УДК 546.34.882.4.536.361

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОТРАНСПОРТНОГО СИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ КРИСТАЛЛОВ ZnO

© 2016 Э. П. Домашевская, С. В. Рябцев, Мин Чень, С. А. Ивков, С. В. Авилов

Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394018 Воронеж, Россия
e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 02.11.2016 г.

Аннотация. Целью работы являлось установление влияния температуры газотранспортного синтеза на морфологию кристаллов ZnO, выращенных в отсутствии специально созданных центров зародышеобразования в реактивной среде аргон/кислород. Температура тигля с цинком варьировалась в интервале от 700 до 1050 °С.

В результате исследований фазового состава, кристаллической структуры и морфологии конденсата установлено, что его характеристики зависят не только от скорости потока кислорода, но и от температуры синтеза. При прочих равных условиях именно температура синтеза определяет морфологию кристаллов ZnO. При температуре 700—800 °С формируются преимущественно стержни и балки, при температуре 900 °С образуются тетраподы, которые при 1000—1050 °С объединяются в цепочечные конгломераты при сохранении гексагональной сингонии и структурного типа вюрцита.

В свою очередь, морфологиия кристаллов ZnO, выращенных при разных температурах, влияет на перераспределение интенсивности между дифракционными отражениями от плоскостей (100) и (101), ориентированных по основным кристаллографическим направлениям. Для конденсата из балок и стержней самой интенсивной является первая линия дифрактограммы с индексами (100), тогда как от тетраподов и их конгламератов самой интенсивной становится третья линия дирактограммы с индексами (101).

Ключевые слова: оксид цинка, газотранспортный синтез, морфология кристаллов, балки, тетраподы, конгломераты, перераспределение интенсивностей основных дифракционных отражений.

ВВЕДЕНИЕ

Нано- и микроструктурированные широкозонные полупроводниковые оксиды обладают широким спектром электрических, оптических и магнитных свойств, вызывая активность мирового научного сообщества в получении, исследовании фундаментальных свойств, поиске практического применения различных форм этих материалов в виде нитей, лент, тетраподов, пружин и т. д.

Оксид цинка является одним из ключевых технологических материалов, который проявляет как полупроводниковые, так и пьезоэлектрические свойства. Этот прямозонный полупроводник обладает широкой запрещённой зоной ~3.37 эВ [1], имеет хорошую прозрачность, высокую электронную подвижность и сильную люминесценцию при комнатной температуре. Поэтому наиболее часто он применяется в лазерных диодах и светодиодах. Оксид цинка кристаллизуется в трёх фазах: гексагональный вюрцит, кубический сфалерит и редко встречаемая кубическая модификация NaCl. Наиболее распространенной является структура вюрцита гексагональной сингонии. Форма сфалерита может быть устойчивой при выращивании ZnO на подложках с кубической решёткой. ZnO со структурой типа NaCl можно получить при относительно высоких давлениях.

Отсутствие центра симметрии у гексагонаьной структуры типа вюрцита приводит к появлению у ZnO пьезоэлектрических и пироэлектрических свойств, позволяя моделировать активные элементы для нужд нанопьезоэлектроники [2]. Широкозонный оксид цинка является перспективным материалом n-типа электропроводности для создания полупроводниковых лазеров и светодиодов в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. При нагревании ZnO изменяет свой белый цвет при комнат-

ной температуре на жёлтый цвет. Объясняется это уменьшением ширины запрещённой зоны и сдвигом края в спектре поглощения из УФ-области в синюю.

Высокая энергия связи экситонов (60 мэВ) ZnO способна обеспечить эффективное экситонное излучение при комнатной температуре. Актуальной проблемой остается синтез p-типа ZnO. Несмотря на то, что есть сообщения об успешном получении таких структур, необходимо добиться стабильности и воспроизводимости результатов.

Вариация технологических методов выращивания наноструктурированного ZnO (золь-гель, гидротермальный, сольвотермальный, газотранспортный и др.) позволяет синтезировать разнообразные по структуре и свойствам нано- и микрокристаллы. Отличительной особенностью оксида цинка является хорошая электронная проводимость в сочетании с высокой химической стойкостью, что делает их перспективными для применения в газовых и жидкостных сенсорах, датчиках УФ излучения, электродах, материалах для автоэмиссионных катодов, элементах солнечных батарей [3—10].

Особенно привлекательны для этих целей нанонити и стержни ZnO, сочетающие совершенную кристаллическую структуру с развитой поверхностью. Гексагональная структура этих наностержней имеет выделенное направление роста, что позволяет легко получать структуры высокого качества с различным диаметром и высотой. Наностержни на подложке — самая выгодная модификация для создания светодиодов микроскопических размеров. В некоторых полевых транзисторах наностержни ZnO используются как проводящие каналы. Острые окончания наноигл ZnO многократно усиливают электрическое поле. Поэтому они могут использоваться как полевые эмиттеры. Широкий спектр электрооптических свойств ZnO используется при моделировании электронных устройств, начиная от тонкопленочных транзисторов и светодиодов, заканчивая изготовлением пьезоэлектрических наногенераторов на основе наностержней. Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) — это полупроводниковые соединения, соединяющие в себе как полупроводниковые, так и магнитные свойства. Они получаются допированием немагнитного полупроводника ZnO элементами переходных металлов (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni и Cu). Потенциальные возможности полупроводниковых спинтронных приборов, использующих спин электронов в дополнение к их заряду, намного превышают возможности традиционных полупроводниковых устройств. Оксид цинка также является перспективным материалом для создания магнитных полупроводников для приложений спинтроники.

Возможность использования различных экспериментальных методик синтеза разнообразных нано- и микроструктурных форм ZnO на любой подложке, как с использованием катализаторов роста, так и без, позволяет расширить потенциальный диапазон применения наноструктур ZnO.

Целью работы является исследование особенностей морфологии микрокристаллов ZnO, полученных методом газотранспортного синтеза при различных температурных режимах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методы получения и исследования кристаллов ZnO

Газотранспортный синтез кристаллов ZnO. Основой установок газотранспортного синтеза является печь с контролируемой газовой атмосферой. В настоящей работе использовалась модифицированная установка газотранспортного синтеза [11]. Отличие от стандартной конструкции заключалось в расположенной по центру печи кварцевой трубы дополнительной кварцевой трубки диаметром 8 мм и длиной около 100 мм.

Тигель с шихтой помещался в кварцевую трубку, которая, в свою очередь, располагалась в высокотемпературной зоне кварцевой трубы диаметром 20 мм. При такой конструкции установки количество получаемых кристаллов оказывается существенно большим. В качестве источника паров использовался металлический цинк высокой чистоты. Газотранспортной и реактивной средой служила смесь газов аргона с кислородом (скорость потока 40 см^2/мин), расход газа носителя не превышал (1—3)$\cdot 10^{-6}$ м^3/с.

Кристаллы синтезировались в отсутствии специально созданных центров зародышеобразования. При синтезе нелегированных кристаллов ZnO температура тигля с цинком варьировалась в интервале от 700 до 1050 °C.

Кристаллы вырастали на внутренней поверхности меньшей трубки, на краях тигля и подложках, расположенных по направлению потока газа.

Дифрактометрические исследования были проведены на приборе ДРОН-4.07 (Co Kα-излучение). Расшифровка полученных дифрактограмм выполнена с использованием базы Powder Diffraction File (PDF-2) объединенного комитета дифракционных стандартов (Joint Commitee Powder

Diffraction Data — JCPDS) Международного Центра Дифракционных Данных (International Center for Diffraction Data — ICDD).

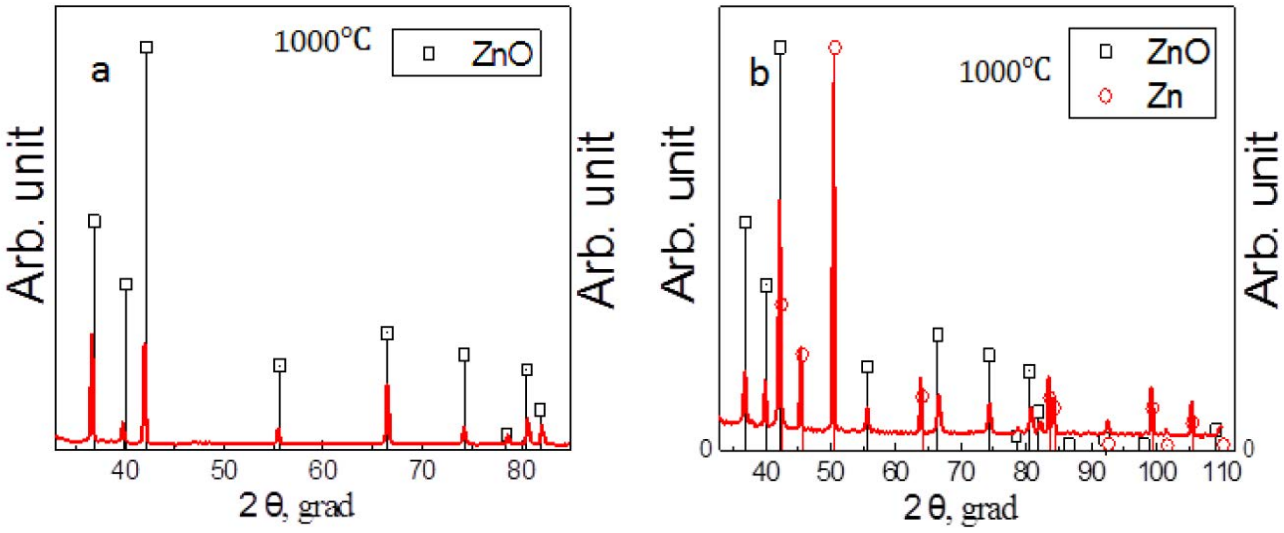
Морфологические исследования образцов проведены на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380 LV.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние скорости потока кислорода и температуры синтеза на состав и субструктуру образцов ZnO

На рис. 1*a, b* приведены дифрактограммы образцов ZnO, полученных при разных скоростях потока кислорода, определяющих относительное содержание кислорода в газовой смеси Ar/O_2. Анализ дифрактограмм показывает, что в случае недостатка кислорода в газовой смеси (при скоростях потока кислорода менее 40 см^2/мин) в составе образца обнаруживается металлический цинк. Это означает, что в процессе газотранспортного синтеза ZnO фазовый состав полученных образцов зависит от скорости потока кислорода, который далее во всех экспериментах поддерживался на уровне 40 см^2/мин.

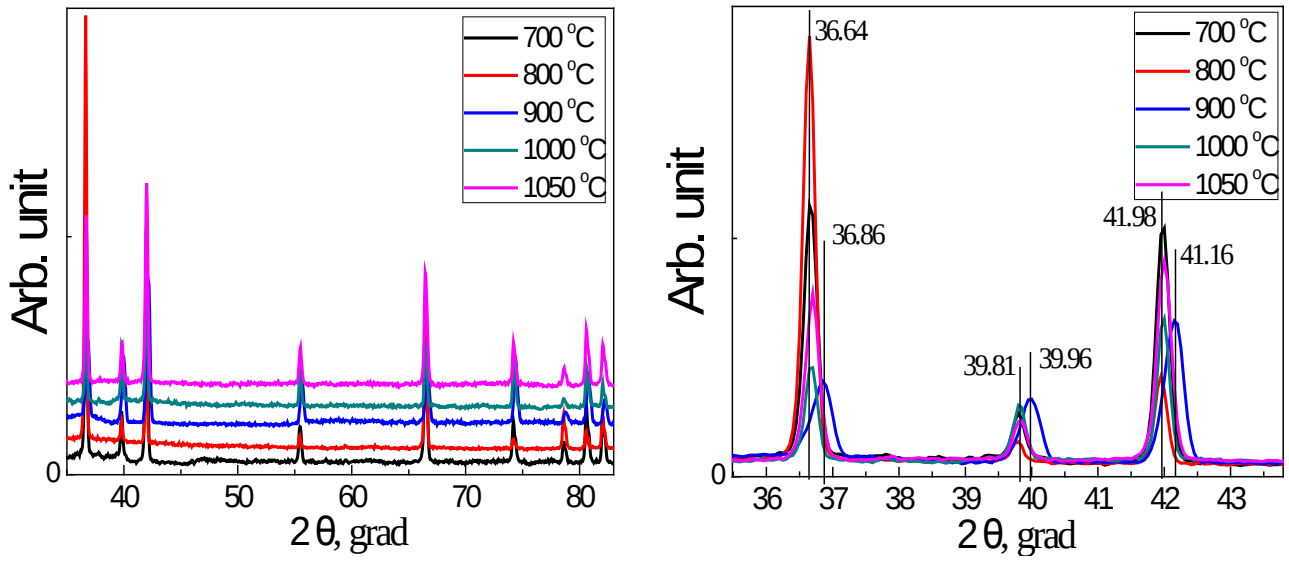
Далее на рис. 2*a* приведены дифрактограммы от пяти образцов, полученных при различных температурах синтеза: 700, 800, 900, 1000 и 1050 °C, три первые линии которых совмещены на рис. 2*b*. Все образцы, полученные в пределах указанных температур синтеза, обладают гексагональной структурой вюрцита, наиболее характерной для ZnO [12]. В табл. 1 в качестве примера приведены значения межплоскостных расстояний *d* (Å) и относительных интенсивностей *I* отн.(%) дифракционных линий образца ZnO, синтезированного при 1000 °C, в сравнении с соответствующими значениями из международной базы данных ZnO ($CuK\alpha_1$) БД PDF 2012, карточка (00-005-0664), приведенных в первых столбцах той же табл. 1. Значения величин *d* и *I* приведенного в качестве примера образца с точностью до третьего знака совпадают со значениями из базы данных, свидетельствуя о гексагональной структуре вюрцита данного образца.



a) *b)*

Рис. 1. Дифрактограммы образцов ZnO, полученных при разных скоростях потока кислорода в газовой смеси Ar/O_2: *a* — скорость потока кислорода 40 см^2/мин; *b* — скорость потока кислорода 30 см^2/мин

Однако в других образцах, полученных при других температурах, самой интенсивной линией оказывается не третья линия (100), как в табл. 1, а первая линия (100) или вторая линия. Таким образом, соотношение интенсивностей дифракционных линий первой (100) и третьей (101) изменяется от образца к образцу в зависимости от температуры его получения. Как показывают дифрактограммы, приведенные на рис. 2, при наиболее низких температурах синтеза из указанного интервала (700, 800 °C) наиболее интенсивной является первая линия (100). При температуре синтеза 900 °C интенсивности между первой (100) и третьей (101) перераспределяются (рис. 1*a*), самой интенсивной становится третья линия (101), и при 1000—1050 °C интенсивность третьей линии (101) начинает преобладать (рис. 2).



a) *b)*

Рис. 2. Дифрактограммы образцов ZnO, полученных при различных температурах синтеза: *a* — интервал углов 2θ = 10—85° и *b* — интервал углов 2θ = 35—45°

Таблица 1. Значения межплоскостных расстояний d (Å) и относительных интенсивностей (*I* отн., %) дифракционных линий образца ZnO, синтезированного при 1000 °C, в сравнении с данными Международного Центра Дифракционных Данных (первые два столбца) для гексагонального ZnO со структурой вюрцита

№ линии	*d* (Å) ZnO PDF(00-005-664-2012)	*I* отн., %	*d* (Å) ZnO, полученного при 1000 °C	I отн., %	Индексы дифракционных линий (*hkl*)
1	2.816	71	2.817	69	(100)
2	2.602	56	2.605	41	(002)
3	2.476	100	2.481	100	(101)
4	1.911	29	1.911	22	(102)
5	1.626	40	1.626	52	(110)
6	1.477	35	1.478	31	(103)
7	1.407	6	1.408	9	(200)
8	1.379	28	1.379	31	(112)
9	1.359	14	1.360	20	(201)
10	1.301	3	1.303	3	(004)
11	1.238	5	1.238	7	(202)
12	1.181	3	1.184	4	(104)

Как показали дальнейшие электронномикроскопические исследования морфологии полученных образцов, перераспределение интенсивности между дифракционными отражениями от разных плоскостей, ориентированных по основным кристаллографическим направлениям, обусловлено различной морфологией кристаллов, выращенных при разных температурах. При этом в соответствии с международной базой данных, поликристаллическая фаза порошка гексагонального ZnO [12] имеет самую интенсивную третью линию (101) с межплоскостным расстоянием d=2.476 Å.

Электронномикроскопические исследования морфологии образцов ZnO, полученных при различных температурах газотранспортного синтеза

На рис. 3 приведены результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) образцов ZnO, полученных при разных температурах газотранспортного синтеза в интервале 700—1050 °C. Эти результаты показывает, что при формировании образца его морфологическая форма зависит от температуры синтеза. При температуре 700—800 °C микрокристаллы вырастают преимущественно в виде одиночных стержней или балок (рис. 3*a*, *b*), на дифрактограммах от которых наиболее интенсивной является первая линия (100).

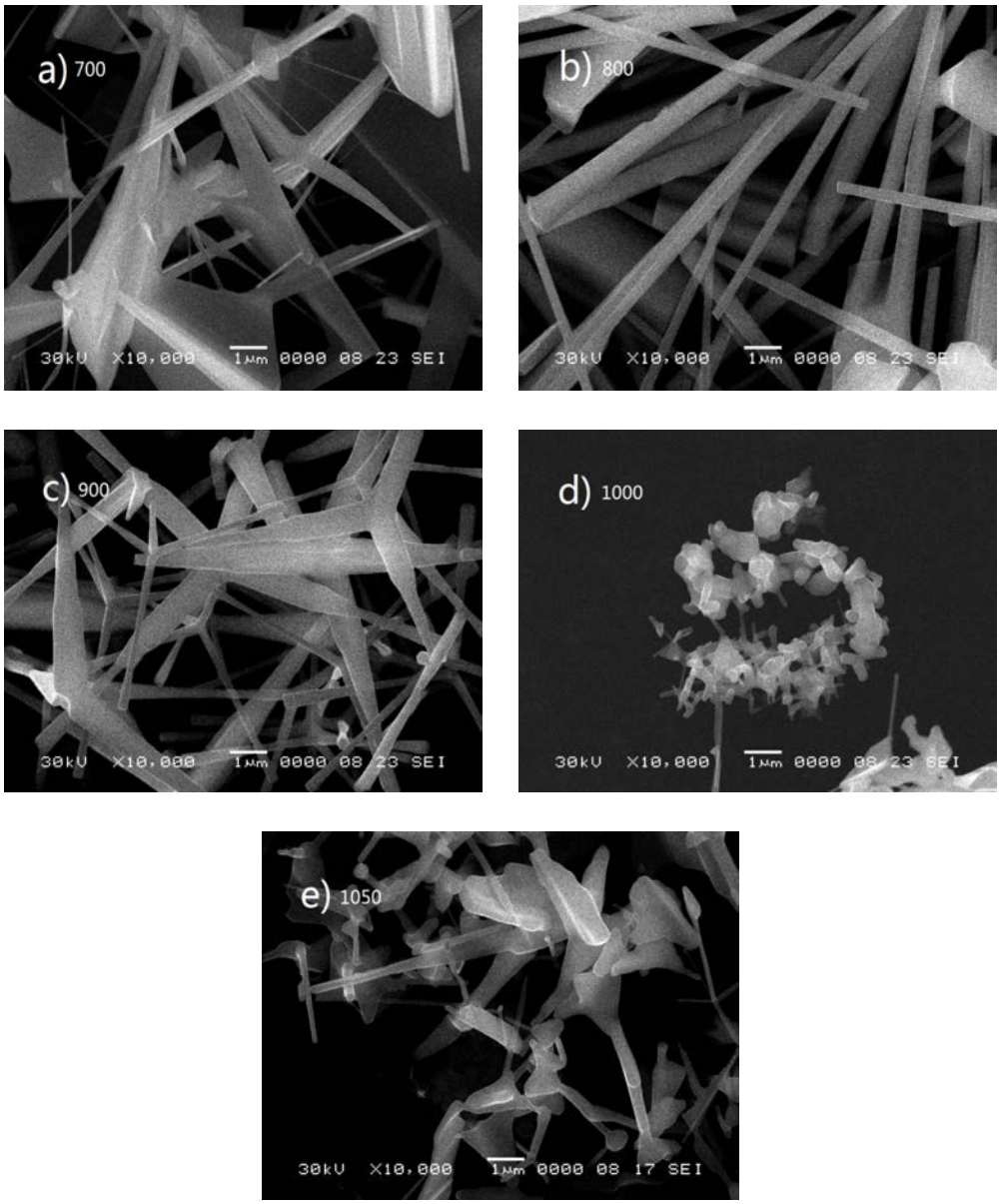


Рис. 3. СЭМ изображения образцов ZnO, полученных при различных температурах синтеза, °C: 700 (*a*), 800 (*b*), 900 (*c*), 1000 (*d*) и 1050 (*e*)

При повышении температуры синтеза до 900 °C вырастают тетраподы с заостренными концами четырех ног (рис. 3*c*), на дифрактограмме от которых наиболее интенсивной становится третья линия (101) (рис. 2*b*). Тетраподы ZnO являются квазитрехмерными наноструктурами и характеризуются четырьмя монокристальными стержнями со структурой вюрцита, растущими к вершинам тетраэдра. Механизм их роста до сих пор не нашёл детального описания, но, возможно, в этом играет роль температурное различие между образованием сфалеритной и вюрцитной струкур. По-видимому, первая предпочтительна в период зародышеобразования, а вторая — во время роста, как это обсуждалось в работе [13]. На рис. 3*a* просматривается зародыш одной из ног тетрапода в виде шестигранной структуры со ступеньками роста.

При более высоких температурах синтеза (1000 и 1050 °C) кристаллы ZnO осаждаются в виде сросшихся гранулированных образований произвольной формы, показанных на рис. 3*d* и 3*e*.

Именно ввиду различной формы микрокристаллов соотношение интенсивностей дифракционных линий первой (100) и третьей (101) в двух образцах, выращенных при 800 и 900 °C, изменяется наиболее заметно. В образце из одиночных балок (800 °C), ориентированных преимущественно в направлении [100], первая линия (100) является самой интенсивной, тогда как в образце с тетраподами (900 °C) самой интенсивной становится третья линия (101), как в поликристаллическом образце [12].

Полученный результат согласуется с литературными данными по нитевидным нанокристаллам и нанокристаллическим тетраподам, хотя и не был отмечен авторами работы [13], в том числе и нами в более ранних работах [11].

Механизм роста всех кристаллов, представленных на рис. 3, пар — кристалл, поскольку на концах кристаллов отсутствуют металлические капельки. Размер полученных кристаллов со структурой вюрцита субмикронный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В газотранспортной среде Ar/O_2 формирование кристаллов ZnO субмикронных размеров происходит по механизму пар-кристалл. Оптимальная температура формирования кристаллов ZnO находится в диапазоне 700—1100 °C.

Фазовый состав конденсата зависит не только от состава реакционного газа, но и от скорости потока кислорода, который во всех экспериментах поддерживался на уровне 40 см^2/мин при расходе газа носителя не более $(1—3)\cdot 10^{-6}$ м^3/с.

При прочих равных условиях морфология кристаллов ZnO определяется температурой синтеза. При температуре 700—800 °C формируются преимущественно однонаправленные балки, тогда как при температуре 900 °C образуются тетраподы, которые при 1000—1050 °C объединяются в цепочечные конгломераты при сохранении гексагональной сингонии и структурного типа вюрцита.

Морфологиия кристаллов ZnO (балки, тетраподы или цепочечные конгломераты), выращенных при разных температурах, влияет на перераспределение интенсивности между дифракционными отражениями от плоскостей (100) и (101), ориентированных по основным кристаллографическим направлениям. Для конденсата из балок и стержней самой интенсивной является первая линия дифрактограммы с индексами (100), тогда как от тетраподов и их конгламератов самой интенсивной становится третья линия дирактограммы с индексами (101).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 15-52-61017 Египет_а, и также в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014—2016 годы. Проект № 757.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashrafi, A.B.M.A., Ueta A., Avramescu A., Kumano H., Suemune I., Ok Y.-W., Seong T.-Y. // *Applied Physics Letters,* 2000, vol. 76, pp. 550—558.

2. Gudiksen M. S., Lauhon, L. J., Wang, J., Smith, D. C. and Leiber, C. M. // *Nature*, 2002, vol. 415, pp. 617—625.

3. Jaffe J. E., Snyder J. A., Lin Z., Hess A. C. // *Physical Review B: Condensed Matter*, 2000, vol. 62, pp.1660—1667.

4. Ozgur U., Alivov Y. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M. A, Dogan S., Avrutin V., Cho S-J and Morkoc H. // *J. Appl. Phys.,* 2005, vol. 98, pp. 041—301.

5. Ogale S. B. *Thin Films and Heterostructures for Oxide Electronics.* New York, Springer, 2005, 415 p.

6. Maeda K., Sato M., Niikura I. and Fukuda T. // *Semiconductor Science and Technology*, 2005, vol.20, pp. 49—55.

7. Ishihara J., Nakamura A., Shigemor S., Aoki T., and Temmyo J. // *Appl. Phys. Lett.,* 2006, vol. 89, pp. 910—914.

8. Lupan O., Chow L., Chai G. // *Sensors and Actuators B,* 2009, vol. 141, pp. 511—517

9. Ying Dai, Yue Zhang, Zhong Lin Wang // *Solid State Communications,* 2003, vol. 126, pp. 629—633.

10. Chia Ying Lee, Tseung Yuen Tseng, Seu Yi Li, Pang Lin Tamkang. // *J. of Science and Engineering*, 2003, vol. 6, № 2, pp. 127—132.

11. Аль Рифаи С. А., Кульницкий Б. А., Рябцев С. В., Домашевская Э. П. // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2013, т. 15, № 3, с. 317—321.

12. JCPDS — International Centre for Diffraction Data, 2012, № 00—005—0664.

13. Ляпина О. А., Баранов А. Н., Панин Г. Н., Кнотько А. В., Кононенко О. В. // *Неорг. матер.*, 2008, т. 44, № 8 с. 958—965.

EFFECT OF THE GAS TRANSPORT SYNTHESIS TEMPERATURE ON THE ZnO CRYSTAL MORPHOLOGY

©2016 E. P. Domashevskaya, S. V. Ryabtsev, Min Chen, S. A. Ivkov, S. V. Avilov

Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018 Voronezh, Russia.
e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Received 02.11.2016

Abstract. The aim of the work was to determine the effect of gas transport synthesis temperature on the morphology of ZnO crystals grown in the absence of specially created nucleation centers in the reactive medium argon/oxygen was investigated. The temperature of the crucible with zinc was varied in the range from 700oC to 1050 °C.

As a result studies of the condensate phase composition, the crystal structure and morphology was found that its performance are dependent not only on the oxygen flow rate, but also on the synthesis temperature. Ceteris paribus the synthesis temperature determines the morphology of ZnO crystals. At a temperature of 700—800 °C formed mainly rods and beams, with a temperature of 900 °C formed tetrapods, which in 1000—1050 °C combined into conglomerates chain while maintaining the hexagonal system and structural wurtzite.

In turn, the morphology of ZnO crystals grown at different temperatures, affect the redistribution of the intensity among the diffraction reflections from the (100) and (101) oriented along the main crystallographic directions. The most intense diffraction pattern the first line with the indices (100) is in the condensate of beams and bars, whereas from tetrapods and conglomerates the third line with indices (101) becomes the most intense.

Keywords: zinc oxide, gas transport synthesis, the morphology of crystals, beams, tetrapods, conglomerates, redistribution of the intensities of the diffraction reflections.

REFERENCES

1. Ashrafi A. B.M.A., Ueta, A., Avramescu A., Kumano H., Suemune I., Ok Y.-W., Seong T.-Y. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 76, pp. 550—558. http://dx.doi.org/10.1063/1.125851

2. Gudiksen M. S., Lauhon, L. J., Wang, J., Smith, D. C. and Leiber, C. M. *Nature*, 2002, vol. 415, pp. 617—625.

3. Jaffe J. E., Snyder J. A., Lin Z., Hess A. C. *Physical Review B: Condensed Matter,* 2000, vol. 62, pp. 1660—1667. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.1660

4. Ozgur U., Alivov Y. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M. A, Dogan S., Avrutin V., Cho S-J and Morkoc H. *J. Appl. Phys.,* 2005, vol. 98, pp. 041—301. http://dx.doi.org/10.1063/1.1992666

5. Ogale S. B. Thin Films and Heterostructures for Oxide Electronics. New York, Springer, 2005, 415 p.

6. Maeda K., Sato M., Niikura I. and Fukuda T. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, vol. 20, pp. 49—55.

7. Ishihara J., Nakamura A., Shigemor S., Aoki T., and Temmyo J. *Appl. Phys. Lett*., 2006, vol. 89, pp. 910—914.

8. Lupan O., Chow L., Chai G. *Sensors and Actuators B*, 2009, vol. 141, pp. 511—517. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Lee_Chow/publication/222706603_Selective_hydrogen_gas_nanosensor_using_individual_ZnO_nanowire_with_fast_response_at_room_temperature/links/09e4150be85b580581000000.pdf

9. Ying Dai, Yue Zhang, Zhong Lin Wang. *Solid State Communications*, 2003, vol. 126, pp. 629—633. http://dx.doi.org/10.1016/S0038—1098(03)00277—1

10. Chia Ying Lee, Tseung Yuen Tseng, Seu Yi Li, Pang Lin Tamkang. *J. of Science and Engineering*, 2003, vol. 6, no. 2, pp. 127—132. Available at: http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/6—2/6—2—8.pdf

11. Al Rifai S. A., Kulnitsky B. A., Ryabtsev S. V., Domashevskaya E. P. *Condensed Substance and Phase Boundary*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 317—321.

12. JCPDS — International Centre for Diffraction Data, 2012, № 00—005—0664.

13. Lyapina O. A., Baranov A. N., Panin G. N., Knotko A. V., Kononenko O. I. *Inorganic Mater.*, 2008, vol. 44, no. 8, pp. 846—852. DOI: 10.1134/S0020168508080116

Домашевская Эвелина Павловна — д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, зав. кафедрой физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; тел .: +7 (473) 2208363, e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Рябцев Станислав Викторович — д. ф.-м. н., старший научный сотрудник совместной лаборатории ИОНХ РАН и кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, НИИФ ВГУ; тел.: +7 (951) 5609911, e-mail: ryabtsev@phys.vsu.ru

Мин Чень — магистр кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; тел .: +7 (473) 2208363, e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Ивков Сергей Александрович — аспирант, ведущий электроник кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208363, ftt@phys.vsu.ru

Авилов Святослав Владимирович — аспирант кафедры твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; тел.: +7 (473) 2208363, e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Domashevskaya Evelina P. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Full Professor, Chief Researcher, Head of Solid State Physic and Nanostructures Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208363; e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Ryabtsev Stanislav V. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Head of the Joint Laboratory of IGIC RAS and the Solid State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University; ph..: +7 (951) 5609911, e-mail: ryabtsev@phys.vsu.ru

Min Chen — Master of Solid State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University; ph.:. +7 (473) 2208363, e-mail: ftt@phys.vsu.ru

Ivkov Sergey A. — postgraduate student, Leading Electronics of Solid State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208363, ftt@phys.vsu.ru

Avilov Svyatoslav V. — postgraduate student of Solid State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University; ph.: +7 (473) 2208363, ftt@phys.vsu.ru