

УДК 535-37, 548-52

МИКРОТРУБКИ ZnO: МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНЫЙ ЭФФЕКТ НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

© 2025 г. А. П. Тарасов^{1,*}, Л. А. Задорожная¹, Б. В. Набатов¹, В. М. Каневский¹

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: tarasov.a@crys.ras.ru

Поступила в редакцию 04.11.2024 г.

После доработки 19.11.2024 г.

Принята к публикации 19.11.2024 г.

С помощью фотолюминесцентной спектроскопии исследованы люминесцентные и лазерные свойства микротрубок ZnO, синтезированных модифицированным методом термического испарения. Показано, что лазерная генерация в ближнем УФ-диапазоне возбуждается на модах шепчущей галереи. Продемонстрирована возможность достижения низких порогов лазерной генерации (вплоть до ~ 8 кВт/см²) и высоких оптических добротностей (свыше 3900). Предложен механизм формирования таких микрокристаллов, основанный на предположении об одновременном росте и травлении вдоль кристаллографического направления [0001].

DOI: 10.31857/S0023476125010058, EDN: ITUTWB

ВВЕДЕНИЕ

Оксид цинка ZnO – широкозонный полупроводник, который активно применяется в научных разработках и промышленности [1, 2]. Одной из областей применения ZnO являются оптоэлектронные технологии благодаря его оптическим, электронным и сцинтилляционным свойствам [3–8]. В частности, ZnO считается перспективной основой для УФ-лазеров, включая микро- и нанолазеры [3, 9–11]. Среди таких устройств наиболее эффективными с точки зрения лазерных порогов и оптических добротностей являются микролазеры с модами шепчущей галереи (МШГ) [12, 13]. Наиболее простой способ реализовать такие устройства – синтез микрокристаллов с гексагональной геометрией, таких как микровисеры, микропирамиды, микродиски, многогранные микрокристаллы, демонстрирующие усиление света и лазерный эффект непосредственно после синтеза без дополнительной послеростовой обработки [12–18]. Среди всех морфологий таких микрокристаллов наиболее часто изучаются морфологии с ярко выраженным кристаллографическим направлением [0001]. Их примером являются микростержни и микровисеры.

Микрокристаллы с такой морфологией можно получать различными методами, среди которых наиболее популярным является метод газотранспортного синтеза [12]. В [19, 20] была продемонстрирована возможность синтеза данных структур

методом пиролитического карботермального синтеза (ПКС), разработанного в Институте кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН [21, 22]. При этом удавалось синтезировать достаточно крупные микростержни диаметром до 20 мкм, поддерживающие лазерную генерацию на МШГ. ПКС является по сути модификацией метода термического испарения, он сохраняет многие преимущества этого метода, включая относительную простоту и безопасность синтеза. Одновременно он предоставляет широкие возможности для изготовления структур с различной морфологией, включая порошки [22], пленки [23], микрокристаллы на подложках [19, 20].

В настоящей работе продемонстрирована возможность синтеза микротрубок (полых или “отрицательных” микростержней) с МШГ методом ПКС. Показано, что такие микроструктуры могут обладать не только низкими лазерными порогами [24], но и высокими оптическими добротностями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Микротрубки ZnO были синтезированы на подложках сапфира (0001) с помощью метода ПКС. В качестве прекурсора использовали гранулы цинка чистотой 99.999% (Alfa Aesar, США). Синтез проводили в корундовом тигле в течение 30 мин при температуре 1050°C. В целом параметры синтеза аналогичны использованным ранее при росте микростержней ZnO с относительно небольшим диаметром 1–6 мкм [25], но образец располагался ближе к окну в тигле – источнику кислорода.

Микроскопические исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Jeol JSM-6000PLUS. ФотOLUMИНЕСЦЕНЦИЮ (ФЛ) структуры исследовали при комнатной температуре с использованием низкоинтенсивного квазинепрерывного оптического возбуждения (частота вспышек ксеноновой лампы 80 Гц) и относительно мощного импульсного оптического возбуждения. В первом случае использовали спектрофлуориметр Varian Cary Eclipse, оборудованный ксеноновой лампой и фотоэлектронным умножителем, при этом для возбуждения ФЛ использовали излучение с длиной волны 315 нм. Высокоинтенсивное возбуждение осуществлялось в результате воздействия излучением третьей гармоники Nd:YAG-лазера, обеспечивающего импульсное излучение с длиной волны 355 нм, частотой повторения 15 Гц и длительностью импульсов 10 нс. Диаметр пятна возбуждения на образце составлял ~100 мкм. В последнем случае регистрация ФЛ (как отдельных микроотрубок, так и их массивов) осуществлялась с помощью монохроматора МДР-206, совмещенного с фотоэлектронным умножителем. Геометрия эксперимента соответствовала более ранним исследованиям микроотрубок ZnO [19, 25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена микрофотография одной из синтезированных микроотрубок ZnO. Микроотрубки представляют собой стержни длиной 40–60 мкм с узким основанием, более толстой верхней частью и полостью в ней. Средний диаметр верхней части составляет ~10 мкм. В целом синтезированные микрокристаллы по своей морфологии схожи с полученными ранее [25], однако характеризуются большими размерами, что, по-видимому, связано с большим притоком кислорода.

Для исследования была выбрана область образца около его края с массивом микроотрубок

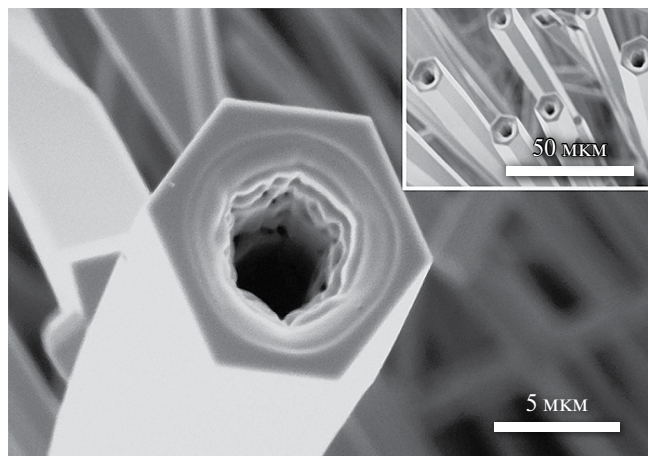


Рис. 1. РЭМ-изображение микроотрубки ZnO (на вставке показан массив микроотрубок).

(вставка на рис. 1). Электронно-микроскопические исследования этой области указывают на то, что полости присутствуют во всех микрокристаллах диаметром более 6–7 мкм.

В [24], где также были получены микроотрубки ZnO из газовой фазы, предполагается следующий механизм формирования таких микрокристаллов. Рост кристалла происходит в основном в направлении [0001] в результате самокаталитического процесса пар–жидкость–кристалл, когда капля цинка служит одновременно и зародышем, и катализатором роста. При этом оксидом в начале зарастают боковые поверхности капли, что в результате приводит к формированию структуры стержня ядро–оболочка Zn/ZnO. Затем Zn, имея относительно небольшую температуру плавления (~419.5°C), испаряется с поверхности (0001), что приводит к формированию микроотрубки.

Однако после изучения РЭМ-изображений образцов, полученных методом ПКС, представляется наиболее вероятным другой механизм формирования отрицательных (полых) микрокристаллов ZnO. Помимо того что металлический Zn относится к группе легкоплавких металлов, он достаточно летуч (температура испарения равна 906°C при атмосферном давлении). Благодаря этому в условиях ПКС легко может быть достигнута концентрация паров Zn, достаточная для осаждения его на поверхность уже выросших или растущих микрокристаллов – микроотрубок. Это происходит, если масса цинка, реагирующая с кислородом, меньше массы избыточного Zn, в этом случае металлический цинк будет продолжать конденсироваться во время синтеза, но уже с меньшей скоростью, при этом размер капель жидкого цинка на торцах растущих микрокристаллов будет увеличиваться. При довольно высокой температуре кристаллизации (950–1050°C) на стадии охлаждения на поверхности уже выросших относительно небольших микрокристаллов хорошо заметны образования неправильной овальной формы (рис. 2а).

Капелька сплава ZnO–Zn на грани (0001) микроотрубка служит участком преимущественного газового травления в соответствии с механизмом кристалл–жидкость–пар (этот механизм был предложен в [26] как обратный механизму роста пар–жидкость–кристалл). Эта капля углубляется в кристалл, причем сообразно с симметрией грани (0001). В результате на торце микроотрубка практически всегда формируется гексагональная ямка с плоским дном, не обязательно в центре торца (рис. 2б). Считается, что такие ямки обусловлены примесными включениями [27] в отличие от остroвершинных ямок, связанных с дислокациями [28]. При этом под примесью наряду с чужеродными элементами здесь надо понимать и избыток компонента кристаллизующего соединения, и составляющие газовой смеси при химическом осаждении

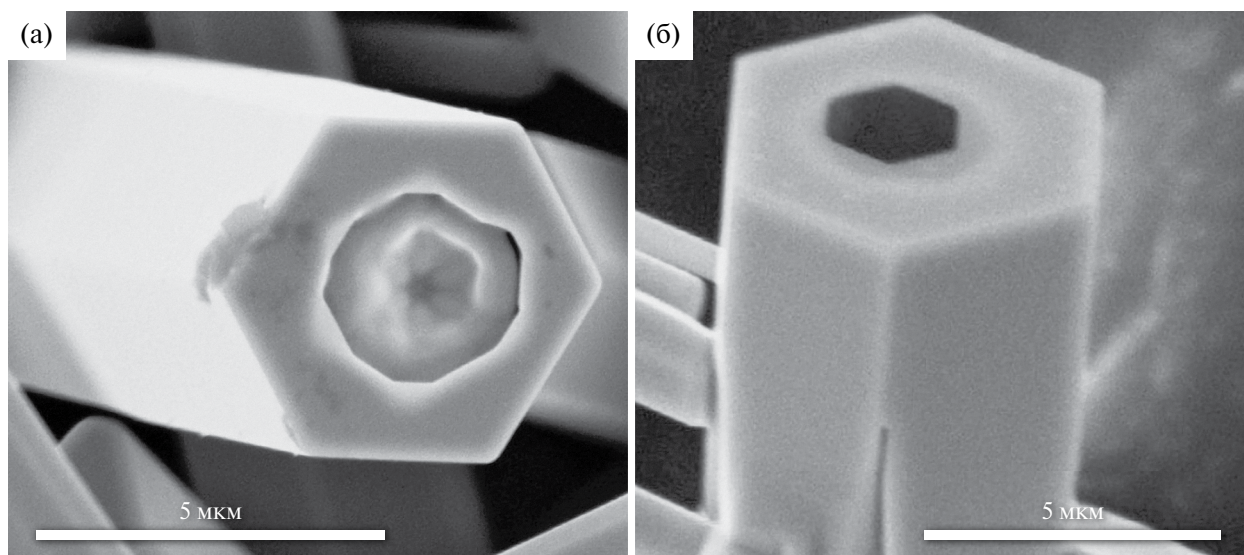


Рис. 2. РЭМ-изображения микростержней ZnO: а — начало процесса травления микростержня со стороны поверхности (0001), б — образование гексагональной ямки на торце микростержня.

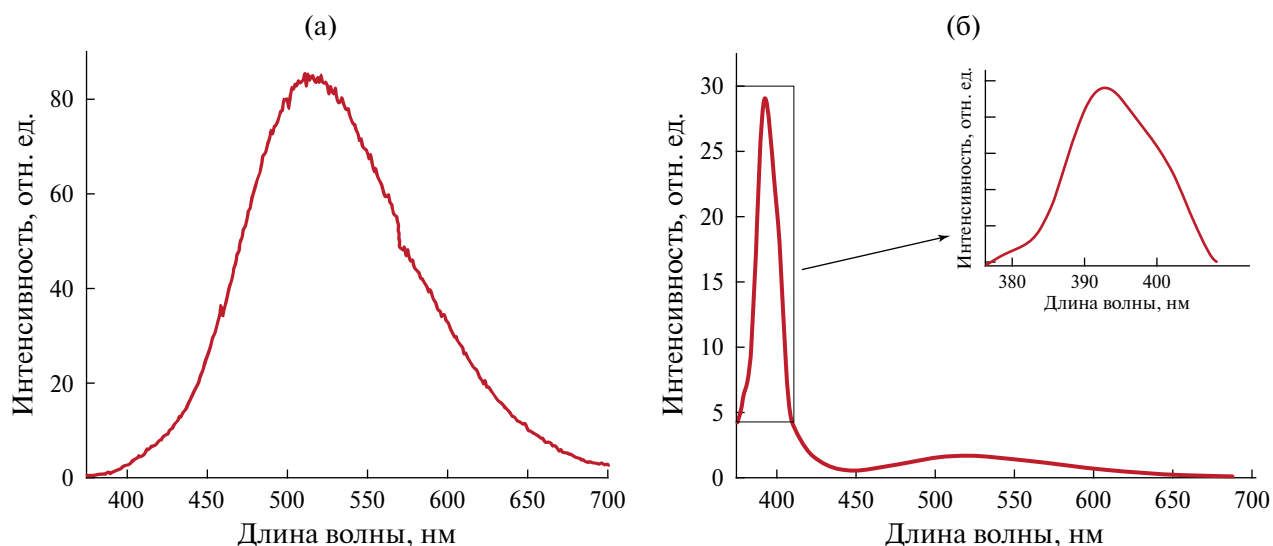


Рис. 3. Спектры ФЛ массива микротрубок ZnO, зарегистрированные при низкоинтенсивном квазинепрерывном возбуждении (а) и импульсном лазерном возбуждении с плотностью мощности $\rho_{\text{exc}} \sim 6 \text{ кВт/см}^2$ (б).

из паровой фазы. Таким образом, избыток Zn в газовой среде выполняет роль нативной (собственной) примеси, инициирующей процесс испарения кристаллов.

На рис. 3 приведены спектры ФЛ массива микротрубок, зарегистрированные при низкоинтенсивном квазинепрерывном возбуждении (а) и импульсном лазерном возбуждении с относительно низкой плотностью мощности $\rho_{\text{exc}} \sim 6 \text{ кВт/см}^2$ (б). В полученных спектрах просматриваются несколько различий. В первую очередь наблюдается различное число полос излучения. Если в спектре на рис. 3б наблюдаются две полосы излучения —

в ближней УФ и видимой частях спектра, то в спектре на рис. 3а присутствует только полоса видимой люминесценции. При этом параметры полосы видимой люминесценции — положение (λ_m) и ширина на половине высоты (FWHM) — оказываются примерно одинаковыми: в случае непрерывного возбуждения λ_m и FWHM составляют 516 и 117 нм соответственно; при импульсном возбуждении эти параметры равны 518 и 119 нм. Положение λ_m и полуширина FWHM полосы УФ-излучения в спектре на рис. 3б равны 393 и 17 нм соответственно. Эта полоса известна как близкраевое излучение ZnO. При этом в исследованном случае УФ-полоса

явно сама состоит из нескольких компонент: около основного максимума наблюдается коротковолновое плечо в области ~ 380 нм (вставка на рис. 3б).

Исследования микроструктур ZnO, проведенные при различных температурах [29, 30], позволяют понять механизмы люминесценции микротрубок. Так, излучение с максимумом в области 380 нм обусловлено главным образом первым фоновым повторением рекомбинационного излучения свободного экситона. Основная полоса с максимумом на 393 нм связана с рассеянием экситонов на свободных электронах. Это подтверждается дальнейшим исследованием поведения ближнего излучения при различных уровнях фотовозбуждения. Полоса видимого (зеленого) излучения обусловлена переходами с участием глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне ZnO, связанных с дефектами кристаллической решетки, преимущественно вакансиями кислорода в различных зарядовых состояниях [31, 32].

Причиной отсутствия ближнего излучения при низкоинтенсивном возбуждении может являться изгиб энергетических зон вследствие существования избыточного заряда на поверхности полупроводника. Такой изгиб способствует образованию обедненного слоя и пространственному разделению образованных вследствие возбуждения электронов и дырок, что препятствует их излучательной рекомбинации [33]. При достаточно мощном возбуждении большое число созданных носителей приводит к нейтрализации избыточного поверхностного заряда и, как следствие, к спрямлению энергетических зон. В результате вероятность рекомбинации с испусканием фотона увеличивается. Повышение уровня возбуждения также приводит к насыщению центров видимой

люминесценции [34] и, следовательно, относительному росту ближнего излучения.

Для изучения лазерного эффекта в отдельных микротрубках часть кристаллов соскоблили на чистую кремниевую подложку. Далее микрокристаллы с помощью тонкой иглы. На рис. 4а показана эволюция спектров ближнего излучения одной из таких микротрубок при увеличении плотности мощности ρ_{exc} импульсного лазерного возбуждения. При относительно низком уровне возбуждения с $\rho_{\text{exc}} = 7$ кВт/см² спектр представлен полосой спонтанного излучения аналогично описанному ранее (рис. 3б). При увеличении ρ_{exc} выше 8–9 кВт/см² в спектре появляются узкие линии в области максимума люминесцентной полосы, интенсивность которых быстро растет с увеличением ρ_{exc} . С ростом уровня возбуждения появляются новые линии преимущественно в длинноволновой части УФ-спектра. С увеличением ρ_{exc} интенсивность линий растет быстрее, чем интенсивность полосы спонтанной люминесценции. Это отражает построенная на рис. 4б зависимость интенсивности от ρ_{exc} в области наиболее интенсивной лазерной линии с длиной волны ~ 392.05 нм. На графике виден резкий излом при $\rho_{\text{exc}} \sim 8$ кВт/см², что соответствует порогу лазерного эффекта в микротрубке.

В целом исследуемая микроструктура демонстрирует не только низкие лазерные пороги, но и высокие оптические добротности. Так, на рис. 5 приведен спектр лазерной генерации одного из микрокристаллов при $\rho_{\text{exc}} \sim 0.1$ МВт/см². Учитывая спектральное положение (392–393 нм) и FWHM (0.1 нм) отдельных лазерных линий, получаем добротность более 3900. Это значение оказывается

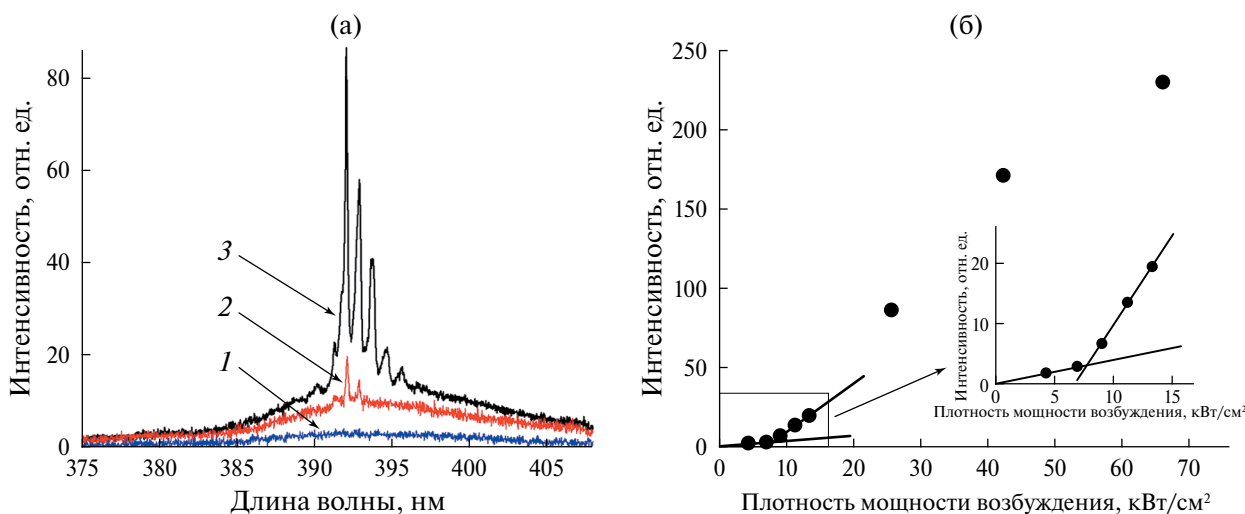


Рис. 4. Спектры ближнего излучения микротрубки ZnO при различных плотностях мощности возбуждения ρ_{exc} : 1 – 7, 2 – 13, 3 – 26 кВт/см² (а); зависимость интенсивности от ρ_{exc} в области наиболее интенсивной лазерной линии с длиной волны ~ 392.05 нм (б).

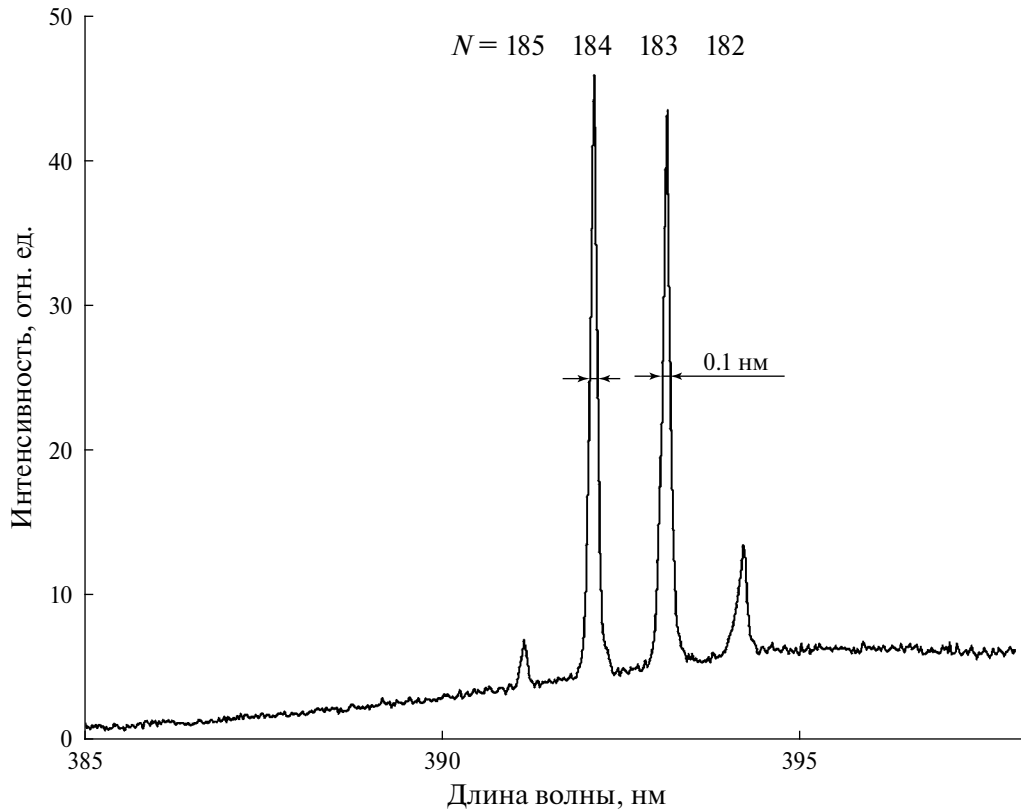


Рис. 5. Спектр лазерной генерации одной из микротрубок ZnO при $\rho_{\text{exc}} \sim 0.1$ МВт/см².

сравнимо и даже часто выше, чем в случае других высококачественных микрокристаллических лазеров с МШГ на основе ZnO [10, 11, 14, 19, 35].

В микрокристаллах ZnO лазерная генерация наблюдается с участием двух основных типов оптических мод – мод Фабри–Перо (МФП) и МШГ. Дисперсия показателя преломления в ближнем УФ-диапазоне для микрокристаллов ZnO, синтезированных методом ПКС, определяется выражением [19, 36]:

$$n(\lambda) = \left(A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C^2} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E^2} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где параметры $A = 4.693$, $B = 0.197$, $C = 176.06$, $D = 0.0435$, $E = 375.99$.

Оценить длину L резонатора с МФП можно по формуле

$$L = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda(n(\lambda) - \lambda dn/d\lambda)}, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda$ – расстояние между соседними лазерными линиями [37]. Учитывая, что в исследуемом случае $\Delta\lambda = 0.8\text{--}1$ нм, оценка по формуле (2) дает $L = 15\text{--}19$ мкм, что меньше длин микротрубок.

С другой стороны, оценки с использованием модели планарного гексагонального МШГ-резонатора указывают, что наблюдаемая спектральная картина соответствует лазерному эффекту на МШГ. Согласно этой модели длина волны МШГ с номером N определяется выражением

$$\lambda_{WGM} = \frac{1.5\sqrt{3}n(\lambda)D}{N + \frac{6}{\pi} \tan^{-1}\left(n(\lambda)\sqrt{3n(\lambda)^2 - 4}\right)}, \quad (3)$$

где D – диаметр гексагонального резонатора [12, 38]. В данном случае рассматриваем только моды ТЕ-типа, так как ТМ-моды в ближкраевой области обычно гораздо слабее [39, 40]. Для простоты считаем, что полость в микрокристалле не влияет на длину волны мод (3). Найдем с помощью (3) диаметр микротрубки, соответствующий спектру на рис. 5. Для этого нужно совместить на одном графике зависимости $\lambda(D)$ три типа линий: линии по формуле (3) для разных N , горизонтальные линии, соответствующие экспериментально наблюдаемым положениям лазерных линий, и вертикальную линию, соответствующую определенному диаметру. На рис. 6 построен такой график для N в диапазоне 179–188. Наиболее точное пересечение линий достигается при диаметре ~ 12.05 мкм, что

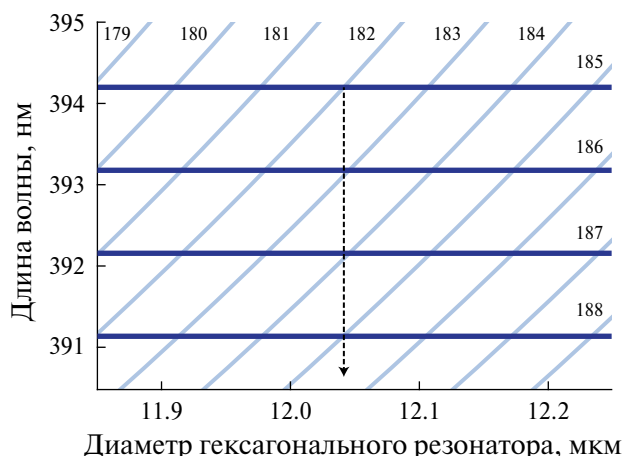


Рис. 6. Смоделированная по формуле (3) зависимость $\lambda_{\text{WGM}}(D)$ для МШГ с ТЕ-поляризацией (косые кривые) и экспериментально зарегистрированные спектральные положения лазерных линий (горизонтальные линии) согласно рис. 5. Стрелка соответствует диаметру D , при котором наблюдается наиболее точное совпадение положений лазерных линий и соседних ТЕ-мод.

соответствует диаметрам верхней части исследуемых микротрубок. При этом номера мод, соответствующие лазерным линиям, равны 185, 184, 183, 182. Они также указаны на рис. 5.

Возникновение лазерной генерации в области 392–394 нм и интенсивное красное смещение области генерации с ростом уровня накачки также указывают на формирование усиления на МШГ [29]. При этом механизм усиления служит экситон-электронное рассеяние, которое может иметь место в оптически и геометрически качественных микрокристаллах ZnO при комнатной температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы излучательные свойства микротрубок ZnO в ближнем УФ и видимом диапазонах длин волн. Микротрубки синтезированы методом пиролитического карботермального синтеза, являющимся по сути модификацией метода термического испарения. Выявлены и интерпретированы различия в спектрах люминесценции структуры при различных уровнях фотовозбуждения. Показана возможность возбуждения лазерной генерации на модах шепчущей галереи в отдельных микротрубках в ближней УФ-области. При этом удается достичь чрезвычайно низких лазерных порогов — вплоть до 8 кВт/см² и достаточно высоких оптических добротностей — свыше 3900. Отмечено, что оптическое усиление обеспечивается процессом рассеяния экситонов на свободных электронах.

Авторы выражают благодарность И.С. Волчкову за помощь в проведении РЭМ-исследования образцов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00535 (<https://rscf.ru/project/23-29-00535/>), с использованием оборудования центра коллективного пользования “Структурная диагностика материалов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morkoc H., Ozgur U.* Zinc oxide: fundamentals, materials and device technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
2. *Sharma D.K., Shukla S., Sharma K.K., Kumar V.* // Mater. Today. 2022. V. 49. P. 3028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>
3. *Klingshirn C.F.* Semiconductor Optics. Berlin: Springer, 2012.
4. *Srivastava V., Gusain D., Sharma Y.C.* // Ceram. Int. 2013. V. 39. P. 9803. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.110>
5. *Oprea O., Andronescu E., Ficai D. et al.* // Curr. Org. Chem. 2014. V. 18. P. 192.
6. *Uikey P., Vishwakarma K.* // Int. J. Emerg. Tech. Comp. Sci. Electron. 2016. V. 21. P. 239.
7. *Di Mauro A., Fragalà M.E., Privitera V., Impellizzeri G.* // Mater. Sci. Semicond. Process. 2017. V. 69. P. 44. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.03.029>
8. *Тарасов А.П., Венецьев И.Д., Муслимов А.Э. и др.* // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. С. 366.
9. *Znaidi L., Illia G.S., Benyahia S. et al.* // Thin Solid Films. 2003. V. 428. P. 257. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)01219-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)01219-1)
10. *Dong H., Zhou B., Li J. et al.* // J. Materiomics. 2017. V. 3. P. 255. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2017.06.001>
11. *Tashiro A., Adachi Y., Uchino T.* // J. Appl. Phys. 2023. V. 133. P. 221101. <https://doi.org/10.1063/5.0142719>
12. *Xu C., Dai J., Zhu G. et al.* // Las. Photon. Rev. 2014. V. 8. P. 469. <https://doi.org/10.1002/lpor.20130012>
13. *Yang Y.D., Tang M., Wang F.L. et al.* // Photonics Res. 2019. V. 7. P. 594. <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000594>
14. *Chen R., Ling B., Sun X.W., Sun H.D.* // Adv. Mater. 2011. V. 23. P. 2199. <https://doi.org/10.1002/adma.201100423>
15. *Michalsky T., Wille M., Dietrich C.P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 211106. <https://doi.org/10.1063/1.4902898>
16. *Qin F., Xu C., Lei D.Y. et al.* // ACS Photonics. 2018. V. 5. P. 2313. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b00128>
17. *Tarasov A.P., Muslimov A.E., Kanevsky V.M.* // Photonics. 2022. V. 9. P. 871. <https://doi.org/10.3390/photonics9110871>

18. Тарасов А.П., Задорожная Л.А., Муслимов А.Э. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 114. С. 596. <https://doi.org/10.31857/S1234567821210035>
19. Тарасов А.П., Лавриков А.С., Задорожная Л.А., Каневский В.М. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. С. 554. <https://doi.org/10.31857/S1234567822090026>
20. Tarasov A.P., Zadorozhnaya L.A., Kanevsky V.M. // J. Appl. Phys. 2024. V. 136. P. 073102. <https://doi.org/10.1063/5.0214420>
21. Li L.E., Demianets L.N. // Opt. Mater. 2008. V. 30. P. 1074. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2007.05.013>
22. Демьянец Л.Н., Ли Л.Е., Лавриков А.С., Никутин С.В. // Кристаллография. 2010. Т. 55. С. 149.
23. Zadorozhnaya L.A., Tarasov A.P., Lavrikov A.S., Kanevsky V.M. // Comp. Opt. 2024. V. 48. P. 696. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1414>
24. Dong H., Sun L., Xie W. et al. // J. Phys. Chem. C. 2010. V. 114. P. 17369. <https://doi.org/10.1021/jp1047908>
25. Тарасов А.П., Задорожная Л.А., Каневский В.М. // Письма в ЖЭТФ. 2024. Т. 119. С. 875. <https://dx.doi.org/10.31857/S1234567824120024>
26. Wagner R.S. // J. Crystal Growth. 1968. V. 3/4. P. 159.
27. Kaldis E. // Crystal Growth and Characterization. Amsterdam: North Holland, 1975.
28. Sharma R.B. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 1866. <https://doi.org/10.1063/1.1659122>
29. Tarasov A.P., Muslimov A.E., Kanevsky V.M. // Materials. 2022. V. 15. P. 8723. <https://doi.org/10.3390/ma15248723>
30. Tarasov A.P., Ismailov A.M., Gadzhiev M.K. et al. // Photonics. 2023. V. 10. P. 1354. <https://doi.org/10.3390/photonics10121354>
31. Ozgur U., Alivov Y.I., Liu C. et al. // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 41301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
32. Ghosh M., Ningthoujam R.S., Vatsa R.K. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 054309. <https://doi.org/10.1063/1.3632059>
33. Zhang Z., Yates Jr. J.T. // Chem. Rev. 2012. V. 112. P. 5520. <https://doi.org/10.1021/cr3000626>
34. Guo B., Qiu Z.R., Wong K.S. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 2290. <https://doi.org/10.1063/1.1566482>
35. Dai J., Xu C.X., Wu P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 011101. <https://doi.org/10.1063/1.3460281>
36. Тарасов А.П., Брискина Ч.М., Маркушев В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. С. 750. <https://doi.org/10.1134/S0370274X19230073>
37. Zimmer M.A., Bao J., Capasso F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 051101. <https://doi.org/10.1063/1.2965797>
38. Czekalla C., Sturm C., Schmidt-Grund R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 241102. <https://doi.org/10.1063/1.2946660>
39. Wiersig J. // Phys. Rev. A. 2003. V. 67. P. 023807. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.67.023807>
40. Liu J., Lee S., Ahn Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 263102. <https://doi.org/10.1063/1.2952763>

ZnO MICROTUBES: FORMATION MECHANISM AND WHISPERING-GALLERY MODE LASING

A. P. Tarasov*, L.A. Zadorozhnaya, B. V. Nabatov, V. M. Kanevsky

Shubnikov Institute of Crystallography of Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics of NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*E-mail: tarasov.a@crys.ras.ru

Abstract. The luminescent and laser properties of ZnO microtubes synthesized by a modified thermal evaporation method were studied using photoluminescence spectroscopy. It was shown that whispering gallery modes are responsible for lasing in the near UV range. The possibility of achieving low lasing thresholds (down to $\sim 8 \text{ kW/cm}^2$) and high optical quality factors (over 3900) was demonstrated. A mechanism for the formation of such microcrystals was proposed, based on the assumption of simultaneous growth and etching along the [0001] crystallographic direction.