

## УСИЛЕНИЕ КРАЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСТЕРЖНЕЙ ZnO В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Ч. М. Брискина<sup>1</sup>, А. П. Тарасов<sup>1,2\*</sup>, В. М. Маркушев<sup>1</sup>, М. А. Ширяев<sup>3</sup>

УДК 535.37;620.3

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской АН, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,

141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия; e-mail: tarasov.ap@phystech.edu

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

(Поступила 18 апреля 2018)

Обнаружено усиление УФ люминесценции и случайной лазерной генерации неупорядоченных массивов наностержней ZnO с Ag-покрытием в магнитном поле ~1 Тл при комнатной температуре. Предложен возможный вариант интерпретации эффекта, основанный на предположении о формировании магнитоэкситонов в ZnO под действием магнитного поля в присутствии поверхностного плазмонного резонанса.

**Ключевые слова:** люминесценция, оксид цинка, экситон, стохастическая лазерная генерация, наночастицы серебра, магнитное поле, магнитоэкситон, плазмон, поверхностный плазмонный резонанс.

*The enhancement of UV luminescence and random lasing of disordered arrays of ZnO nanorods with Ag coating has been found in the magnetic field of about 1 T at room temperature. A possible interpretation of the effect is suggested based on the assumption of the formation of magnetoexcitons in ZnO under the magnetic field action in the presence of surface plasmon resonance.*

**Keywords:** luminescence, zinc oxide, exciton, random lasing, silver nanoparticle, magnetic field, magnetoexciton, plasmon, surface plasmon resonance.

Исследования влияния магнитного поля (МП) на излучение, обусловленное экситонной рекомбинацией, представляют интерес как минимум с двух точек зрения. Результаты таких исследований могут быть использованы для управления лазером, работающим на экситонном излучении, а также дать новую информацию о природе самих экситонов. Влияние МП на различные характеристики рекомбинационного излучения экситонов изучается уже продолжительное время. Как правило, такие работы касаются проявляющихся в МП особенностей поглощения и отражения света в спектральной области существования экситонов.

Насколько нам известно, эксперименты по влиянию МП на интенсивность экситонного излучения проводились только для Ge [1] и GaAs [2—4]. В работе [1] увеличение интенсивности экситонного излучения напряженных кристаллов Ge наблюдалось в МП ~1—2 Тл. В [2, 3] исследована низкотемпературная люминесценция экстремально чистых эпитаксиальных пленок GaAs в средних МП (~7 Тл), получено 20-кратное возрастание интенсивности излучения. В работе [4] проведены эксперименты по влиянию МП на интенсивность экситонного излучения пленок GaAs при температурах 1.5—8 К и обнаружено значительное усиление люминесценции при увеличении МП от 0 до 7 Тл.

Обладая высокой энергией связи экситонов (60 мэВ), оксид цинка предоставляет возможность наблюдать и исследовать экситонную люминесценцию и лазерную генерацию при комнатной и более высоких температурах. Цель настоящей работы — изучение влияния относительно слабого (~1 Тл) МП на краевое излучение пленок ZnO при комнатной температуре.

Исследуемые пленки ZnO, выращенные газофазным методом на Si-подложках, состоят из случайно ориентированных наностержней (рис. 1). Покрытие Ag-наночастицами осуществлялось с по-

## ENHANCEMENT OF EDGE EMISSION OF ZnO NANORODS IN MAGNETIC FIELD

Ch. M. Briskina<sup>1</sup>, A. P. Tarasov<sup>1,2,\*</sup>, V. M. Markushev<sup>1</sup>, M. A. Shiryaev<sup>3</sup> (<sup>1</sup> Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009, Russia; <sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; e-mail: tarasov.ap@phystech.edu; <sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia)

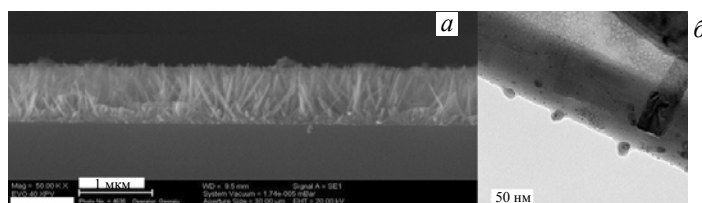


Рис. 1. Микрофотографии пленки ZnO с наночастицами Ag, полученные с помощью растрового (а) и просвечивающего (б) электронных микроскопов

мощью восстановления нитрата серебра в результате УФ облучения. Размеры осажденных наночастиц ~5—20 нм.

Возбуждение УФ люминесценции и случайной (стохастической) лазерной генерации (СЛГ) образцов осуществлялось третьей гармоникой (355 нм) импульсного YAG:Nd-лазера (длительность импульса ~10 нс, частота повторения 15 Гц). Лазерная накачка фокусировалась на поверхности образца в пятно размером ~300 мкм. Регистрировалось краевое излучение образцов при наличии и в отсутствие МП с индукцией ~1 Тл, создаваемого системой из двух неодимовых магнитов и ориентированного в плоскости образца (параллельно подложке). Для регистрации излучения использованы фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), позволяющий с большой чувствительностью регистрировать оптический сигнал пошаговым методом (по длине волны), и ПЗС-камера, с помощью которой можно регистрировать спектры от отдельного импульса накачки.

Первоначально эффект усиления краевого излучения зарегистрирован на пленке с Ag-покрытием с помощью ФЭУ без накопления (рис. 2, а). Аналогичный результат получен при регистрации ПЗС-камерой с накоплением 100 импульсов (рис. 2, б). В спектрах образцов ZnO без Ag-покрытия, зарегистрированных как ПЗС-камерой, так и ФЭУ, эффект не обнаружен, что свидетельствует об определенной роли Ag в его возникновении. Отметим, что и на образцах ZnO/Ag были места, где эффект отсутствовал.

Для количественной оценки наблюдаемого эффекта использована интегральная интенсивность излучения (значение интеграла по длинам волн в пределах всего зарегистрированного спектра излучения). Увеличение интегральной интенсивности в МП для одного из образцов составило 4 % при уровне накачки 8.1 мДж/см<sup>2</sup> и 2 % при 1.8 мДж/см<sup>2</sup>. Таким образом, наблюдаемый эффект зависит от уровня накачки. Отметим, что изменение угла между образцом и линиями МП на ~30° заметно на результатах не отражалось. По-видимому, это обусловлено случайной ориентацией наностержней ZnO в исследуемых пленках.

Использование интегральных интенсивностей приводит к усреднению сильно различающихся величин. Это видно на рис. 2, в, где приведена спектральная зависимость увеличения интенсивности (усиления), соответствующая случаю на рис. 2, б. Отношение интегральных интенсивностей на рис. 2, б составляет ~1.05 (усиление в МП 5 %). При этом усиление в центральной области спектра, где присутствует СЛГ, достигает ~20 %, а в области люминесценции ~1—2 % (рис. 2, в). Как известно, вероятность вынужденного перехода определяется произведением сечения этого процесса и интенсивности возбуждающего излучения, которая в свою очередь пропорциональна вероятности перехода. Этим частично объясняется большая чувствительность СЛГ к МП по сравнению со спонтанным излучением и, как следствие, возрастание эффекта в области СЛГ.

Детальный анализ различных подходов к интерпретации природы исследуемого эффекта (возможные влияния МП на вероятности образования [5] и рекомбинации [6] экситона, на характеристики поверхностного плазмонного резонанса [7] и др.) привел к выводу о возможном формировании магнитоэкситонов в ZnO при воздействии МП [8]. В теоретической работе [8] путем численного решения уравнения Шрёдингера показано, что перестройка основного состояния экситона с соответствующим изменением волновой функции (переход экситон—магнитоэкситон) может происходить даже в слабых МП, если импульс экситона  $P_x$  превышает некоторую пороговую величину.

Импульс  $P_x$ , обусловленный тепловым движением, при комнатной температуре оказывается заметно ниже порогового значения. Однако в [9] показано, что плазмоны, возбуждаемые на поверхности наночастиц металла, могут обладать импульсом, значительно превосходящим импульс создающего их излучения (так называемые “медленные плазмоны”). Такие поверхностные плазмонные волны, возбужденные в Ag-наночастицах с помощью рекомбинационного излучения ZnO, могут резонансным способом создавать в пленке ZnO экситоны с импульсом, равным импульсу плазмона.

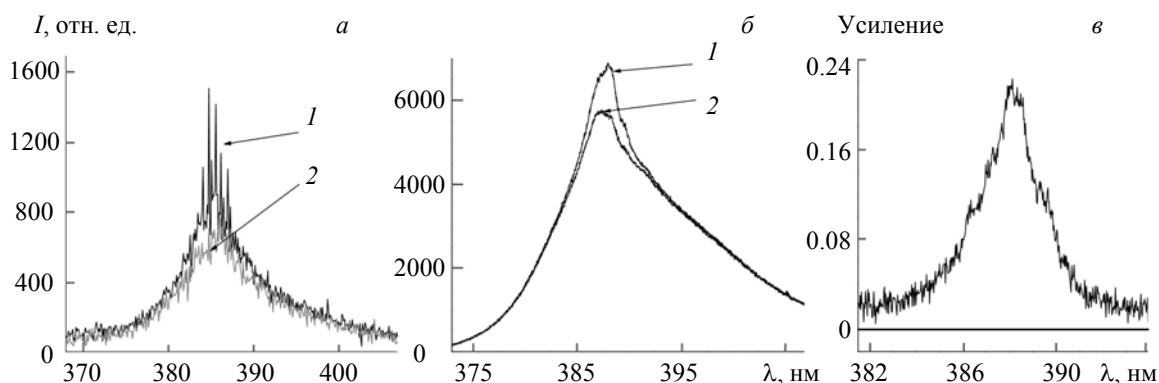


Рис. 2. Краевое излучение образца ZnO/Ag в магнитном поле (1) и без него (2) при плотности энергии накачки 5 (а) и 10 мДж/см<sup>2</sup> (б); в — спектральная зависимость увеличения интенсивности (усиления) в магнитном поле при плотности энергии накачки 10 мДж/см<sup>2</sup>

Наличие взаимодействия между плазмонами в Ag-наночастицах и экситонами в ZnO (эффект поверхностного плазмонного резонанса) в исследуемых образцах подтверждается построенными экспериментальными зависимостями интенсивности излучения от уровня накачки, которые имели нелинейный вид [10]. Импульс возникающего медленного плазмона оценен с использованием полученного в [9] уравнения для возрастания волнового вектора плазмонов в серебряном цилиндре, помещенном в диэлектрическую среду, по отношению к волновому вектору возбуждающего излучения. При значениях входящих в уравнение параметров (диэлектрические проницаемости материалов, размеры наночастиц металла), соответствующих рассматриваемому нами случаю, обнаружена возможность увеличения волнового вектора плазмона на длине волны рекомбинации экситона в несколько десятков раз. Появляется возможность перехода экситона в магнитоэкситонное состояние с измененной волновой функцией и, как следствие, вероятность рекомбинации такого экситона вырастает. Отметим, что достижение условий перехода экситон—магнитоэкситон может произойти и в результате нагрева Ag-наночастиц накачкой в области плазмонного резонанса и передачи нагрева от Ag-наночастицы к пленке ZnO. Возможно, действуя совместно, оба механизма обеспечивают увеличение интенсивности экситонного излучения.

Таким образом, впервые обнаружено влияние относительно слабого магнитного поля (~1 Тл) на люминесценцию и случайную лазерную генерацию покрытых Ag-наночастицами пленок ZnO при комнатной температуре. На исследуемых образцах также существуют области, где эффект отсутствует. На аналогичных образцах ZnO без серебряного покрытия эффект не наблюдался. Проанализированы различные подходы к интерпретации природы данного явления. Представляется вероятной возможность образования магнитоэкситонов в некоторых областях пленок, где импульс экситонов вблизи наночастиц серебра может возрастать благодаря существованию медленных плазмонов и нагреву образца накачкой. Это может приводить к росту вероятности рекомбинации даже в слабом магнитном поле из-за сильного растяжения волновой функции магнитоэкситона.

- [1] V. E. Bisti, V. M. Edel'stein, I. V. Kukushkin, V. D. Kulakovskii. *Solid State Commun.*, **44** (1982) 197—199
- [2] Ю. В. Жилаев, В. В. Россин, Т. В. Россина, В. В. Травников. *Письма в ЖЭТФ*, **49** (1989) 492—494
- [3] V. V. Rossin, P. C. M. Christianen, V. V. Travnikov. *Semicond. Sci. Technol.*, **9** (1994) 716—718
- [4] P. V. Wilhelm. *Exciton Photoluminescence Enhancement with Magnetic Field in Gallium Arsenide*, Institut für Atom- und Molekül Physik Justus-Liebig-Universität at Gießen (2015); [https://sharepoint.washington.edu/phys/research/optospinlab/Documents/MPL\\_report.pdf](https://sharepoint.washington.edu/phys/research/optospinlab/Documents/MPL_report.pdf)
- [5] И. Г. Ланг, С. Т. Павлов, А. В. Прохоров. *ЖЭТФ*, **106** (1994) 224
- [6] D. Cabib, E. Farri, G. Fiorio. *Il Nuovo Cimento*, **10** (1972) 185—199
- [7] M. G. Kucherenko, V. M. Nalbandyan. *Phys. Proc.*, **73** (2015) 136—142
- [8] Ю. Е. Лозовик, С. Ю. Волков. *ЖЭТФ*, **123** (2003) 635—642
- [9] V. S. Zuev, G. Ya. Zueva. *J. Russ. Laser. Res.*, **27** (2006) 167—184
- [10] S. I. Romyantsev, A. P. Tarasov, Ch. M. Briskina, M. V. Ryzhkov, V. M. Markushev, A. A. Lotin. *J. Nanophoton.*, **10** (2016) 016001