуле Шеррера.

Поверхность тонких ZnO : Al пленок была исследована с помощью атомно-силовой микроскопии. На рис. 3 представлено изображение поверхности тонкой ZnO : Al пленки. Стоит отметить, что тонкие ZnO : Al пленки выращенные атомно-слоевым осаждением являются достаточно гладкими со среднеквадратичной шероховатостью  $R_q$  равной 0.33 nm.

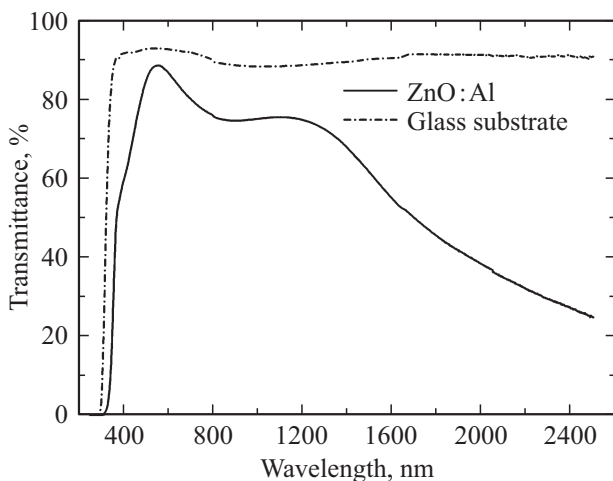
Для оценки микроструктуры и толщины тонких ZnO : Al пленок была использована просвечивающая электронная микроскопия (рис. 4). На рис. 4, а представлена тонкая ZnO : Al пленка на стеклянной подложке в поперечном сечении. Оценка на основе рис. 4, а показала, что толщина пленки была  $\sim 146$  nm. На рис. 4, б представлена электронограмма тонкой ZnO : Al пленки. Представленной электронограмме (рис. 4, б) соответствуют плоскости (100), (002), (101), (102) и (110). Плоскости (100), (002), (110) и (201) были обнаружены как рентгеновской дифракцией, так и с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Стоит отметить, что плоскость (201) присутствует на электронограмме. Рефлексы от этой плоскости располагается далеко от рефлексов остальных плоскостей ZnO : Al на электронограмме. На электронограмме были найдены также плоскости (101) и (102), которые не были найдены с помощью рентгеноструктурного анализа. Возможно, это связано с тем, что исследование просвечивающей электронной микроскопией проводилось перпендикулярно плоскости роста тонкой ZnO : Al пленки. С другой стороны, просвечивающая электронная микроскопия является более чувствительным методом анализа по сравнению с рентгеновской дифракцией. Здесь стоит отметить, что пики, связанные с алюминием или окси-



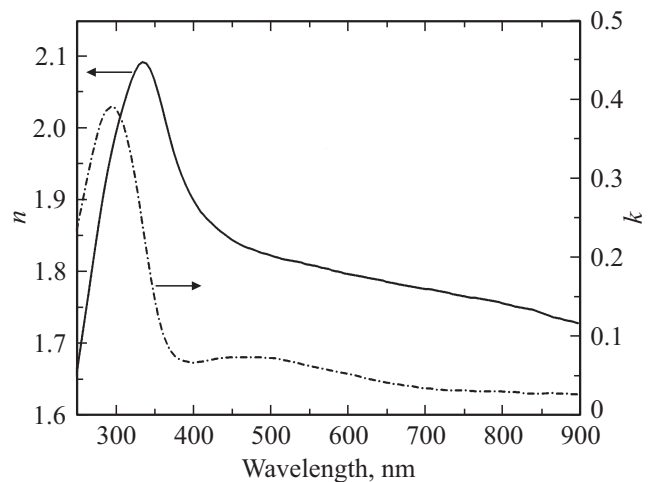
**Рис. 4.** Общее изображение тонкой ZnO : Al пленки на стеклянной подложки в поперечном сечении (а), соответствующая электронограмма (b) и изображение отдельных кристаллитов (с), полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

дами алюминия, также не были найдены. На рис. 4, с представлено изображение высокого разрешения отдельных ZnO : Al кристаллитов. На рис. 4, с отчетливо видна плоскость (002) с межплоскостным расстоянием 0.26 nm. Таким образом, тонкие ZnO : Al пленки растут гладкими и наноструктурированными без дополнительных фаз, связанных с алюминием или оксидами алюминия.

На рис. 5 представлена зависимость оптического пропускания тонкой ZnO : Al пленки от длины волны в диапазоне 200–2500 nm. Как видно из рис. 5, тонкие ZnO : Al пленки достаточно хорошо пропускают видимый свет. Пропускание на длине волны 550 nm с учетом подложки составило ~ 96%.



**Рис. 5.** Спектральная зависимость пропускания тонкой ZnO : Al пленки.



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента преломления и поглощения от длины волны для тонкой ZnO : Al пленки на кремниевой подложке.

На рис. 6 представлена спектральная зависимость коэффициента преломления  $n$  и поглощения  $k$  для тонкой ZnO : Al пленки выращенной на кремниевой подложке. Как видно из рис. 6, максимальное значение для коэффициента преломления составляет 2.09 на длине волны 335 nm. Для коэффициента поглощения максимальное значение составляло 0.39 на длине волны 295 nm. В целом, спектральные коэффициенты преломления и поглощения достаточно хорошо согласуются с данными для тонких ZnO : Al пленок [29,30]. Спектральная зависимость коэффициента поглощения была использована для оценки оптической ширины запрещенной зоны тонких

ZnO : Al пленок. Оптическая ширина запрещенной зоны была найдена согласно формулам

$$(\alpha\hbar\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности,  $E_g$  — оптическая ширина запрещенной зоны,  $h\nu$  — энергия фотона и  $\lambda$  — соответствующая длина волны. Значение оптической ширины запрещенной зоны было получено путем экстраполяции линейной части зависимости  $(\alpha\hbar\nu)^2$  до пересечения с осью абсцисс [29,30]. Полученное значение  $E_g = 3.56$  eV сопоставимо с значением оптической ширины запрещенной зоны для тонких ZnO : Al пленок со схожим уровнем легирования [29].

Для определения термоэлектрической добротности материалов важным является исследование удельного сопротивления  $\rho$  в зависимости от температуры. По этой причине было проведено исследование поверхностного сопротивления тонких ZnO : Al пленок от комнатной температуры до 200°C. Пересчет из поверхностного в удельное сопротивление производился с учетом всей толщины пленки. Зависимость удельного сопротивления тонкой ZnO : Al пленки от температуры представлена на рис. 7. Здесь стоит отметить, что значение удельного сопротивления тонких ZnO : Al пленок было  $\sim 1.02 \cdot 10^{-3}$  Ohm · cm при комнатной температуре. Как видно из рис. 7 удельное сопротивление уменьшается при увеличении температуры. Такая зависимость характерна для полупроводниковых материалов. В работах [14,31,32] наблюдалась схожая зависимость удельного сопротивления тонких ZnO : Al пленок от температуры.

На рис. 8 представлена температурная зависимость коэффициента Зеебека тонкой ZnO : Al пленки. Коэффициент Зеебека был равен  $\sim -60$   $\mu$ V/K при комнатной

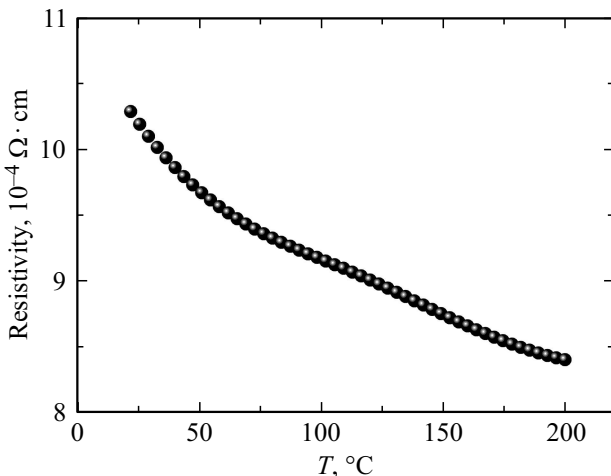


Рис. 7. Температурная зависимость удельного сопротивления тонкой ZnO : Al пленки.

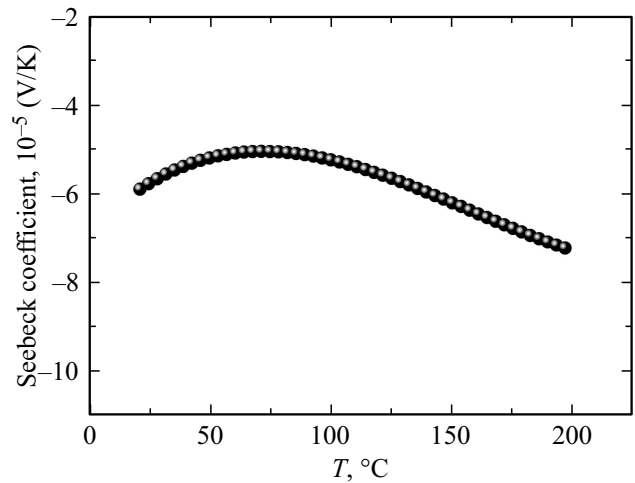


Рис. 8. Зависимость коэффициента Зеебека тонкой ZnO : Al пленки от температуры.

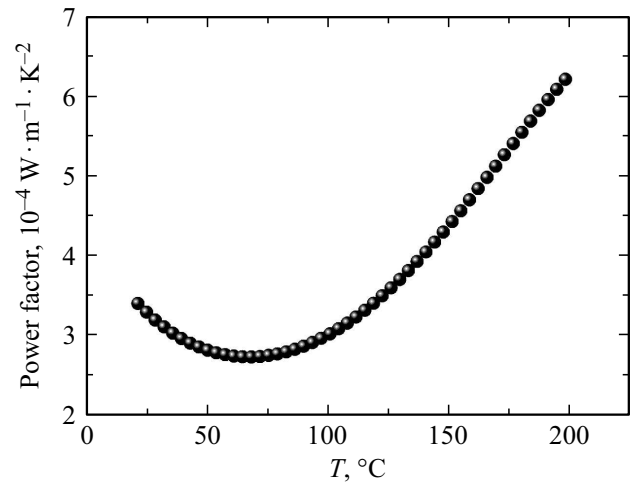


Рис. 9. Температурная зависимость фактора мощности тонкой ZnO : Al пленки.

температуре. Коэффициент Зеебека начинал уменьшаться по абсолютному значению при повышении температуры. Минимальное абсолютное значение коэффициента Зеебека  $\sim 50$   $\mu$ V/K наблюдалось при температуре 70°C. При росте температуры, начиная с 70°C, абсолютное значение коэффициента Зеебека начинало увеличиваться. Максимальное абсолютное значение коэффициента Зеебека достигало  $\sim 72$   $\mu$ V/K при температуре 200°C. Полученные значения коэффициента Зеебека соответствуют значениям, измеренным ранее для тонких ZnO : Al пленок [31–33], полученных различными методами.

Одной из важных интегральных характеристик термоэлектрических материалов является фактор мощности  $PF$  ( $\mu$ W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-2</sup>), который определяется по следующей формуле:

$$PF = S^2\sigma. \quad (3)$$

Мы использовали формулу (3), где электропроводность определялась как  $\sigma = 1/\rho$ , чтобы построить температурную зависимость фактора мощности для тонкой ZnO : Al пленки, как показано на рис. 9. Из рис. 9 видно, что фактор мощности тонкой ZnO : Al пленки снижался при повышении температуры примерно до  $\sim 70^\circ\text{C}$  с  $\sim 340$  до  $\sim 270 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ . Однако при дальнейшем увеличении температуры фактор мощности начинал увеличиваться. Максимальный фактор мощности был равен  $620 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  при температуре  $200^\circ\text{C}$ . По сравнению с другими проводящими оксидами [17], образцы тонких ZnO : Al пленок показывали достаточно высокий фактор мощности.

Таким образом, представленные в настоящей работе исследования тонких ZnO : Al пленок могут быть использованы для разработки оптически прозрачных тонкопленочных термоэлектрических преобразователей. Кроме того, благодаря своим оптоэлектронным свойствам, полученные тонкие ZnO : Al пленки могут быть использованы в качестве тонкопленочных прозрачных электродов.

#### 4. Заключение

Тонкие ZnO : Al пленки были выращены с помощью атомно-слоевого осаждения на стеклянных и кремниевых подложках при температуре  $200^\circ\text{C}$ . Рентгеновская и электронная дифракция показала, что тонкие пленки состоят из гексагональной фазы ZnO. На рентгеновской дифрактограмме и электронограмме не обнаружено пиков, связанных с алюминием или оксидами алюминия. Поверхность тонких ZnO : Al пленок имеет наноструктурированную морфологию с характерными размерами нанокристаллита  $\sim 70$  и  $\sim 15$  nm. Было обнаружено, что тонкие ZnO : Al пленки являются достаточно гладкими со среднеквадратичной шероховатостью  $R_q$  равной  $0.33$  nm. Пропускание на длине волны  $550$  nm с учетом подложки составило  $\sim 96\%$ . Кроме этого, были найдены коэффициенты преломления и поглощения тонких ZnO : Al пленок в диапазоне длин волн  $250$ – $900$  nm. Оптическая ширина запрещенной зоны составляла  $3.56$  eV.

Удельное сопротивление и коэффициент Зеебека тонких ZnO : Al пленок при комнатной температуре были  $\sim 1.02 \cdot 10^{-3} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  и  $\sim -60 \mu\text{V/K}$  соответственно. Максимальное абсолютное значение коэффициента Зеебека  $\sim 72 \mu\text{V/K}$  и максимальный фактор мощности равный  $620 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$  были при температуре  $200^\circ\text{C}$ .

Тонкие ZnO : Al пленки выращенные с помощью атомно-слоевого осаждения могут быть использованы для разработки оптически прозрачных термоэлектрических преобразователей, а также могут быть использованы в качестве тонкопленочных прозрачных электродов.

#### Благодарности

Электронно-микроскопические исследования выполнены на оборудовании центра коллективного пользова-

ния ФИЦ КНЦ СО РАН. Благодарим Ф.А. Барона (ФИЦ КНЦ СО РАН) за предоставленное время для работы на ростовом оборудовании и критическое обсуждение деталей технологического процесса изготовления образцов.

#### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-10079).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] X.G. Yu, T.J. Marks, A. Facchetti. *Nature Mater.* **15**, 383 (2016).
- [2] I.A. Tambasov, V.G. Maygkov, A.S. Tarasov, A.A. Ivanenko, L.E. Bykova, I.V. Nemtsev, E.V. Eremin, E.V. Yozhikova. *Semicond. Sci. Technol.* **29**, 082001 (2014).
- [3] I.A. Tambasov, V.G. Myagkov, A.A. Ivanenko, I.V. Nemtsev, L.E. Bykova, G.N. Bondarenko, J.L. Mihlin, I.A. Maksimov, V.V. Ivanov, S.V. Balashov, D.S. Karpenko. *Semiconductors* **47**, 569 (2013).
- [4] I.A. Tambasov, V.G. Myagkov, A.A. Ivanenko, L.E. Bykova, E.V. Yozhikova, I.A. Maksimov, V.V. Ivanov. *Semiconductors* **48**, 207 (2014).
- [5] C.G. Granqvist. *Sol. Energy Mater. Sol. Cel.* **91**, 1529 (2007).
- [6] P.D.C. King, T.D. Veal. *J. Phys.-Condens. Matter* **23**, 334214 (2011).
- [7] J. Keller, F. Chalvet, J. Joel, A. Aijaz, T. Kubart, L. Riekehr, M. Edoff, L. Stolt, T. Torndahl. *Prog Photovoltaics* **26**, 13 (2018).
- [8] E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins. *Adv. Mater.* **24**, 2945 (2012).
- [9] G. Korotcenkov. *Mater. Sci. Eng. B* **139**, 1 (2007).
- [10] M. Morales-Masis, F. Duzou, Q. Jeangros, A. Dabirian, H. Lifka, R. Gierth, M. Ruske, D. Moet, A. Hessler-Wyser, C. Ballif. *Adv. Funct. Mater.* **26**, 384 (2016).
- [11] Z. Szabo, Z. Baji, P. Basa, Z. Czigan, I. Barsony, H.Y. Wang, J. Volk. *Appl. Surf. Sci.* **379**, 304 (2016).
- [12] A. Klein, C. Korber, A. Wachau, F. Sauberlich, Y. Gassenbauer, S.P. Harvey, D.E. Proffit, T.O. Mason. *Materials* **3**, 4892 (2010).
- [13] O. Bierwagen. *Semicond. Sci. Technol.* **30**, 024001 (2015).
- [14] G. Luka, B.S. Witkowski, L. Wachnicki, R. Jakiela, I.S. Virt, M. Andrzejczuk, M. Lewandowska, M. Godlewski. *Mater. Sci. Eng. B* **186**, 15 (2014).
- [15] A. Stadler. *Materials* **5**, 661 (2012).
- [16] Y.L. Liu, Y.F. Li, H.B. Zeng. *J. Nanomater.* 196521 (2013).
- [17] G. Korotcenkov, V. Brinzari, M.H. Ham. *Crystals* **8**, 14 (2018).
- [18] G.J. Snyder, E.S. Toberer. *Nature Mater.* **7**, 105 (2008).
- [19] J. He, T.M. Tritt. *Science* **357**, 1369 (2017).
- [20] L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus. *Phys. Rev. B* **47**, 12727 (1993).
- [21] S. Ortega, M. Ibanez, Y. Liu, Y. Zhang, M.V. Kovalenko, D. Cadavid, A. Cabot. *Chem. Soc. Rev.* **46**, 3510 (2017).
- [22] W. Kim, J. Zide, A. Gossard, D. Klenov, S. Stemmer, A. Shakouri, A. Majumdar. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 045901 (2006).

- [23] C. Yang, D. Souchay, M. Kneiss, M. Bogner, M. Wei, M. Lorenz, O. Oeckler, G. Benstetter, Y.Q. Fu, M. Grundmann. *Nature Commun.* **8**, 16076 (2017).
- [24] T. Tynell, M. Karppinen. *Semicond. Sci. Technol.* **29**, 043001 (2014).
- [25] G. Luka, T.A. Krajewski, B.S. Witkowski, G. Wisz, I.S. Virt, E. Guziewicz, M. Godlewski. *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* **22**, 1810 (2011).
- [26] I.A. Tambasov, A.S. Tarasov, M.N. Volochaev, M.V. Rautskii, V.G. Myagkov, L.E. Bykova, V.S. Zhigalov, A.A. Matsynin, E.V. Tambasova. *Physica E*: **84**, 162 (2016).
- [27] V.G. Myagkov, L.E. Bykova, A.A. Matsynin, M.N. Volochaev, V.S. Zhigalov, I.A. Tambasov, Y.L. Mikhlin, D.A. Velikanov, G.N. Bondarenko. *J. Solid State Chem.* **246**, 379 (2017).
- [28] I.A. Tambasov, A.S. Voronin, N.P. Evsevskaya, M.N. Volochaev, Y.V. Fadeev, A.S. Krylov, A.S. Aleksandrovskii, A.V. Luk'yanenko, S.R. Abelyan, E.V. Tambasova. *Phys. Solid State* **60**, 2649 (2018).
- [29] E. Ochoa-Martinez, E. Navarrete-Astorga, J. Ramos-Barrado, M. Gabas. *Appl. Surf. Sci.* **421**, 680 (2017).
- [30] Q.H. Li, D.L. Zhu, W.J. Liu, Y. Liu, X.C. Ma. *Appl. Surf. Sci.* **254**, 2922 (2008).
- [31] M.H. Hong, H. Choi, D.I. Shim, H.H. Cho, J. Kim, H.H. Park. *Solid State Sci.* **82**, 84 (2018).
- [32] S. Saini, P. Mele, H. Honda, D.J. Henry, P.E. Hopkins, L. Molina-Luna, K. Matsumoto, K. Miyazaki, A. Ichinose. *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 060306 (2014).
- [33] J.T. Luo, Z.H. Zheng, G.X. Liang, F. Li, P. Fan. *Mater. Res. Bull.* **94**, 307 (2017).

*Редактор К.В. Емцев*