

Фотолюминесцентные свойства нанородов ZnO, синтезированных различными методами

© С.С. Курбанов¹, Ш.З. Уролов¹, З.Ш. Шаймарданов¹, Х.Д. Чо², Т.В. Канг²

¹ Институт ионно-плазменных и лазерных технологий академии наук Республики Узбекистан, 100125 Ташкент, Узбекистан

² Исследовательский центр квантово-функциональных полупроводников, Донгукский университет, 100715 Сеул, Республика Корея

E-mail: saidislam_kurbanov@yahoo.com

(Получена 28 июня 2017 г. Принята к печати 29 ноября 2017 г.)

Исследованы фотолюминесцентные свойства нанородов ZnO, синтезированных низкотемпературным гидротермальным и высокотемпературным парофазным методами. При комнатной температуре спектр люминесценции нанородов ZnO, выращенных высокотемпературным парофазным методом, содержит только один, сильный УФ пик при 382 нм. В то же время спектры люминесценции образцов нанородов ZnO, выращенных низкотемпературным гидротермальным методом, но с использованием различных химических реагентов, наряду с УФ пиком также содержат фиолетовую или желто-оранжевую полосы при ~ 401 и ~ 574 нм соответственно. Фиолетовая полоса люминесценции приписана дефектам или комплексам вакансии цинка, а желто-оранжевая полоса отнесена к дефектам, связанным с междоузельным кислородом.

DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46048.8673

1. Введение

Наноструктурный полупроводник оксид цинка (ZnO) вызывает повышенный интерес благодаря его большим возможностям в фундаментальных исследованиях и практическом применении. В аспекте фундаментальных исследований наноструктурный ZnO является удобным объектом для изучения квантово-размерных и поверхностных эффектов из-за его развитой поверхности. Для практического применения оксид цинка является перспективным материалом в создании светоизлучающих приборов УФ диапазона, поскольку при комнатной температуре ZnO имеет широкую запрещенную зону 3.37 эВ [1]. В этой связи квазиодномерные (1D) ZnO наноматериалы (особенно пространственно ориентированные нанороды и нанопроволоки), как ожидается, найдут применение в создании УФ лазеров, работающих при комнатной температуре [2,3]. Эти ожидания базируются на большой энергии связи (60 мэВ) свободного экситона в оксиде цинка, которая позволяет и при температурах выше комнатной реализовать лазерную генерацию вследствие экситонной рекомбинации [4,5]. Понимание оптических, электрических и структурных свойств этих материалов является важным этапом в применении их в различных оптических и электронных устройствах.

Нанороды или нанопроволоки ZnO могут быть выращены как парофазным методом, так и из раствора. Низкотемпературный гидротермальное синтез представляет возможность резко снизить стоимость продукта и выращивать структуры на больших площадях, так как исключает высокие температуры и требования к высокому вакууму. Более того, обычно температура синтеза ниже 100°C, что позволяет использовать в качестве подложки пластик и другие материалы, непригодные в случае высоких температур. Парофазный метод

позволяет синтезировать высококачественные, хорошо ориентированные нанороды ZnO. Более того, нанороды ZnO, выращенные этим методом проявляют высокую излучательную способность в УФ области и интенсивность люминесценции в этих нанородах на несколько порядков больше чем в таковых, синтезированных гидротермальным методом. Одно из преимуществ парофазного метода перед молекулярно-лучевой эпитаксией заключается в том, что в парофазном методе ставятся относительно низкие требования к вакуумной системе, в то время как для молекулярно-лучевой эпитаксии требуется ультравысокий вакуум. Изменяя методы и условия синтеза, можно выращивать нанороды ZnO как с различными диаметром и длиной, так и с варьируемыми излучательными характеристиками.

Обычно спектр люминесценции материалов оксида цинка, как и нанородов и наночастиц, состоит из двух частей: краевой люминесценции в районе 380 нм и широкой полосы в видимой области, обусловленной дефектами в структуре. Последняя полоса люминесценции в зависимости от методов синтеза и способов последующей обработки может содержать фиолетово-голубую (390–460 нм), и(или) зеленую (500–520 нм), и(или) желто-оранжевую (560–600 нм), и(или) красную (650 нм) полосы. Желто-оранжевая полоса люминесценции (ПЛ) приписывается междоузельному кислороду или комплексам, связанным с кислородом [6–10]. Она часто наблюдается в материалах оксида цинка, выращенных из водных растворов при относительно низких температурах. В противоположность этому зеленая ПЛ наблюдается в материалах ZnO, синтезированных в условиях с дефицитом кислорода или после высокотемпературного отжига. Она приписывается дефектам, связанным с вакансией кислорода [1,11,12]. Фиолетово-голубая полоса может быть разделена на фиолетовую

около 400 нм и голубую в районе 420–460 нм полосы свечения. Для фиолетовой ПЛ предложено несколько механизмов излучения: вакансия цинка (V_{Zn}) [10,13–15], кислородный дефект перестановки (антисайт кислород) (O_{Zn}) [16], и межузельный цинк (Zn_i) [17]. Полоса свечения, обусловленная дефектами ZnO, является каналом утечки возбуждения. Соотношение интенсивностей краевой люминесценции и дефектной полосы свечения в материалах ZnO зависит от условий синтеза и может быть использовано как показатель оптического качества структуры.

В настоящей работе обсуждаются люминесцентные свойства нанородов ZnO, выращенных разными методами. Наши исследования показали, что спектры люминесценции нанородов ZnO, синтезированных низкотемпературным гидротермальным методом, но с применением различных химикатов, содержат разные полосы свечения. Эти спектры, наряду с краевой люминесценцией, также содержат фиолетовую или желто-оранжевую полосы. Полученные результаты указывают, что фиолетовая и желто-оранжевая полосы люминесценции могут быть обусловлены дефектами, ассоциированными с вакансией цинка или комплексами вакансии цинка и дефектами, связанными с межузельным кислородом соответственно.

2. Эксперимент

Нанороды ZnO были выращены с использованием двух модификаций низкотемпературного гидротермального метода и методом высокотемпературного парафазного транспорта. В первом случае (образец 1) процедура синтеза заключалась в следующем: цинк ацетат дигидрат $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (0.016 М) при комнатной температуре был растворен в деионизированной воде. Затем раствор аммиака NH_4OH (0.095 М) был добавлен в этот раствор при интенсивном перемешивании до тех пор, пока рН фактор раствора не стал равным 8. Полученный раствор был перемещен в стальной автоклав с внутренним тефлоновым покрытием. Затем предварительно подготовленные стеклянные пластинки с проводящей оксид индия–олова (ITO) пленкой и зародышами ZnO активной поверхностью вниз были помещены на дно автоклава. В заключение автоклав плотно закрывался и помещался в термостабилизированную печь. Гидротермальный синтез производился при температуре 85°C в течение 5 ч.

Во втором гидротермальном способе (образец 2) водные растворы нитрат цинка гексогидрата ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) и гексаметилтетрамина ($C_6H_{12}N_4$) приготавливались отдельно и затем смешивались. Концентрация обоих растворов бралась равной 0.1 М. Смесь перемешивалась с помощью магнитной мешалки в течение 30 мин, пока не образовывался прозрачный и однородный раствор. Затем раствор был перемещен в стальной автоклав с внутренним тефлоновым

покрытием, где предварительно были помещены активной поверхностью вниз подготовленные стеклянные пластинки с проводящей ITO пленкой и зародышами ZnO. Гидротермальная реакция протекала в термостабилизированной печи при температуре 90°C в течение 5 ч.

После окончания реакции синтеза автоклав вынимался из печи и остывал до комнатной температуры при естественных условиях. После охлаждения образцы извлекались из автоклава и несколько раз промывались в деионизированной воде и высушивались на воздухе.

Подготовка подложек с зародышами ZnO происходила следующим образом: стеклянные пластинки с проводящей ITO пленкой очищались в ультразвуковой ванне в течение 15 мин в ацетоне и этиловом спирте. Зародыши ZnO создавались с использованием раствора ацетата цинка дигидрата ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) в этиловом спирте (5 мМ). Этот раствор наносился на подложки методом центрофугирования (*spin coating*), после чего высушивался на воздухе. Процесс повторялся несколько раз, что позволило увеличить плотность образующихся зародышей ZnO. Полученные подложки отжигались на воздухе при температуре 250°C в течение 30 мин. Температура отжига немного выше температуры разложения ацетата цинка дигидрата и формирования нанокристаллов ZnO на подложке.

Массив нанородов ZnO (образец 3) выращивался на подложке из Si (100) с применением метода парафазного транспорта при температуре (800–1000°C) без катализатора. В качестве реагентов использовались Zn 99.999% чистоты и O_2 99.995% чистоты, а азот служил карьерным газом. Все химикаты были аналитической чистоты и использовались без предварительной очистки [18].

Морфология образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (PHILIPS XL-30). Спектры люминесценции регистрировались спектрометром SPEX, оснащенный решеточным монохроматором с фокусным расстоянием 0.75 м и разрешением 0.1 нм. Люминесценция возбуждалась излучением He–Cd лазера с длиной волны излучения 325 нм (3.812 эВ) и мощностью 50 мВт.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны СЭМ микрофотографии нанородов ZnO, синтезированные тремя методами. Средние значения длины и диаметра нанородов, выращенных гидротермальным методом с использованием ацетат цинка дигидрата и аммиака (образец 1) составляют ~ 500 и 25–70 нм соответственно (рис. 1, *a*). Средние значения длины и диаметра нанородов, выращенных с использованием нитрат цинка гексогидрата и гексаметилтетрамина (образец 2) больше чем нанородов образца 1. Диаметр этих нанородов 70–200 нм, а длина 2–2.5 мкм (рис. 1, *b*). Высокотемпературный парафазный метод (образец 3)

позволяет синтезировать нанороды с регулярной гексагональной формой и плоским концом (рис. 1, *c*). Длина нанородов ~ 15 мкм и поперечные размеры от 0.5 до 1.4 мкм. Все образцы нанородов ZnO показывают линии дифракции рентгеновских лучей, характерные для кристаллической гексагональной вюрцит структуры, нанороды ориентированы преимущественно в направлении (002).

На рис. 2 показаны спектры люминесценции нанородов ZnO, зарегистрированные при комнатной температуре. Спектры люминесценции всех образцов нанородов содержат УФ пик в районе 380 нм, с незначительными отклонениями. УФ пик в образцах 1, 2 и 3 расположен при 377, 380 и 382 нм соответственно.

В спектре люминесценции образца 1 на длинноволновой стороне УФ пика наблюдается слабое плечо. В противоположность этому, спектр люминесценции

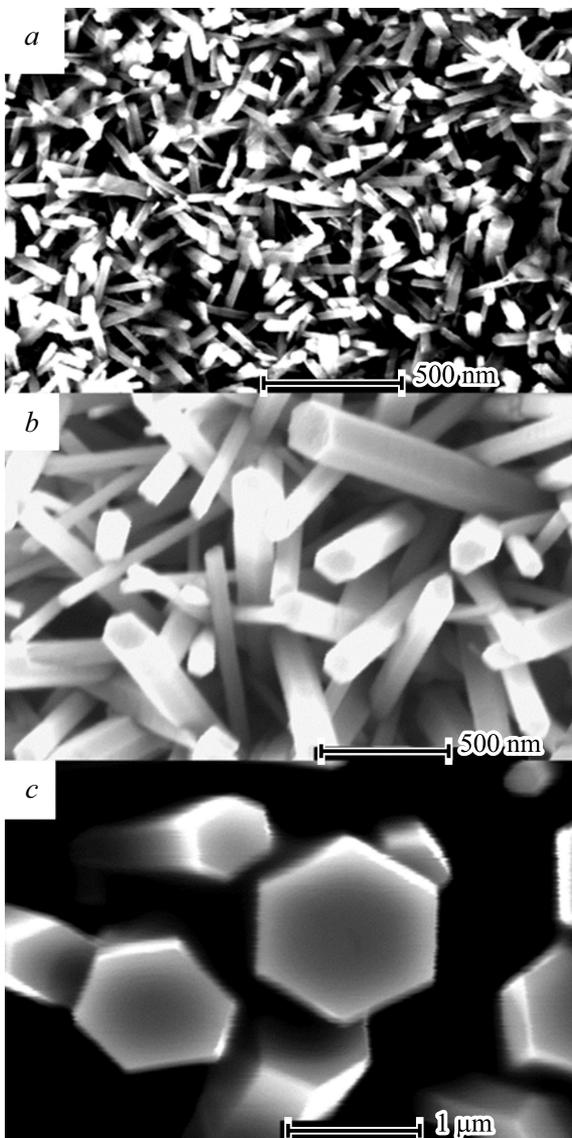


Рис. 1. Микрофотографии нанородов ZnO, полученные сканирующим электронным микроскопом: *a* — образец 1, *b* — образец 2, *c* — образец 3.

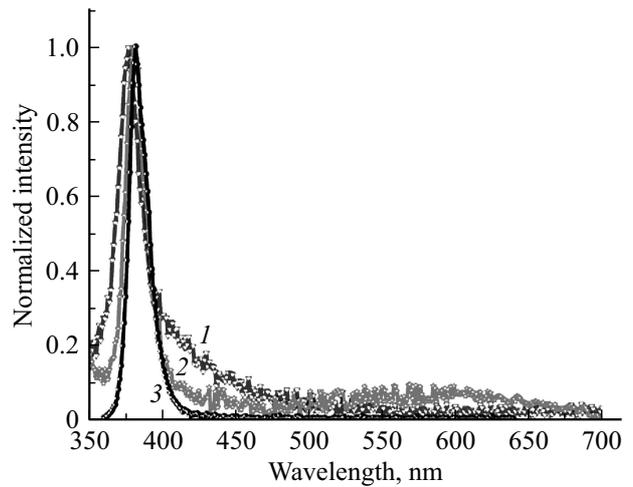


Рис. 2. Спектры люминесценции нанородов ZnO: 1 — образец 1, 2 — образец 2 и 3 — образец 3. Спектры получены при комнатной температуре.

образца 2 в видимой области спектра содержит слабую, широкую полосу в районе 550–600 нм. Среди исследованных образцов нанороды ZnO, выращенные высокотемпературным парафазным методом показали очень сильный УФ пик в своих спектрах люминесценции. Кроме УФ пика, другие полосы люминесценции в видимой области спектра не проявляются (рис. 2, 3).

Согласно литературе, УФ пик, наблюдаемый во всех образцах, отнесен к краевой люминесценции оксида цинка, а именно к свечению свободного экситона. Различия в положениях максимума могут быть связаны с различными размерами нанородов. Как видно из рис. 1, нанороды образца 3 имеют наибольший диаметр по сравнению с другими образцами. Нанороды образца 1 имеют самый маленький диаметр и их средний диаметр почти в 3 и в 20 раз меньше таковых для нанородов образцов 2 и 3 соответственно. Таким образом, разные положения максимумов УФ пика можно объяснить некоторым размерным эффектом из-за разницы в диаметрах нанородов.

Как было указано выше, высокая интенсивность краевой и низкая интенсивность дефектной люминесценции являются показателем качества нанородов ZnO. Спектр люминесценции нанородов образца 1 можно разложить на две лоренцовы компоненты с максимумами при 377 и 401 нм (рис. 3, *a*, пунктирная линия). В спектре люминесценции нанородов образца 2 полоса в районе 400 нм не проявляется, но этот спектр содержит широкую желто-оранжевую полосу в районе ~ 578 нм (рис. 3, *b*, пунктирная линия).

Учитывая, что нанороды были синтезированы без посторонних добавлений, фиолетовая и желто-оранжевая полосы люминесценции можно приписать к собственным дефектам и их комплексам в ZnO. Как было сказано во Введении, желто-оранжевая полоса часто наблюдается в наноматериалах оксида цинка, выращенных из вод-

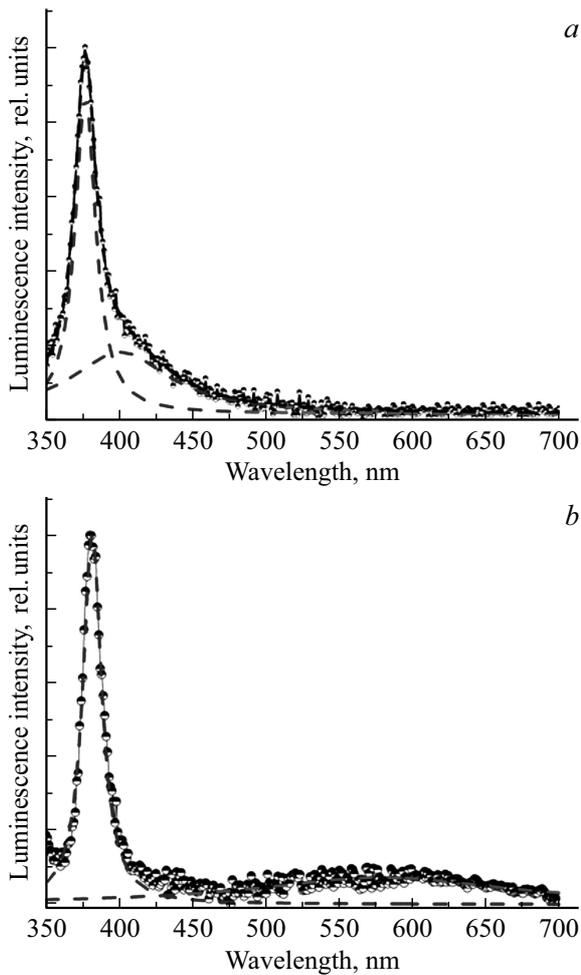


Рис. 3. Разложение спектров люминесценции нанородов ZnO на лоренцевы компоненты (пунктирные линии): *a* — образец 1, *b* — образец 2.

ных растворов при относительно низких температурах, и обычно приписывается межзельному кислороду или комплексам, образованным с участием кислорода [6–10]. Учитывая эти обстоятельства, полосу свечения при ~ 574 нм, наблюдаемую в образце 2 можно отнести к дефектам, связанным с межзельным кислородом.

Имеется множество публикаций, где сообщается о наблюдении при комнатной температуре фиолетовой полосы люминесценции, расположенной в области 390–420 нм (2.95–3.18 эВ) [10,13,14,19–21]. Например, в пленках ZnO, полученных импульсным лазерным напылением наблюдались полосы катодолуминесценции при 405 нм [10] и фотолуминесценции при 400 нм (3.1 эВ) [21]. Фиолетовая полоса свечения, отнесенная к VZn-центрам, появлялась, когда давление кислорода при синтезе было максимальным. Полосы люминесценции при 401 нм (3.09 эВ) и 413–424 нм были обнаружены в пленках ZnO, выращенных радиочастотным магнетронным распылением при избытке кислорода [13] и в пленках ZnO, синтезированных на кварцевых подложках

окислением металлического цинка [19]. В последнем случае максимум полосы люминесценции смещается от 424 к 413 нм, а ее интенсивность растет с увеличением давления кислорода. Эти полосы также были приписаны вакансиям цинка.

Анализ литературных данных, посвященных свойствам фиолетовой полосы люминесценции, показывает, что она наблюдается в структурах ZnO, выращенных в условиях с избытком кислорода, независимо от способов синтеза. Таким образом, имеется реальное влияние концентрации кислорода, т.е. избытка кислорода на интенсивность и положение фиолетовой полосы люминесценции. Основываясь на этих данных и наших результатах, мы можем предположить, что фиолетовая полоса люминесценции, зарегистрированная в нанородах ZnO, также обусловлена дефектами, связанными с вакансиями цинка или их комплексами.

Это заключение также поддерживается теоретическими исследованиями [22,23]. Как было показано, при синтезе ZnO с избытком кислорода межзельный кислород и вакансии цинка являются доминирующими дефектами и их энтальпия образования меньше, чем у других дефектов. Как было предсказано, для вакансии цинка переходный уровень (0/–1) лежит при ~ 0.45 эВ [22] или ~ 0.3 эВ [23], а переходный уровень (–1/–2) расположен при ~ 0.8 эВ [22] или 0.7 эВ [23] выше потолка валентной зоны. Исходя из этого переход электрона из зоны проводимости на однозарядный акцепторный уровень вакансии цинка может дать люминесценцию с длиной волны 401 нм (3.09 эВ), что согласуется с предсказанной энергией перехода.

Относительно высокая интенсивность фиолетовой люминесценции нанородов ZnO в образце 1 по сравнению с образцом 2 объясняется изменением соотношения площади поверхности нанородов и их объема с изменением диаметра нанородов. Как известно, наноразмерные материалы имеют большое отношение поверхности к объему, и такая особенность наноматериалов критично действует на их электронные и оптические свойства. Нанороды ZnO с маленьким диаметром имеют более высокое значение отношения поверхности к объему, чем нанороды с большим диаметром. Для стержня, имеющего длину h и радиус r , отношение поверхности стержня к его объему R может быть определено следующим выражением:

$$R = \frac{S}{V} = \frac{2\pi r^2 + 2\pi rh}{\pi r^2 h}.$$

Оценка средних значений отношения поверхности к объему показала, что для нанородов ZnO в образце 1 оно равняется 0.06, а для нанородов в образце 2 оно в три раза меньше и равняется 0.02. Очевидно, что нанороды в образце 1 имеют более развитую поверхность чем нанороды в образце 2, и в них явления, связанные с поверхностью, должны проявляться более выражено. Зубайга (Zubiaga) и соавторы, базируясь на экспериментах

с применением аннигиляции позитронов, показали, что в пленках ZnO концентрация вакансий цинка уменьшается с увеличением толщины пленки [24]. Этот результат является доказательством того, что центры вакансии цинка преимущественно расположены на поверхности оксида цинка и больше подвержены эффектам, связанным с поверхностью. С другой стороны, как было сообщено в работе [25], желто-оранжевая полоса люминесценции не чувствительна к модификациям поверхности наноструктур и может быть обусловлена дефектами, расположенными не на поверхности, а в объеме наноструктуры. Эти результаты также подтверждают наши наблюдения (в образце 1 наблюдается более интенсивная фиолетовая полоса и слабая желто-оранжевая полоса, а в образце 2 наоборот) и выводы относительно природы и влияния изменения соотношения поверхности нанородов и их объема на интенсивность фиолетовой полосы люминесценции.

Отсутствие фиолетовой полосы люминесценции в нанородах ZnO, выращенных высокотемпературным парафазным методом (образец 3), можно объяснить сбалансированной концентрацией кислорода в ходе роста этих нанородов. Этот вывод также находится в согласии с высокой интенсивностью УФ полосы и отсутствием каких-либо полос, обусловленных дефектами.

Хотя некоторые аспекты приведенных наблюдений остаются не до конца раскрытыми, изложенные результаты дают несомненно полезную информацию и могут прояснить природу различных полос свечения, приписываемых дефектам в нанородах ZnO, синтезированных различными методами, а также пролить свет на происхождение фиолетовой полосы люминесценции. Исследования структурных и электрических свойств нанородов ZnO продолжают и будут представлены в ближайшем будущем.

4. Заключение

Нанороды ZnO были синтезированы двумя низкотемпературными гидротермальными методами и высокотемпературным парафазным методом. При комнатной температуре нанороды ZnO, выращенные высокотемпературным парафазным методом проявляют только одну, очень сильную УФ полосу люминесценции при 382 нм. Хотя два образца нанородов ZnO были синтезированы низкотемпературным гидротермальным методом, но с использованием разных химикатов их спектры люминесценции наряду с УФ полосой содержат фиолетовую или желто-оранжевую полосы при ~ 401 и ~ 574 нм соответственно. Наблюдаемая УФ полоса отнесена к красной люминесценции ZnO. Учитывая то, что полосы люминесценции, связанные с дефектами структуры, регистрировались в нанородах ZnO, синтезированных в условиях с избытком кислорода, фиолетовая полоса люминесценции отнесена к дефектам вакансии цинка или ее комплексам, а желто-оранжевая полоса идентифи-

цирована с дефектами межузельного кислорода. Проявление только одной из полос в спектре люминесценции (фиолетовой или желто-оранжевой) возможно обусловлено вариациями соотношения площади поверхности нанородов и их объема с изменением их диаметра.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта ОТ-Ф2-52 Программы фундаментальных исследований Республики Узбекистан и гранта № 2014R1A2A1A12066298 Национального фонда исследований Кореи (NRF), финансируемого Министерством образования, науки и технологии Республики Корея.

Список литературы

- [1] Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S.-J. Cho, H. Morkoç. *J. Appl. Phys.*, **98**, 041301 (2005).
- [2] Z.K. Tang, G.K.L. Wang, P. Yu. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3270 (1998).
- [3] Q.X. Zhao, M. Willander, R.E. Morjan. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 165 (2003).
- [4] Ü. Özgür, Ya.I. Alivov, C. Liu. *J. Appl. Phys.*, **98**, 04130 (2005).
- [5] M.H. Huang, S. Mao, H.N. Feick. *Science*, **292**, 1897 (2001).
- [6] L. Wu, L. Wu, X. Pan, F. Kong. *Opt. Mater.*, **28**, 418 (2006).
- [7] J.W.P. Hsu, D.R. Tallant, R.L. Simpson, N.A. Missert, R.G. Copeland. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 252103 (2006).
- [8] A.B. Djurišić, Y.H. Leung, K.H. Tam, L. Ding, W.K. Ge, H.Y. Chen, S. Gwo. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 103107 (2006).
- [9] X. Liu, X. Wu, H. Cao, R.P.H. Chang. *J. Appl. Phys.*, **95**, 3141 (2004).
- [10] X.L. Wu, G.G. Siu, C.L. Fu, H.C. Ong. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2285 (2001).
- [11] K. Vanheusden, W.L. Warren, C.H. Seager, D.R. Tallant, J.A. Voigt. *J. Appl. Phys.*, **79**, 7983 (1996).
- [12] F.H. Leiter, H.R. Alves, A. Hofstaetter, D.M. Hofmann, B.K. Meyer. *Phys. Status Solidi B*, **226**, R4 (2001).
- [13] S.H. Jeong, B.S. Kim, B.S. Lee. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2625 (2003).
- [14] G. Hua, Y. Zhang, Ch. Ye, M. Wang, L. Zhang. *Nanotechnology*, **18**, 145605 (2007).
- [15] S.S. Kurbanov, G.N. Panin, T.W. Kim, T.W. Kang. *J. Luminesc.*, **129**, 1099 (2009).
- [16] Q.X. Zhao, P. Klason, M. Willander, H.M. Zhong, W. Lu, J.H. Yang. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 211912 (2005).
- [17] B. Kumar, B. Gong, S. Vicknesh, S.J. Chua, S. Tripathy. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 141901 (2006).
- [18] S.S. Kurbanov, H.D. Cho, T.W. Kang. *Optics Commun.*, **284**, 240 (2011).
- [19] X.M. Fan, J.S. Lian, L. Zhao, Y.H. Li. *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 420 (2005).
- [20] R.B. Kale, Y.J. Hsu, Y.F. Lin, S.Y. Lu. *Sol. St. Commun.*, **142**, 302 (2007).
- [21] A.A. Chaaya, R. Viter, M. Bechelany, Z. Alute, D. Erts, A. Zaleskaya, K. Kovalevskis, V. Rouessac, V. Smytyna, P. Miele, J. Beilstein. *Nanotechnol.*, **4**, 690 (2013).
- [22] A.F. Kohan, G. Ceder, D. Morgan, C.G. Van de Walle. *Phys. Rev. B*, **61**, 15019 (2000).
- [23] P. Erhart, K. Albe, A. Klein. *Phys. Rev. B*, **73**, 205203 (2006).

- [24] A. Zubiaga, F. Tuomisto, F. Plazaola, K. Saarinen, J.A. Garcia, J.F. Rommeluere, J. Zuñiga-Pérez, V. Muñoz-Sanjos'e. Appl. Phys. Lett., **86**, 042103 (2005).
- [25] D. Li, Y.H. Leung, A.B. Djurišić, Z.T. Liu, M.H. Xie, S.L. Shi, S.J. Xu, W.K. Chan. Appl. Phys. Lett., **85**, 1601 (2004).

Редактор Г.А. Оганесян

Photoluminescence properties of ZnO nanorods prepared by different methods

S.S. Kurbanov¹, Sh.Z. Urolov¹, Z.Sh. Shaymardanov¹, H.D. Cho², T.W. Kang²

¹ Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies,
Uzbekistan Academy of Sciences,
100125 Tashkent, Uzbekistan

² Quantum-Functional Semiconductor Research Center,
Dongguk University, Seoul,
100715 Seoul, Republic of Korea

Abstract Photoluminescence properties of ZnO nanorods synthesized using low temperature hydrothermal routes and a high temperature vapor-phase transport method are studied. At room temperature, ZnO nanorods grown by the high temperature vapor-phase transport method exhibited only one, very strong UV emission peak at 382 nm. PL spectra from the ZnO nanorod samples grown by the low temperature hydrothermal routes but using different chemicals, along with the UV band, contain violet or yellow-orange emission bands located at ~ 401 and ~ 574 nm, respectively. The violet band is attributed to Zn vacancy related defects or their complexes, and the yellow-orange broad emission band is ascribed to oxygen interstitial related defects.