

# Механизмы вынужденного излучения в микростержнях ZnO большого диаметра с модами шепчущей галереи

А.П. Тарасов

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и Фотоника" Российской академии наук*

Москва, Россия

tarasov.a@crys.ras.ru

**Аннотация** — Работа посвящена исследованию природы вынужденного излучения при различных температурах в микростержнях ZnO с диаметрами порядка 10 мкм и более, демонстрирующих лазерный эффект на модах шепчущей галереи. Лазерная генерация таких микростержней обладала низкими порогами (вплоть до 10 – 20 кВт/см<sup>2</sup>) и проявляла характерное красное смещение контура усиления при увеличении уровня накачки. Показано, что в различных температурных интервалах основной механизм оптического усиления определяется различными экситонными процессами. В частности, при комнатной температуре вынужденное излучение обусловлено в основном процессом экситон-электронного рассеяния.

**Ключевые слова** — ZnO, УФ, вынужденное излучение, лазерная генерация, экситонное излучение, моды шепчущей галереи, микрорезонатор, микростержень

## 1. ВВЕДЕНИЕ

ZnO – широкозонный полупроводник, обладающий высоким коэффициентом оптического усиления в ближней УФ области [1]. 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).

Среди различных микролазеров ZnO наиболее перспективными с точки зрения достижения низких порогов лазерной генерации и высоких оптических добротностей являются микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ). Вследствие полного внутреннего отражения и, как результат, низких оптических потерь, такие микролазеры демонстрируют гораздо лучшую энергоэффективность в сравнении с их аналогами на модах Фабри-Перо [2,3]. Однако вопрос о природе оптического усиления в таких микролазерах, особенно при КТ остается открытым. В настоящей работе исследуются механизмы ВИ в микростержнях ZnO, поддерживающих низкопороговую лазерную генерацию на МШГ в УФ области.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Микростержни ZnO выращивались методом пиролитического карботермального синтеза. Синтезированные микростержни обладали идеальной призматической формой с гексагональным сечением (рис. 1). Диаметры микростержней, составляя в среднем по образцу 12 мкм, достигали в некоторых случаях 20 мкм. Возбуждение лазерной генерации в образце

осуществлялось с помощью 3-й гармоники импульсного Nd:YAG лазера (355 нм, 10 нс, 15 Гц). Подробнее о методах роста и исследования излучательных свойств микростержней ZnO см. [4].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены спектры лазерной генерации одного из исследуемых микростержней ZnO при различных плотностях мощности возбуждения  $\rho_{\text{exc}}$ . Порог лазерного эффекта в данном случае составляет ~ 13 кВт/см<sup>2</sup>. В работе [4] было показано, что лазерная генерация в таких микростержнях возбуждается на МШГ. На рис. 2 заметно, что при увеличении  $\rho_{\text{exc}}$  происходит заметное смещение максимума контура оптического усиления в длинноволновую сторону.

Установлению природы оптического усиления такого типа (с характерным красным смещением при увеличении уровня возбуждения) способствовало изучение особенностей усиленного спонтанного излучения (УСИ) подобных достаточно крупных микрокристаллов ZnO с МШГ в зависимости от  $\rho_{\text{exc}}$  и температуры.

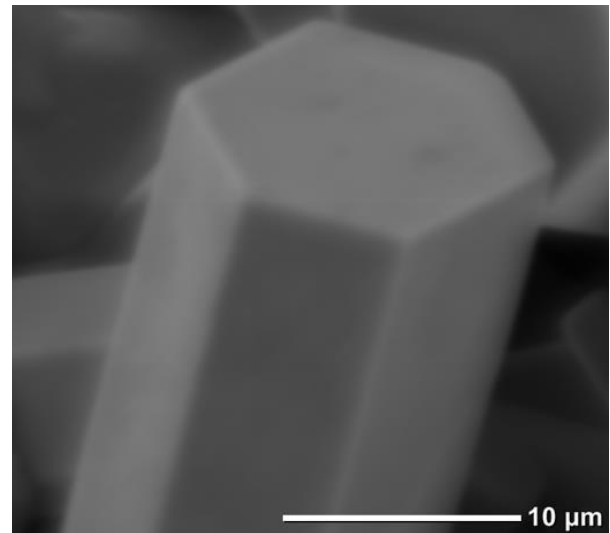


Рис. 1. Микрофотография микростержня ZnO

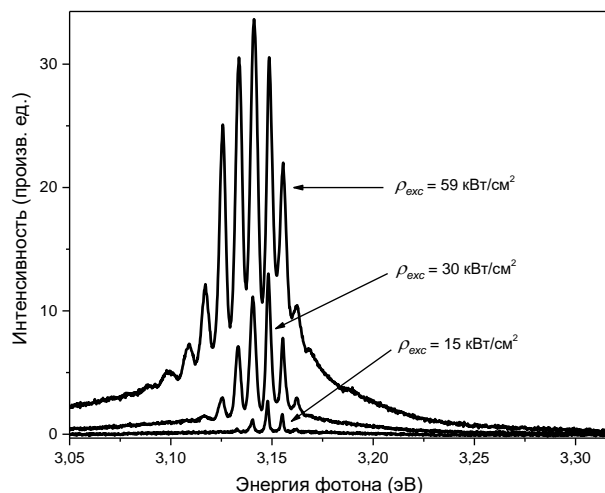


Рис. 2. Спектры УФ лазерной генерации микроstructures ZnO при различных  $\rho_{\text{exc}}$

Так, в [5] в результате исследования спектрального поведения УСИ многогранных изометричных микрокристаллов ZnO при изменении  $\rho_{\text{exc}}$  был исключен механизм прямой рекомбинации в электронно-дырочной плазме, как источник оптического усиления, и предположено участие экситонов в ВИ микроstructures при КТ. Учитывая даже более низкие лазерные пороги изучаемых микроstructures по сравнению с многогранными микрокристаллами (в случае последних пороги были  $\sim 50$  кВт/см<sup>2</sup>), аналогичный вывод можно сделать и для микроstructures, демонстрирующих излучение со схожим спектральным поведением. Поскольку известно несколько видов экситонных процессов, способных по разным данным приводить к оптическому усилению в ZnO, для определения тех, что имеют место в исследуемом случае, низкотемпературные измерения оказались чрезвычайно полезными. На рис. 3 показана температурная зависимость положения максимума спектра УСИ микроstructures (точки). Проведенный анализ выявил экситонные процессы, ответственные за оптическое усиление в микроstructures: экситон-экситонное рассеяние ( $X-X$ ); второе фононное повторение излучения свободных экситонов ( $X-2LO$ ); экситон-электронное рассеяние ( $X-el$ ). При этом в различных интервалах температур основной процесс различен:  $X-X$  до  $\sim 170 - 180$  К;  $X-2LO$  в интервале  $200 - 250$  К;  $X-el$  – от  $250$  К до КТ.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что различные экситонные механизмы ответственны за оптическое усиление в микроstructures ZnO большого диаметра, поддерживающих лазерную генерацию на модах шепчущей галереи с низкими порогами и характерным красным смещением профиля при увеличении уровня накачки.

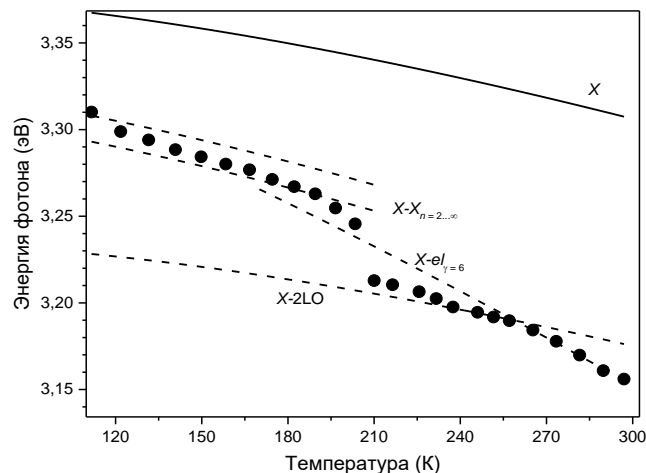


Рис. 3. Температурные зависимости максимума УСИ микроstructures (точки), рекомбинационной энергии свободных экситонов  $X$  (сплошная линия) по [6], а также  $X-X$ ,  $X-2LO$  и  $X-el$  (пунктирные линии)

В частности, при комнатной температуре вынужденное излучение обусловлено в основном процессом экситон-электронного рассеяния. Результаты исследования позволяют по-новому взглянуть на природу оптического усиления такого типа, поскольку ранее считалось, что в большинстве случаев оно обеспечивается прямой рекомбинацией в электронно-дырочной плазме (см., например, [7]).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного грантом 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 // edited by R. Hull, C. Jagadish, R.M. Osgood, Jr.J. Parisi, Z. Wang, H. Warlimont – Berlin:Springer, 2010 – 365 p.
- [2] 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.
- [3] Тарасов, А.П. Анализ лазерной генерации тетрапонов 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.
- [4] Тарасов, А.П. Низкопороговая лазерная генерация на модах шепчущей галереи в микроstructures ZnO большого диаметра / А.П. Тарасов, А.С. Лавриков, Л.А. Задорожная, В.М. Каневский // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 115(9) – С. 554-561. DOI: 10.31857/S1234567822090026.
- [5] 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.
- [6] Wang, L. Temperature dependence of the free-exciton transition energy in zinc oxide by photoluminescence excitation spectroscopy / L. Wang, N.C. Giles // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 94. – P. 973-978.
- [7] Xu, C. Whispering-gallery mode lasing in ZnO microcavities / C. Xu, J. Dai, G. Zhu, G. Zhu, Y. Lin, J. Li, Z. Shi // Las. Photon. Rev. – 2014. – Vol. 9. – P. 469-494.