



ZnO va ZnSe mikrokukunlarida lazer nuri ta'sirida uyg'otilgan luminesentsiya va lazerli nurlanish

Ilyos A. Raxmatullaev¹, Nikolay F. Bunkin², Quvonchbek H. Hoshimov³, Bobur A. Abdusattorov⁴

¹ DSc, prof., Alfraganus universiteti, Toshkent, 100190, O'zbekiston; i.rakhmatullaev@afu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-2348-7099>

² DSc, prof., N.E. Bauman nomidagi Moskva davlat texnika universiteti, Moskva, 105005, Rossiya; nbunkin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0802-6582>

³ Doktorant, Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti, Samarqand, 140104, O'zbekiston;
quvonchbekhoshimov648@gmail.com <https://orcid.org/0009-0009-8304-2209>

⁴ Stajor-tadqiqotchi, Samarqand davlat universiteti Kattaqo'rg'on filiali, Kattaqo'rg'on, 140814, O'zbekiston;
abdusattarovbobur86@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5262-4544>

Dolzarblik: ishning dolzarbligi shundan iboratki hozirgi vaqtda impuls-davriyli lazer nurlari ta'sirida ZnO va ZnSe mikrokukunlari fotoluminesentsiya spektrlarining shakllantirish mexanizmlari yetarlicha o'rganilmaganligidir.

Maqsad: impuls-davriyli lazer nuri ta'sirida ZnO va ZnSe mikrokukunlarida fotoluminesentsiya spektrlarini shakllantirish mexanizmlarini aniqlashdan iborat.

Usullar: ishda mualliflar tomonidan ishlab chiqilgan impuls-davriyli rejimda ishlaydigan mis bug'laridagi kompakt lazer asosidagi zamonaviy lazer spektroskopiyasi usuli qo'llanildi.

Natijalar: mis bug'laridagi impuls-davriyli lazer nurlanishida rux oksidi va rux seleni mikrokukunlarining fotoluminesentsiya (FL) spektrlari tadqiq etildi. O'rganilgan namunalarning FL spektrlarini shakllantirish mexanizmlari aniqlandi. Aniqlanishicha, 10^6 Vt/sm² lazerli nurlanish intensivligida rux oksidi va rux seleni mikrokukunlarida superluminesentsiya effekti kuzatildi. Tajribada, o'rganilgan namunalarda qo'zg'atuvchi nurlanish intensivligi oshganda FL spektri polosasining maksimumi 4 nm gacha siljishi kuzatildi.

Kalit so'zlar: luminesentsiya, lazer nurlanishi, rux oksidi, rux seleni, lazer, spektr.

Люминесценция и лазерное излучение в микропорошках ZnO и ZnSe при лазерном возбуждении

Илѣс А. Рахматуллаев¹, Николай Ф. Бункин², Кувончбек Х. Хошимов³,
Бобур А. Абдусаттаров⁴

¹ DSc, проф., Университет Альфраганус, Ташкент, 100190, Узбекистан; i.rakhmatullaev@afu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-2348-7099>

² DSc, проф., Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; nbunkin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0802-6582>

³ Докторант, Самаркандский государственный университет им. Шарофа Рашидова, Самарканд, 140104, Узбекистан;
quvonchbekhoshimov648@gmail.com <https://orcid.org/0009-0009-8304-2209>

⁴ Стажёр-исследователь, Каттакурганский филиал Самаркандского государственного университета, Каттакурган, 140814, Узбекистан; abdusattarovbobur86@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5262-4544>

Актуальность: заключается в том, что в настоящее время недостаточно исследованы механизмы формирования спектров фотolumинесценции в микропорошках ZnO и ZnSe, при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Цель: заключается в выяснении механизмов формирования спектров фотolumинесценции в микропорошках ZnO и ZnSe, при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Методы: в работе использован современный метод лазерной спектроскопии, разработанный авторами, на основе компактного лазера на парах меди, работающий в импульсно-периодическом режиме.

Результаты: исследованы спектры фотolumинесценции (ФЛ) микропорошков оксида цинка и селенида цинка при импульсно-периодическом излучением лазера на парах меди. Выявлены механизмы формирования спектров ФЛ изученных образцов. Обнаружено, что при интенсивностях 10^6 Вт/см² лазерного излучения в микропорошках оксида и селенида цинка наблюдаются эффект суперлюминесценции. Установлено, что при повышении интенсивности возбуждающего излучения в исследованных образцов наблюдается сдвиг максимума полосы спектра ФЛ до 4 нм.

Ключевые слова: люминесценция, лазерное излучение, оксид цинка, селенид цинка, лазер, спектр.

Luminescence and lasing in ZnO and ZnSe micropowders under laser excitation

Ilyos A. Rakhmatullaev¹, Nikolay F. Bunkin², Quvonchbek H. Hoshimov³,
Bobur A. Abdusattorov⁴

¹ DSc, prof., Alfraganus University, Tashkent, 100190, Uzbekistan; i.rakhmatullaev@afu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-2348-7099>

For citation: Rakhmatullaev I.A., Bunkin N.F., Hoshimov Q.H., Abdusattorov B.A., Luminescence and lasing in ZnO and ZnSe micropowders under laser excitation. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 1, pp. 90-99.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15095544>

Received: 14.01.2025

Revised: 7.02.2025

Accepted: 18.03.2025

Published: 25.03.2025

Copyright: © Ilyos A. Rakhmatullaev, Nikolay F. Bunkin, Quvonchbek H. Hoshimov, Bobur A. Abdusattorov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/>)



² DSc, prof., N.E.Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; nbunkin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0802-6582>

³ PhD student, Samarkand State University named after Sharof Rashidov, Samarkand, 140104, Uzbekistan;
quvonchbekhoshimov648@gmail.com <https://orcid.org/0009-0009-8304-2209>

⁴ Research intern, Kattakurgan Branch of Samarkand State University, Kattakurgan, 140814, Uzbekistan;
abdusattarovbobur86@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-5262-4544>

Relevance: is that the mechanisms of photoluminescence spectra formation in ZnO and ZnSe micropowders under pulsed-periodic laser excitation have not been sufficiently investigated at present.

The aim: is to elucidate the mechanisms of formation of photoluminescence spectra in ZnO and ZnSe micropowders under pulsed-periodic laser excitation.

Methods: a modern method of laser spectroscopy, developed by the authors, based on a compact copper vapour laser, operating in pulse-periodic mode, was used in this work.

Results: photoluminescence (PL) spectra of zinc oxide and zinc selenide micropowders under pulsed-periodic emission of copper vapour laser have been investigated. The mechanisms of formation of the PL spectra of the studied samples have been revealed. It is found that at intensities of 10^6 W/cm² of laser radiation in zinc oxide and zinc selenide micropowders the superluminescence effect is observed. It was found that at increasing intensities of excitation radiation in the studied samples a shift of the maximum of the PL spectrum band up to 4 nm is observed.

Keywords: luminescence, laser radiation, zinc oxide, zinc selenide, laser, spectrum.

1. Введение (Introduction)

В последние годы в мире непрерывно возрастает интерес к изучению физических особенностей микро- и наноструктур на основе оксида цинка (ZnO) и селенида цинка (ZnSe). Подобный интерес связан с разработкой современных методов получения этих материалов, а также с большим практическим применением. Масштабное применение данных объектов, обусловлены уникальной комбинаций оптических, энергетических, химических и других свойств, а также доступностью сырья и возможностью создания энергоэффективного и экологически приемлемого производства [1-6]. Помимо этого, в данных материалах в некоторых условиях можно наблюдать лазерного эффекта [7-12].

Имеется довольно много работ, посвященных лазерной генерации в микро- и наноструктурах ZnO, которая может возникать как в УФ [7,9,13], так и в видимой [6,10] областях спектра в виде узких линий. Тем не менее, точные механизмы процессов фотолюминесценции (ФЛ) в ультрафиолетовой (УФ) области спектра в наноструктур ZnO все еще являются предметом серьезных дискуссий [14]. В большинстве сообщений отмечается, что УФ излучение с очень низкой температурой 10°K связано с донорными экситонами, и нет единого мнения о механизме излучения при более высоких температурах. Из работ [14,15] известно, что интенсивность УФ максимума ФЛ увеличивается с уменьшением размера частиц, т.е. при переходе от микропорошков ZnO к нанопорошкам. В работе [15] выявлено, что интенсивность УФ пика ФЛ увеличивается с уменьшением размера наночастиц. С дальнейшим уменьшением размера наноразмерных частиц максимум видимой полосы слегка перемещается в голубую область, а интенсивность видимых полос ФЛ не увеличивается. В работе [16] обнаружено, что при плотности мощности возбуждающего излучения более 125 мкДж/см² наблюдается рост интенсивности ФЛ, которая растет нелинейно, при дальнейшем повышении интенсивности накачки. Такая зависимость интенсивности ФЛ от интенсивности накачки указывает на переход от спонтанного к стимулированному механизму УФ излучения. В работе [7] проведены исследования спектров «случайных» лазеров на ZnO, полученных за один импульс наносекундной накачки и показано, что эти спектры существенно отличаются от спектров, полученных при пикосекундной накачке.

В работе [11] ФЛ микропорошка ZnSe исследовалась при высоком уровне оптического возбуждения импульсным излучением Nd³⁺:YAG лазера с пороговой интенсивностью возбуждающего излучения 750 кВт/см². Лазерное излучение было обнаружено на длине волны 475 нм: свечение было обусловлено обратной связью усиленного излучения в тесно упакованных активных рассеивающих микрокристаллитах ZnSe. В работе [17] при двухфотонном возбуждении зеленой линией лазера на парах меди с интенсивностью возбуждающего излучения порядка 10^6 Вт/см² были получены спектры ФЛ: для полосы ФЛ в области 475 нм обнаружен переход от режима спонтанной люминесценции к стимулированной, т.е. к суперлюминесценции. При повышении интенсивности накачки наблюдалось сужение полосы двухфотонно-возбуждаемой люминесценции (ДВЛ), а максимум интенсивности спектра сдвигается в длинноволновую область.

Основная цель настоящей работы – выяснить механизмы формирования спектров фотолюминесценции в микропорошках ZnO и ZnSe, при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.



2. Материалы и методы исследования (Materials and Methods)

Для исследования использовались готовые микропорошки ZnO и ZnSe белого цвета от Sigma-Aldrich с чистотой 98%. Все исследования проводились при комнатной температуре. Образцы исследуемых порошков помещались в цилиндрическую кювету с окошками из кварца марки KY.

Для возбуждения и регистрации спектров ФЛ использовалась методика, детально описанная в работах [17-21]. Оптическое возбуждение образцов осуществлялось второй оптической гармоникой (ВОГ) зелёной линии (510,6 нм) генерации лазера на парах меди, соответствующее длине волны излучения $\lambda=255,3$ нм. Высокая пиковая мощность лазерного излучения позволяет осуществить эффективное удвоение и сложение частот линий генерации лазера путем использования нелинейно-оптических кристаллов (BaB_2O_4). Излучение от активного элемента лазера, работающего в режиме неустойчивого резонатора, фокусировалось длиннофокусной линзой в нелинейно-оптическом кристалле BaB_2O_4 . Кристалл был вырезан таким образом, что условие синхронизма выполнялось для удвоения частот исходного лазерного излучения. Таким образом, на выходе кристалла BaB_2O_4 возникало ультрафиолетовое излучение с длиной волны 255,3 нм. Излучение лазера видимого диапазона устранялось с помощью абсорбционного фильтра, помещаемого сразу после BaB_2O_4 . Средняя мощность излучения лазера - 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования (10^4 Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью 10^5 Вт. Коэффициент преобразования видимого излучения в ультрафиолетовое был около 1 %.

Ультрафиолетовое излучение направлялось на кювету. Рассеянное излучение собиралось системой кварцевых линз на входной щели монохроматора МСД-2. Спектральный диапазон монохроматора составлял 200–800 нм, обратная линейная дисперсия — 4,6 нм/мм. Перед входной щелью монохроматора (схема «на отражение») устанавливались абсорбционные светофильтры типа ПС-11 или ОС-11 для подавления возбуждающего излучения. Излучение после монохроматора регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-106, работающего в режиме счета фотонов. За счёт отвода малой доли возбуждающего излучения в строб-генераторе формировался импульс длительностью 30 нс. Этот импульс вводился в систему регистрации для синхронизации с импульсом люминесценции. Строб-импульс позволял регистрировать спектры ФЛ при различных временах задержки 0–300 нс. Дифракционная решетка спектрометра поворачивалась с помощью шагового двигателя, управляемого с помощью компьютера. Время накопления сигнала при фиксированном положении дифракционной решетки изменялось в диапазоне 0,1–100 с в зависимости от интенсивности регистрируемого сигнала ФЛ. Информация от регистрирующего устройства подводилась к компьютеру и накапливалась в цифровом виде с выводом на экран монитора компьютера. Толщина слоя составляла около 1 мм. Разрешение при регистрации спектров в измеряемом диапазоне длин волн составляло 0,1 нм.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Спектры ФЛ микропорошков ZnO различных размеров при их возбуждении ВОГ ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм) лазера на парах меди показаны на рис. 1. Как видно из этого рисунка, что наблюдаемый нами спектр ФЛ имеет максимум в области 385-390 нм. Наблюдаемые максимумы ФЛ образцов ZnO в области 385-390 нм соответствует положению 3L0 полосы из серий многофононной аннигиляции А-экситонов [22]. Как видно из рисунка, с уменьшением размера частица, максимум ультрафиолетовой полосы слегка перемещается в коротковолновую область. Спектральная интенсивность спектра ФЛ микропорошков ZnO $\lambda_{\text{макс}}=390$ нм для $d_{\text{ср}}=7$ мкм меньше соответствующей интенсивности пика ФЛ ($\lambda_{\text{макс}}=385$ нм) для образцов со средним размером частиц 3 мкм, примерно в 2 раза. Различие интенсивности и положение ФЛ этих спектров связано с тем, что между гранями частиц образуются поры, которые дают больший вклад рассеянному свету, чем эффективному поглощению квантов возбуждающего излучения, а также влиянием различных дефектов и напряжений, возникающим при больших интенсивностях лазерного излучения.

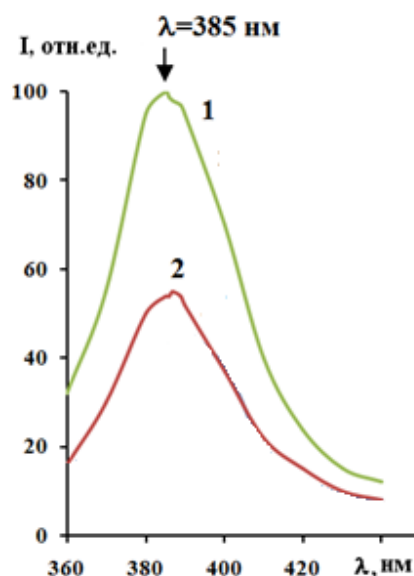


Рис.1. Спектры ФЛ микроструктур ZnO различных размеров при одних и тех же условиях возбуждения ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм): 1 - $d_{\text{cp}}=3$ мкм; 2 - $d_{\text{cp}}=7$ мкм ($I_{\text{возб}} \sim 10^6$ Вт/см²)

Fig.1. PL spectra of ZnO micropowders of various sizes under the same excitation conditions ($\lambda_{\text{exc}}=255.3$ nm): 1 - $d_{\text{mean}}=3$ μm ; 2 - $d_{\text{mean}}=7$ μm ($I_{\text{exc}} \sim 10^6$ W/cm²)

На рис.2. представлены спектры ФЛ микропорошков ZnO, полученных при разных интенсивностях накачки ($\lambda_{\text{возб}}=255,3$ нм). При малой интенсивности возбуждающего излучения спектр ФЛ, имеет максимум в области 386 нм (кривые 1 и 2). При высокой интенсивности возбуждающего излучения в полупроводниковых материалах с небольшими концентрациями примесей и дефектов происходит насыщение интенсивности излучательных переходов на примесные уровни, и этом случае особенно интересен следующий аспект многофононной аннигиляции свободных экситонов: возможность получения вынужденного излучения [22]. Известно, что инверсное распределение на свободном экситоне неосуществимо, в то время как при распаде экситона с испусканием фотона и фонона инверсия возникает автоматически. При интенсивности возбуждения более $15 \cdot 10^3$ Вт/см² (кривые 3-5) наблюдается сужение линии экситонной люминесценции, интенсивность которой растет нелинейно при дальнейшем повышении интенсивности накачки. Кроме того, наблюдается сужение полосы ФЛ, а максимум интенсивности спектра ФЛ сдвигается в длинноволновую область до 4 нм. При интенсивности возбуждения $24 \cdot 10^3$ Вт/см² (кривая 6), зависимость переходит на насыщение.

В работе [23] были проведены исследования динамики экситонной ФЛ для ZnO в зависимости от структуры образца и мощности возбуждающего излучения в диапазоне 80-1000 кВт/см². Для анализа интенсивности ФЛ (I) использовалось выражение:

$$I = \eta \cdot I_{\text{возб}}^{\alpha}; \quad (1)$$

где $I_{\text{возб}}$ – плотность мощности возбуждающего излучения, η – квантовый выход, α характеризует механизм излучательной рекомбинации.

Для экситонной рекомбинации $1 < \alpha < 2$, для фундаментального излучения $\alpha \approx 2$ и для переходов с примесных уровней $\alpha < 1$.

Действительно, при наших условиях эксперимента ($I_{\text{возб}} \sim 10^6$ Вт/см²), для микроструктур ZnO наблюдается степенная зависимость с $\alpha \approx 1,5$ (рис.3, кривая 3), что в случае объемного ZnO соответствует значению $\alpha=1,5 \pm 0,2$, найденного в работе [23]. При больших интенсивностях наступает замедление роста интенсивности ФЛ, которое может быть вызвано как тепловым воздействием, так и генерацией дефектов посредством фотолиза и термодеструкции. Похожая закономерность была наблюдаема в работе [14] для монокристаллов и квантовых точек (КТ) ZnO. Отсутствие видимой ФЛ в наших образцах ZnO указывает на низкую концентрацию или отсутствие дефектов кислорода [24,25] и высокой чистоты исследованных порошков ZnO.

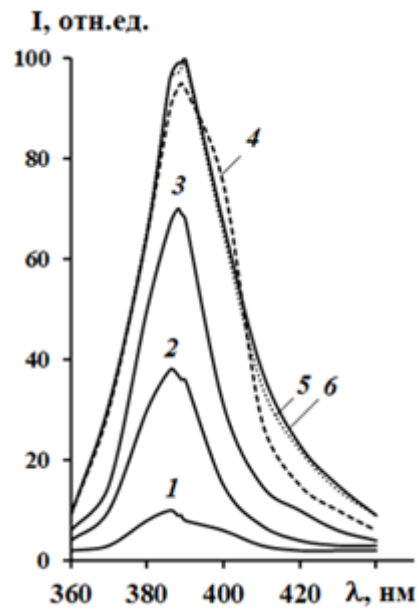


Рис. 2. Спектры ФЛ микропорошков ZnO ($d_{cp}=2$ мкм), полученных при различных интенсивностях возбуждающего излучения: кривая (1) соответствует интенсивности - $I_{возб}=5$; (2) - $I_{возб}=11$; (3) - $I_{возб}=15$; (4) - $I_{возб}=18$; (5) - $I_{возб}=21$; (6) - $I_{возб}=24$ ($I_{возб} \sim 10^6$ Вт/см²)

Fig. 2. PL spectra of ZnO micropowders ($d_{mean}=2$ μm) obtained at different intensities of excitation radiation: curve (1) corresponds to the intensity - $I_{exc}=5$; (2) - $I_{exc}=11$; (3) - $I_{exc}=15$; (4) - $I_{exc}=18$; (5) - $I_{exc}=21$; (6) - $I_{exc}=24$ ($I_{exc} \sim 10^6$ W/cm²)

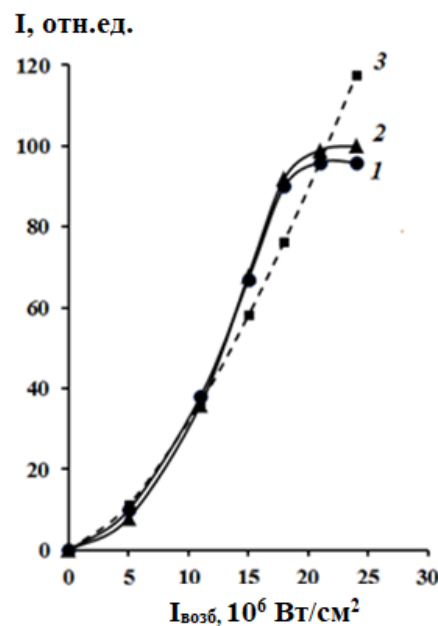


Рис.3. Зависимости интенсивности ФЛ микропорошков ZnO ($d_{cp}=2$ мкм) (I) от интенсивности возбуждающего излучения ($I_{возб}$). Кривая (1) соответствует длине волны $\lambda=386$ нм; (2) - $\lambda=390$ нм. (3) - теоретическая зависимость, соответствующая закону $I \approx I_{возб}^{1.5}$

Fig.3. Dependences of PL intensity of ZnO micropowders ($d_{mean}=2$ μm) (I) on the intensity of excitation radiation (I_{exc}). Curve (1) corresponds to the wavelength $\lambda=386$ nm; (2) - $\lambda=390$ nm. (3) - theoretical dependence corresponding to the law $I \approx I_{exc}^{1.5}$

На рис. 4 показаны спектры ФЛ микропорошков ZnSe ($d_{cp}=2$ мкм), полученные при различных плотностях мощности возбуждающего излучения. Полоса ФЛ в исследуемом диапазоне 460-490 нм обладает следующими свойствами. В первую очередь отметим, что максимум излучения 476-480 нм находится ближе к ширине запрещенной зоны E_g , Во-вторых, положение максимума зависит от уровня возбуждения, смещаясь в сторону меньших энергий с ростом $I_{возб}$. В-третьих, зависимость интенсивности излучения I синей полосы (В-полоса) носит

степенной характер: $I \approx I_{\text{возб}}^{1.4}$ (см. рис.5). И наконец, рост уровня возбуждения вызывает поднятие низкоэнергетического «крыла» В-полосы (см.рис.5). Все перечисленные особенности в области 460-480 нм характерны для аннигиляции экситонов при их неупругом рассеянии на свободных носителях заряда [26,27]. В этом диапазоне лежит край собственного поглощения ZnSe, где значение показатель поглощения может достигать тысяч см^{-1} , и резко меняется в этом спектральном диапазоне при небольшом изменении длины волны. В работе [28] было показано, что при температуре 77 K ZnSe, спектр основной полосы (2,789 эВ) имеет сложный характер: полоса расщепляется на три главные компоненты с максимумами при 2,793 (E_x), 2,775 (I_1) и 2,745 эВ (I^{LO}), соответственно. Дополнительно в низкоэнергетической области спектра наблюдается серия пиков 2,705 (A), 2,676 (A^{LO}), 2,645 ($A^{2\text{LO}}$) и 2,611 эВ ($A^{3\text{LO}}$). Энергия свободных экситонов в ZnSe равна: $E_x=2,812$ эВ и $A=2,690$ эВ, что характерно длинам волн: $\lambda=440,9$ и $460,9$ нм. В этих спектрах возникают максимумы, связанные процессами распада экситонов на фотон и один или несколько продольных оптических фононов. Максимум интенсивности в спектре ФЛ ($\lambda_{\text{мак}}=476$ нм), полученный в нашей работе соответствует трехфононному повторению ($A^{3\text{LO}}$). Полученный спектр ФЛ при малой интенсивности накачки (см. рис. 4, кривые 1-3) с максимумом $\lambda_{\text{мак}}=476$ нм коррелирует со спектром ДВЛ, наблюдавшимся нами ранее [17] в монокристалле при комнатной температуре.

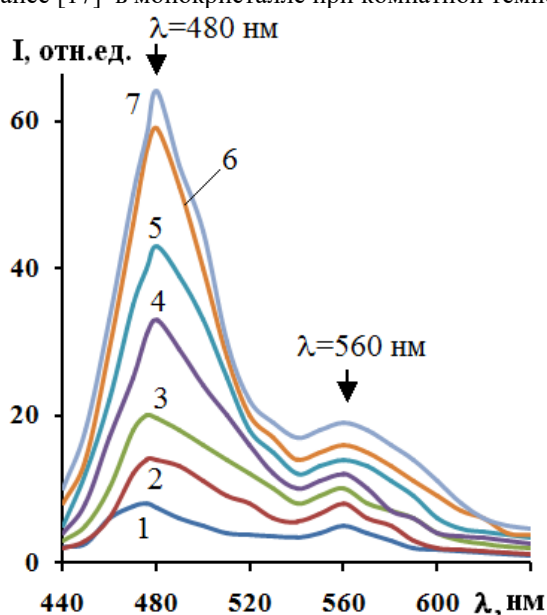


Рис. 4. Спектры ФЛ микропорошков ZnSe ($d_{\text{ср}}=2$ мкм), полученных при различных интенсивностях возбуждающего излучения: кривая (1) соответствует интенсивности - $I_{\text{возб}}=5$; (2) - $I_{\text{возб}}=7$; (3) - $I_{\text{возб}}=9$; (4) - $I_{\text{возб}}=11$; (5) - $I_{\text{возб}}=13$; (6) - $I_{\text{возб}}=15$; (7) - $I_{\text{возб}}=18$; ($I_{\text{возб}} \sim 10^6$ Вт/см²)
Fig. 4. PL spectra of ZnSe micropowders ($d_{\text{mean}}=2$ μm) obtained at different intensities of excitation radiation: curve (1) corresponds to the intensity - $I_{\text{exc}}=5$; (2) - $I_{\text{exc}}=7$; (3) - $I_{\text{exc}}=9$; (4) - $I_{\text{exc}}=11$; (5) - $I_{\text{exc}}=13$; (6) - $I_{\text{exc}}=15$; (7) - $I_{\text{exc}}=18$ ($I_{\text{exc}} \sim 10^6$ W/cm²).

На рис.5 приводится характер зависимости интенсивности ФЛ микропорошков ZnSe от интенсивности возбуждающего излучения. Приведенная зависимость соответствует длинам волн $\lambda_{\text{мак}}=476$ и 480 нм. Как видно рисунка, при сравнительно небольших интенсивностях (см. рис.4, кривые 1-3 и рис.5, кривые 1,2) зависимость $I(I_{\text{возб}})$ соответствует степенной зависимости с $\alpha \approx 1,4$ (кривая 3). При повышении интенсивности возбуждающего излучения (рис.4, кривые 4-7) наблюдается увеличение интенсивности ФЛ (зависимость характеризуется явным отклонением от $I \approx I_{\text{возб}}^{1.4}$). При этом максимум в спектре смещается еще до 480 нм.

Наблюдаемый спектр оказывается аналогичным спектру ДВЛ, полученному в монокристалле ZnSe в работе [29], при высокой интенсивности накачки. Такой же эффект был обнаружен при исследовании эпитаксиальных пленок ZnSe толщиной 0,4 мкм [30]. Таким образом, полученные результаты можно объяснить переходом при больших интенсивностях накачки от спонтанной люминесценции к стимулированной, т.е. к суперлюминесценции.

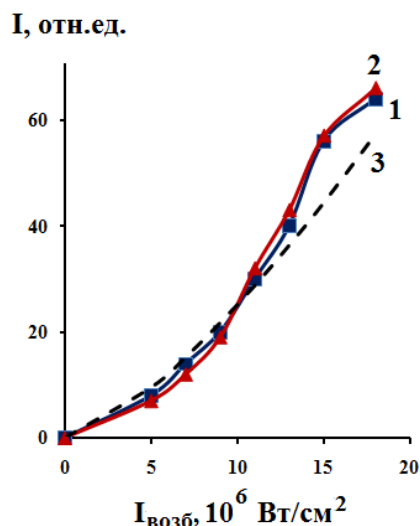


Рис. 5. Зависимости интенсивности ФЛ микропорошков ZnSe ($d_{\text{ср}}=2$ мкм) (I) от интенсивности возбуждающего излучения ($I_{\text{возб}}$). Экспериментальная кривая (1) соответствует длине волны $\lambda=476$ нм. Экспериментальная кривая (2) соответствует длине волны $\lambda=480$ нм. (3) - теоретическая зависимость, соответствующая закону $I \approx I_{\text{возб}}^{1.4}$

Fig.5. Dependences of FL intensity of ZnSe micropowders ($d_{\text{mean}}=2$ μm) (I) on the intensity of excitation radiation (I_{exc}). The experimental curve (1) corresponds to the wavelength $\lambda = 476$ nm. Experimental curve (2) corresponds to the wavelength $\lambda=480$ nm. (3) is the theoretical dependence corresponding to the law $I \approx I_{\text{exc}}^{1.4}$

4. Заключение (Conclusions)

Таким образом, в наших экспериментах при интенсивностях 10^6 Вт/см² лазерного излучения, в микропорошках оксида и селенида цинка наблюдается эффект суперлюминесценции. Обнаружено, что при повышении интенсивностей возбуждающего излучения обоих образцов наблюдается сдвиг максимума полосы до 4 нм. Экспериментально установлено, что лазерные эффекты отчетливо наблюдаются в микропорошках ZnO и ZnSe. Процессы усиления развивались с увеличением уровня накачки второй гармоникой лазера на парах меди при комнатной температуре.

Благодарности. Авторы с благодарностью вспоминают покойного д.ф.-м.н., профессора В.С. Горелика за активную помощь и консультации при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нешименко В.В. Структура, свойства и радиационная стойкость оксидных микро- и нанопорошков и отражающих покрытий, изготовленных на их основе. Дисс. д-ра физ.-мат. наук, -Томск: ТУСУР, 2016. – 273 с.
2. Averin I.A., Pronin I.A., Yakushova N.D. et al. Analysis of the Structural Evolution of Zinc Oxide Powders Obtained by Mechanical High-Energy Grinding // Tech. Phys, 2019. – Vol.64. – pp. 1330–1335. <https://doi.org/10.1134/S1063784219090020>.
3. Chin Boon Ong, Law Yong Ng, Abdul Wahab Mohammad. A Review of ZnO Nanoparticles as Solar Photocatalysts: Synthesis, Mechanisms and Applications // Renewable and Sustainable Energy Review, 2018. – Vol.81. – pp. 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>.
4. Yadav A., Nehra S.P., Patidar D. Synthesis, Characterization and Optical Properties of ZnSe Nanoparticles // Inter. J. Applied Engineering Research. – 2018. – Vol.13, No.6. – pp.4606-4609.
5. Рахматуллаев И.А., Чернега Н.В., Давронов М.Х. и др. Оригинальный метод диагностики слабых сигналов вторичного излучения в микро- и наноструктурах оксида цинка с помощью фотонных ловушек //Журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения» (Специальный выпуск), 2022. – № 41. – С.329-341.
6. Saxena A. Influence of Crystalline Microstructure on Optical Response of Single ZnSe Nanowires. Ph.D. thess. – Toronto: University of Toronto, 2012. – 342 p.
7. Маркушев В.М., Рыжков М.В., Брискина Ч.М. Спектры «случайных» лазеров на ZnO при пикосекундной накачке // Квантовая электроника, 2007. – Т.37, № 9. – С.837-842.
8. Кулюк Л., Лайхо Р., Лашкул А. и др. Излучательные свойства кристаллов ZnSe:Cr // Studia Universitatis, 2007. – No. 7. – С.221-225.



9. Huang M. H., Mao S., Feick H. et al. Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers // *Science*, 2001. – Vol.292. – pp.1897. <https://doi.org/10.1126/science.1060367>.
10. Dai G., Zhang Y., Liu R., Wan Q. et al. Visible Whispering-Gallery Modes in ZnO Microwires with Varied Cross Sections // *J.Appl. Phys.*, 2011. – Vol.110. – pp.033101. <https://doi.org/10.1063/1.3610521>.
11. Leanenya M.S., Lutsenko E.V., Pavlovskii V.N. et al. Luminescence and Lasing in ZnSe Micropowders at High Optical Excitation Levels // *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015. – Vol.82, Issue 1. – pp.53-57. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0063-6>.
12. Takahashi T., Nakamura T., Adachi S. Blue-Light-Emitting ZnSe Random Laser // *Optics Letters*, 2009. – Vol.34, Issue 24. – pp. 3923-3925. <https://doi.org/10.1364/OL.34.003923>.
13. Тарасов А.П. Люминесценция микроструктур оксида цинка и влияние на нее поверхностного плазменного резонанса и магнитного поля. Дисс. к-та физ.-мат. наук. – Москва: МФТИ (НИУ), 2019. – 125 с.
14. Fonoberov V.A., Alim Kh.A., Balandin A.A. et al. Photoluminescence Investigation of the Carrier Recombination Processes in ZnO Quantum Dots and Nanocrystals // *Physical Review B*, 2006. – Vol.73. – pp.165317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73165317>.
15. Родный П.А., Ходюк И.В. Оптические и люминесцентные свойства оксида цинка // *Оптика и Спектроскопия*, 2011. – Т.111. – С.814-824. <https://doi.org/10.1134/S0030400X11120216>
16. Dong H., Zhou B., Li J. et al. Ultraviolet Lasing Behavior in ZnO Optical Microcavities // *J. Materiomics*, 2017. – Vol.3. – pp.255-266. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2017.06.001>.
17. Agal'tsov A.M., Gorelik V.S. & Rakhmatullaev I.A. Spectral, Energy, and Temporal Characteristics of Two-photon-Excited Fluorescence of ZnSe Single Crystal in the Blue Region of the Spectrum // *Semiconductors*, 1997. – Vol.31. – pp.1228–1230. <https://doi.org/10.1134/1.1187299>.
18. Rakhmatullaev I.A., Bunkin N.F., Davronov, M.K. Effect of Raman Opalescence on Titanium Dioxide Micropowders Under Pulse-Periodic Laser Excitation // *Journal of Applied Spectroscopy*, 2025. – Vol.91, No.6. – p.1256–1260. <https://doi.org/10.1007/s10812-025-01846-9>.
19. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Combination Optical Processes in Superdispersed Media under Pulse-Periodic Laser Excitation // *Journal of Russian Laser Research*, 2005. – Vol.26, No.1. – pp.66-82. <https://doi.org/10.1007/s10946-005-0007-3>.
20. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Photoluminescence of Diamond Films and Ultrafine Diamond under UV Laser Excitation // *Inorganic Materials*, 2004. – Vol.40, No. 7. – pp.686–689. <https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000034766.98987.de>.
21. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Excitation of Raman Optical Processes in an Ultradispersed Medium by Radiation from a Pulsed-Periodic Laser // *Technical Physics*, 2005. – Vol.50, No.1. – pp.61–64. <https://doi.org/10.1134/1.1854824>.
22. Абдуев А.Х., Адуков А.Д., Атаев Б.М. и др. УФ люминесценция эпитаксиальных слоев окиси цинка при однофотонном и двухфотонном возбуждении // *Квантовая электроника*. – 1978. – Т.5, №1. – С.206–208.
23. Соколовский М.И. Вторичное излучение нанокристаллического оксида цинка при лазерном возбуждении: автореф. дис.... к.ф.-м.н. – Ульяновск, 2006. – 22 с.
24. Емельченко Г.А., Грузинцев А.Н., Кулаков А.Б. и др. Люминесценция наностержней оксида цинка // *Физика и техника полупроводников*, 2007. – Т.41, №2. – С.182-185.
25. Исмаилов Д.В. Наноструктурированные слои и тонкие пленки на основе оксида цинка. Дисс. к-та техн. наук, Томск: ТПУ, 2018. – 158 с.
26. Махний В.П., Кинзерская О.В., Сенко И.М. и др. Высокотемпературная люминесценция кристаллов ZnSe:Yb // *Техн.и конст. в элек.аппар.*, 2016. – №2-3. – С.37-40.
27. Гладилин А.А. Структурные и оптические свойства кристаллов селенида и сульфида цинка, легированных железом и хромом. Дисс. к-та физ.-мат. наук. – Москва: ИОФ РАН, 2020. – 130 с.
28. Иванова Г.Н., Недеогло Д.Д., Симашкевич А.В. и др. Голубая фотолюминесценция кристаллов ZnSe при сильном лазерном возбуждении // *Физика и техника полупроводников*. 1980, Т. 14, № 1. – С. 31-36.
29. Горелик В.С., Кекелидзе Г.Н., Прохоров К.А. Двухфотонно-возбуждаемая люминесценция в кристаллах селенида цинка // *Краткие сообщения по физике*. – 1990. – № 11. – С.5-7.
30. Skrobot M., Godlewski M., Guziejewicz E., Kopalko K., Phillips M.R. Tuning of Color Chromaticity of Light Emission from ZnSe Films Grown on a GaAs Substrate by Atomic Layer Epitaxy // *Acta Physica Polonica A*, 2006. – Vol.110, No.3. – pp.359-367. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.110.359>.



REFERENCES

1. Neshchimenko V.V. Structure, Properties and Radiation Resistance of Oxide Micro- and Nanopowders and Reflective Coatings Made on Their Basis. DSc. thess, Tomsk: TUSUR, 2016. – 273 p. (in Russian).
2. Averin I.A., Pronin I.A., Yakushova N.D. et al. Analysis of the Structural Evolution of Zinc Oxide Powders Obtained by Mechanical High-Energy Grinding // *Tech. Phys.*, 2019. – Vol.64. – pp. 1330–1335. <https://doi.org/10.1134/S1063784219090020>.
3. Chin Boon Ong, Law Yong Ng, Abdul Wahab Mohammad. A Review of ZnO Nanoparticles as Solar Photocatalysts: Synthesis, Mechanisms and Applications // *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2018. – Vol.81. – pp. 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>.
4. Yadav A., Nehra S.P., Patidar D. Synthesis, Characterization and Optical Properties of ZnSe Nanoparticles // *Inter. J. Applied Engineering Research*, 2018. – Vol.13, No.6. – pp.4606–4609.
5. Rakhmatullaev I.A., Chernega N.V., Davronov M.H. et al. Original Method of Diagnostics of Weak Signals of Secondary Radiation in Micro- and Nanostructures of Zinc Oxide Using Photon Traps // *Journal 'Problems of Energy and Sources Saving' (Special Issue)*, 2022. – No.41. – pp.329–341 (in Russian).
6. Saxena A. Influence of Crystalline Microstructure on Optical Response of Single ZnSe Nanowires. Ph.D. thess. – Toronto: University of Toronto, 2012. – 342 p.
7. Markushev, V.M.; Ryzhkov, M.V.; Briskina, Ch.M. Spectra of the 'Random' Lasers on ZnO at Picosecond Pumping // *Quantum electronics*, 2007. – Vol.37, No.9. – pp.837–842 (in Russian).
8. Kuliuk L., Laiho R., Lashkul A., et al. Radiation Properties of ZnSe:Cr Crystals // *Studia Universitatis*, 2007. – No.7. – pp.221–225.
9. Huang M. H., Mao S., Feick H. et al. Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers // *Science*, 2001. – Vol.292. – pp.1897. <https://doi.org/10.1126/science.1060367>.
10. Dai G., Zhang Y., Liu R., Wan Q. et al. Visible Whispering-Gallery Modes in ZnO Microwires with Varied Cross Sections // *J.Appl. Phys.*, 2011. – Vol.110. – pp.033101. <https://doi.org/10.1063/1.3610521>.
11. Leanenya M.S., Lutsenko E.V., Pavlovskii V.N. et al. Luminescence and Lasing in ZnSe Micropowders at High Optical Excitation Levels // *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015. – Vol.82, Issue 1. – pp.53–57. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0063-6>.
12. Takahashi T., Nakamura T., Adachi S. Blue-Light-Emitting ZnSe Random Laser // *Optics Letters*, 2009. – Vol.34, Issue 24. – pp. 3923–3925. <https://doi.org/10.1364/OL.34.003923>.
13. Tarasov A.P. Luminescence of Zinc Oxide Microstructures and Influence of Surface Plasma Resonance and Magnetic Field on it. Ph.D. thess. – Moscow: MIPT (NIU), 2019. – 125 p. (in Russian).
14. Fonoberov V.A., Alim Kh.A., Balandin A.A. et al. Photoluminescence Investigation of the Carrier Recombination Processes in ZnO Quantum Dots and Nanocrystals // *Physical Review B*, 2006. – Vol.73. – pp.165317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73165317>.
15. Rodniy P.A., Khodyuk I.V. Optical and Luminescent Properties of Zinc Oxide // *Optics and Spectroscopy*, 2011. – Vol.111. – pp.814–824 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0030400X11120216>.
16. Dong H., Zhou B., Li J. et al. Ultraviolet Lasing Behavior in ZnO Optical Microcavities // *J. Materiomics*, 2017. – Vol.3. – pp.255–266. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2017.06.001>.
17. Agal'tsov A.M., Gorelik V.S. & Rakhmatullaev I.A. Spectral, Energy, and Temporal Characteristics of Two-photon-Excited Fluorescence of ZnSe Single Crystal in the Blue Region of the Spectrum // *Semiconductors*, 1997. – Vol.31. – pp.1228–1230. <https://doi.org/10.1134/1.1187299>.
18. Rakhmatullaev I.A., Bunkin N.F., Davronov, M.K. Effect of Raman Opalescence on Titanium Dioxide Micropowders Under Pulse-Periodic Laser Excitation // *Journal of Applied Spectroscopy*, 2025. – Vol.91, No.6. – p.1256–1260. <https://doi.org/10.1007/s10812-025-01846-9>.
19. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Combination Optical Processes in Superdispersed Media under Pulse-Periodic Laser Excitation // *Journal of Russian Laser Research*, 2005. – Vol.26, No.1. – pp.66–82. <https://doi.org/10.1007/s10946-005-0007-3>.
20. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Photoluminescence of Diamond Films and Ultrafine Diamond under UV Laser Excitation // *Inorganic Materials*, 2004. – Vol.40, No. 7. – pp.686–689. <https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000034766.98987.de>.
21. Gorelik V.S., Rakhmatullaev I.A. Excitation of Raman Optical Processes in an Ultradispersed Medium by Radiation from a Pulsed-Periodic Laser // *Technical Physics*, 2005. – Vol.50, No.1. – pp.61–64. <https://doi.org/10.1134/1.1854824>.



22. Abduev A.H., Adukov A.D., Ataev B.M. et al. UV Luminescence of Epitaxial Layers of Zinc Oxide under One- and Two-Photon Excitation // *Quantum Electronics*, 1978. – Vol.5, No.1. – pp.206-208 (in Russian).
23. Sokolovskiy M.I. Secondary Radiation of Nanocrystalline Zinc Oxide under Laser Excitation: autoref. Ph.D. thess. - Ulyanovsk., 2006. – 122 p. (in Russian).
24. Emelchenko G.A., Gruzintsev A.N., Kulakov A.B. et al. Luminescence of Zinc Oxide Nanorods // *Physics and Technique of Semiconductors*, 2007. – Vol.41, No.2. – pp.182-185(in Russian).
25. Ismailov D.V. Nanostructured Layers and Thin Films Based on Zinc Oxide. Ph.D. thess, Tomsk: TPU, 2018. – 158 p. (in Russian).
26. Makhniy V.P., Kinzerskaya O.V., Senko I.M. et al. High-Temperature Luminescence of ZnSe:Yb Crystals // *Techn. and Const. in Elekt.apar.*, 2016. – No.2-3. – pp.37-40 (in Russian).
27. Gladilin A.A. Structural and Optical Properties of Zinc Selenide and Sulfide Crystals Doped with Iron and Chromium. Ph.D. thess. – Moscow: IOF RAS, 2020. – 130 p. (in Russian).
28. Ivanova G.N., Nedeoglo D.D., Simashkevich A.V. et al. Blue Photoluminescence of ZnSe Crystals under Strong Laser Excitation // *Physics and Technics of Semiconductors*. 1980, – Vol.14, No.1. – pp.31-36 (in Russian).
29. Gorelik V.S., Kekelidze G.N., Prokhorov K.A. Two-Photon-Excited Luminescence in Zinc Selenide Crystals // *Short communications on physics*, 1990. – No.11. – pp.5-7 (in Russian).
30. Skrobot M., Godlewski M., Guziewicz E., Kopalko K., Phillips M.R. Tuning of Color Chromaticity of Light Emission from ZnSe Films Grown on a GaAs Substrate by Atomic Layer Epitaxy // *Acta Physica Polonica A.*, 2006. – Vol.110, No.3. – pp.359-367.<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.110.359>.