

Моды шепчущей галереи в многогранных микрокристаллах оксида цинка

А.П. Тарасов

Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и Фотоника" Российской академии наук
Москва, Россия
tarasov.a@crys.ras.ru

Аннотация—Разработка миниатюрных лазеров, работающих в УФ диапазоне, равно как и изучение природы вынужденного излучения в таких устройствах – важная задача современных лазерной физики и оптоэлектроники. В работе исследуется лазерный эффект в УФ диапазоне в многогранных микрокристаллах оксида цинка – полезной структуре для изучения вынужденного излучения в ZnO при комнатной температуре. Показывается, что в лазерной генерации участвуют моды шепчущей галереи (МШГ), возбуждаемые в кристаллах с размерами ~ 10 – 15 мкм. Низкие пороги генерации на МШГ позволяют использовать экситонные механизмы рекомбинации для формирования оптического усиления.

Ключевые слова— ZnO, УФ, вынужденное излучение, лазерная генерация, экситонное излучение, моды шепчущей галереи, микрорезонатор, микрокристалл.

1. ВВЕДЕНИЕ

ZnO – широкозонный полупроводник, обладающий высоким коэффициентом оптического усиления в ближней УФ области [1,2]. Его лазерные свойства исследуются на протяжении многих лет, однако на данный момент остаются задачи как фундаментального, так и практического планов. В частности, существует задача снижения оптических потерь в микрорезонаторах ZnO, а также во многих случаях остаётся весьма спорным вопрос о природе вынужденного излучения (ВИ) в таких микрорезонаторах при комнатной температуре (КТ) [3]. Как было показано в работе [4], перспективной структурой для изучения ВИ и лазерной генерации (ЛГ) в ZnO при КТ являются многогранные микрокристаллы (далее – многогранники). Среди преимуществ этих кристаллов можно отметить большой диапазон размеров (от ~ 10 до 80 мкм) и малую плотность кристаллов на подложке, что делает их удобным объектом для изучения. В частности, исследования, проведенные в [4], позволили понять, что ВИ в многогранниках, дающее необходимое усиление для возбуждения в них ЛГ при КТ, вероятнее всего, появляется в результате рассеяния свободных носителей (преимущественно электронов) на свободных экситонах, по крайней мере, вблизи порога ЛГ. Переход в режим усиления в электронно-дырочной плазме возможен при превышении порога ЛГ и росте оптической накачки.

В представляемой работе приводятся оценки оптических мод в многогранниках в целях определения природы формируемого микрорезонатора. Установление типа микрорезонатора и получение результатов о характере оптических процессов, приводящих к ВИ в материале микрорезонатора, – необходимый этап в исследовании любого микролазера. В данном случае такое исследование дополнит представления о связи морфологии и размеров микрорезонатора ZnO с

возбуждаемым типом оптических мод и природой ВИ, обеспечивающего необходимое усиление для ЛГ на этих модах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования лазерной генерации (ЛГ) был использован образец ZnO содержащий многогранные микрокристаллы и изготовленный методом газофазного синтеза [4]. Возбуждение ЛГ осуществлялось с помощью 3-й гармоники импульсного Nd:YAG лазера (длина волны 355 нм, длительность импульса ~ 10 нс, частота повторения импульсов 15 Гц). Излучение образца регистрировалось с помощью монохроматора МДР-206, совмещенного с ПЗС-матрицей. Измерения проводились при комнатной температуре (КТ).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроизображение одного из многогранников, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), показано на рис. 1. ЛГ исследована в нескольких местах образца. На рис. 2 показаны спектры ЛГ, возникающей в двух различных кристаллах. При превышении пороговой накачки в обоих кристаллах возбуждаются две оптические моды.

Чаще всего в гексагональных микрокристаллах ZnO реализуются оптические микрорезонаторы либо с модами Фабри-Перо, возбуждаемые между парами противоположных граней кристалла, либо с модами шепчущей галереи (МШГ), возникающими при полном внутреннем отражении света на боковых гранях микрокристалла (обычно в плоскости, перпендикулярной с-оси кристалла) [5], иногда можно наблюдать оба типа мод. Принимая во внимание спектральное расстояние между лазерными линиями и размеры изучаемых многогранников, возбуждение мод типа Фабри-Перо между противоположными гранями микрокристаллов можно исключить.

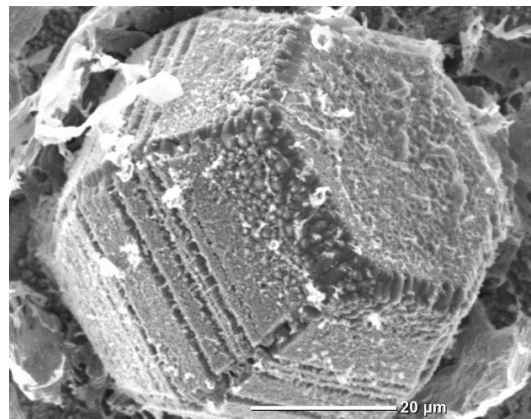


Рис. 1. Микрофотография многогранного микрокристалла ZnO

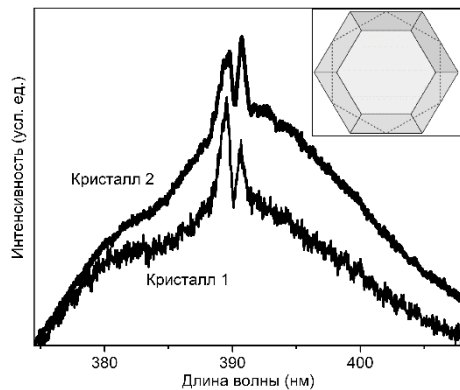


Рис. 2. Лазерные спектры двух многогранных микрокристаллов ZnO при накачке немного выше пороговой. На вставке – схематичное изображение МШГ в таком кристалле

В рассматриваемом случае реализуются МШГ в гексагональном сечении центральной части относительно небольших многогранников (см. вставку на рис. 2). В рамках простой планарной модели МШГ спектральное положение моды с ТЕ-поляризацией и номером N определяется выражением

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

где D – диаметр гексагонального резонатора, $n(\lambda)$ – показатель преломления в случае ТЕ-поляризации (вектор E перпендикулярен s -оси) [6]. На рис. 3 проиллюстрирована зависимость (1) для МШГ с ТЕ-поляризацией при использовании $n(\lambda)$ из [7] в двух диапазонах диаметров гексагональных сечений D , в которых наблюдается совпадение спектральных положений экспериментально наблюдаемых лазерных линий (рис. 2) и соседних ТЕ-мод. Обозначенный диапазон D (9,8 – 11,3 мкм) соответствует размерам многогранников, наблюдаемых с помощью РЭМ. В целом, использование различных литературных данных по $n(\lambda)$ (например, [7-9]) дает значения D менее 15 мкм, что соответствует относительно небольшим многогранникам, исследованным в эксперименте. Более крупные кристаллы демонстрируют только усиленное спонтанное излучение [4].

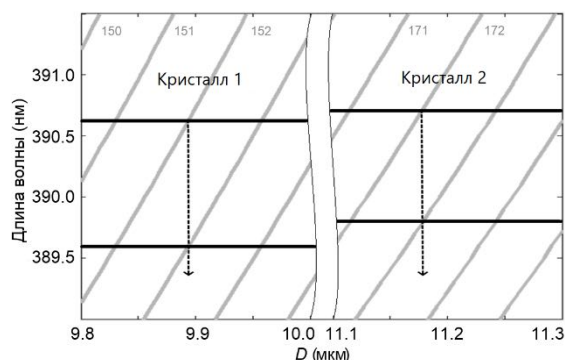


Рис. 3. Расчетные зависимости $\lambda_N(D)$ (серые кривые) и экспериментально наблюдаемые положения лазерных линий (горизонтальные прямые). Левая и правая части соответствуют кристаллам 1 и 2 на рис. 2

Рассмотрение МШГ с ТМ-поляризацией по (1) не дало разумных результатов при сравнении с экспериментом. Кроме того, известно, что ТМ-МШГ обладают меньшей интенсивностью по сравнению с ТЕ-модами [6], поэтому при околопороговых накачках ТМ-моды могут не наблюдаться.

По сравнению с модами Фабри-Перо в ZnO, МШГ чаще всего обеспечивают возможность более низкороговой ЛГ. Это позволяет использовать экситонные механизмы рекомбинации в формировании вынужденного излучения и необходимого для генерации оптического усиления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Форма многогранных микрокристаллов ZnO, их размеры и хорошее оптическое качество, обеспечиваемое ростом по механизму ПЖК, позволяют возбуждать в них лазерную генерацию на модах шепчущей галереи с достаточно низкими порогами, при этом вынужденное излучение формируют экситонные процессы рекомбинации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-3140.2022.1.2).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Klingshirn, C.F. Zinc oxide: from fundamental properties towards novel applications / C.F. Klingshirn, B.K. Meyer, A. Waag, A. Hoffmann, J. Geurts. – Berlin:Springer, 2010. – 365 p.
- [2] Klingshirn, C.F. Semiconductor optics / C.F. Klingshirn. – Berlin: Springer, 2012.
- [3] Klingshirn, C. Room-temperature stimulated emission of ZnO: Alternatives to excitonic lasing / C. Klingshirn, R. Hauschild, J. Fallert, H. Kalt // Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys. – 2007. – Vol. 75. – P. 115203.
- [4] Тарасов, А.П. Вынужденное излучение и лазерная генерация в многогранных микрокристаллах ZnO / А.П. Тарасов, Л.А. Задорожная, А.Э. Муслимов, Ч.М. Брискина, В.М. Каневский // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 114(9). – С. 596-603. DOI: 10.31857/S1234567821210035.
- [5] Dong, H. Ultraviolet lasing behavior in ZnO optical microcavities / H. Dong, B. Zhou, J. Li, J. Zhan, L. Zhang // Journal of Materiomics. – 2017. – Vol. 3(4). – P. 255-266.
- [6] Czekalla, C. Whispering gallery mode lasing in zinc oxide microwires / C. Czekalla, C. Sturm, R. Schmidt-Grund, B. Cao, M. Lorenz, M. Grundmann // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – P. 241102.
- [7] Park, Y.S. Index of refraction of ZnO / Y.S. Park, J.R. Schneider // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39. – P. 3049-3052.
- [8] Morkoc, H. Zinc oxide: Fundamentals, materials and device technology / H. Morkoc, U. Ozgur. – Weinheim: Wiley-VCH, 2009. – 490 p.
- [9] Тарасов, А.П. Анализ лазерной генерации тетраподоов ZnO, полученных методом карботермического синтеза / А.П. Тарасов, Ч.М. Брискина, В.М. Маркушев, Л.А. Задорожная, А.С. Лавриков, В.М. Каневский // Письма в ЖЭТФ. – 2019. – Т. 110, № 11. – С. 750-754. DOI: 10.1134/S0370274X19230073.