

# Стабильный режим генерации лазерного излучения в микропорошках CdSSe

М.С.Леоненя, А.В.Нагорный, Б.Д.Урманов, В.А.Шуленкова, Г.П.Яблонский

*Изучена случайная генерация лазерного излучения в микропорошке CdS в зеленой области спектра вблизи 520 нм при комнатной температуре и оптической накачке импульсами Nd<sup>3+</sup>:YAG- и N<sub>2</sub>-лазеров на длинах волн 355 и 337 нм соответственно. Определено влияние флуктуаций выходной энергии импульсов излучения накачки на режим случайной генерации в микропорошке CdS. Показано, что использование лазера накачки с высокой стабильностью выходной мощности и с высокой пространственной однородностью излучения, в частности N<sub>2</sub>-лазера, позволяет получить стабильный режим генерации лазерного излучения в микропорошках CdSSe, характеризующийся наличием четкой структуры узких спектральных линий лазерной генерации и устойчивостью их положения при работе в импульсном режиме с частотой следования 700 Гц на длинах волн 525, 570, 600 и 650 нм с порогами в интервале 1100–1600 кВт/см<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** полупроводниковые лазеры, оптическая накачка, случайная генерация, микропорошки, полупроводники.

## 1. Введение

Одним из важных направлений разработки новых типов лазеров является получение и изучение случайной генерации лазерного излучения в различных рассеивающих активных средах. Эффект генерации обусловлен созданием случайным образом многочисленных контуров усиления при многократном рассеянии излучения в активной разупорядоченной среде [1, 2]. Случайная генерация уже получена в различных участках УФ, видимого и ИК диапазонов электромагнитных волн в активных средах на основе нано- и микроструктур полупроводников A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>, кристаллических матриц с редкоземельными активаторами и лазерных красителей со специально введенными рассеивателями [1–8]. В видимой области спектра случайная генерация получена лишь на ограниченном наборе длин волн в микроструктурированных активных рассеивающих средах на основе некоторых полупроводников типа A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>, в частности CdZnO [9], ZnSe [10, 11], CdS [12] и CdSe [13]. Недавно авторами [14] достигнута случайная генерация излучения белого цвета в смеси полупроводниковых микропорошков с общей формулой ZnCdSSe. Лазеры со случайной генерацией обладают перспективами использования в системах визуализации изображения, передачи информации, маркировки материалов, обнаружения «свой–чужой», в качестве биосенсоров в медицине и в технологиях освещения [1, 3, 4].

Положение узких спектральных линий случайной генерации лазерного излучения зачастую хаотично меняется от одного импульса накачки к другому, что неоднократно обнаруживалось ранее [1, 14, 15]. Также было установлено, что эффект случайной генерации при фиксированных экспериментальных условиях с заданным уровнем накачки выше порога может как достигаться, так и отсут-

ствовать, приводя лишь к интенсивной фотолуминесценции. Задача настоящей работы – выяснение причин неустойчивости режима случайной генерации лазерного излучения в рассеивающих активных средах и возможных путей ее устранения.

## 2. Методика эксперимента

Предметом исследования служили микрокристаллические порошки соединения CdS и твердых растворов CdSSe с субмикронным размером кристаллитов. Тонкие слои микропорошков толщиной ~500 мкм были нанесены на полированные плоскости кварцевых пластинок. Оптическая накачка случайной генерации лазерного излучения в микропорошках осуществлялась импульсным наносекундным излучением третьей гармоники Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера на длине волны  $\lambda = 355$  нм с частотой следования импульсов (ЧСИ) 10 Гц, а также излучением N<sub>2</sub>-лазера на  $\lambda = 337$  нм и ЧСИ 700 Гц. Излучение источника накачки фокусировалось в круглое пятно на образце микропорошковой активной среды. Излучение микропорошков подавалось на вход монохроматора через оптическое волокно. Спектры излучения микропорошков от каждого импульса накачки регистрировались с помощью ПЗС-линейки на выходе монохроматора. Спектральное разрешение монохроматора в измеряемом диапазоне длин волн составило 0.14 нм. Измерения проводились при температуре 300 К.

## 3. Результаты и обсуждение

Наиболее распространенными источниками накачки лазеров со случайной генерацией служат твердотельные Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазеры с излучением пико- и наносекундной длительности на длинах волн 266, 355 и 532 нм, работающие с ЧСИ ~10 Гц [1, 2]. Ранее нами были представлены результаты достижения случайной генерации лазерного излучения в микропорошке CdS при возбуждении отдельными импульсами излучения третьей гармоники Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера на  $\lambda = 355$  нм [14].

М.С.Леоненя, А.В.Нагорный, Б.Д.Урманов, В.А.Шуленкова, Г.П.Яблонский. Институт физики НАНБ, Республика Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68-2; e-mail: max.leanenia@gmail.com

Поступила в редакцию 18 апреля 2019 г.

В настоящей работе излучение Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера накачки (355 нм) фокусировалось в пятно диаметром 400 мкм на поверхности микропорошка CdS. Резкое возрастание интенсивности, сужение спектра излучения микропорошка CdS вблизи  $\lambda = 520$  нм и появление в его максимуме структуры узких линий было обнаружено при превышении порога генерации в 640 кВт/см<sup>2</sup>. Установленные признаки возникновения генерации лазерного излучения в микропорошке CdS без использования преднамеренно введенных зеркальных резонаторов являются типичными признаками достижения режима случайной генерации лазерного излучения в разупорядоченных активных средах с высокой степенью рассеяния, выявленными в ряде работ [1, 2, 16]. На рис.1 представлена последовательность из 15 спектров излучения микропорошка CdS при фиксированной плотности мощности накачки  $\sim 1200$  кВт/см<sup>2</sup> и неизменных экспериментальных условиях. Случайная генерация лазерного излучения в микропорошке CdS достигнута для импульсов накачки под номерами 2, 3, 5–10, 12 и 14, о чем свидетельствует наличие в спектре излучения узкой спектральной линии излучения с шириной на полувысоте  $\sim 7$  нм. Вместе с тем, для импульсов накачки под номерами 1, 4, 11, 13 и 15 с плотностью мощности  $\sim 1200$  кВт/см<sup>2</sup> (что двукратно превышает порог генерации) наблюдается лишь интенсивная фотолюминесценция микропорошка.

Нестабильность энергии импульсов используемого в работе твердотельного Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера накачки не превышает 10%. Следовательно, флуктуации энергии импульсов возбуждающего излучения не могут привести к падению уровня накачки ниже порога в 640 кВт/см<sup>2</sup>. Причина выявленной нестабильности режима случайной генерации, по всей видимости, заключается в перераспределении энергии в пределах пятна возбуждения от одного импульса накачки к другому, что приводит к изменению формы и количества случайно сформированных контуров усиления в микропорошковой активной среде. В результате количество и длина контуров усиления может оказаться недостаточной для превышения порога генерации и привести к наличию лишь интенсивной фотолюминесценции (рис.1, номера импульсов 1, 4, 11, 13 и 15).

Таким образом, режим случайной генерации обладает чрезвычайной чувствительностью к флуктуациям интен-

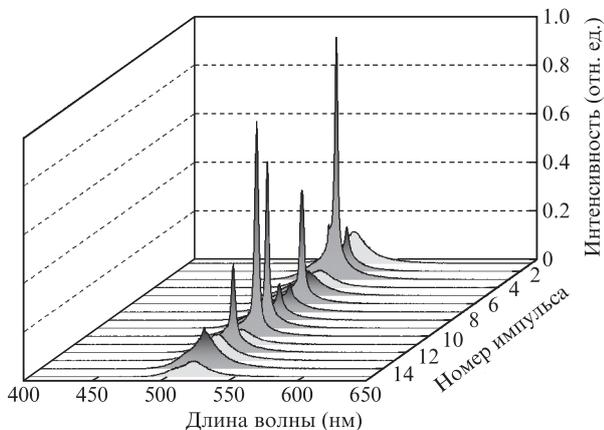


Рис.1. Спектры фотолюминесценции (номера импульсов 1, 4, 11, 13 и 15) и спектры случайной генерации (номера импульсов 2, 3, 5–10, 12 и 14) в микропорошке CdS при возбуждении последовательными 15 импульсами излучения Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера ( $\lambda = 355$  нм) с плотностью мощности  $\sim 1200$  кВт/см<sup>2</sup>.

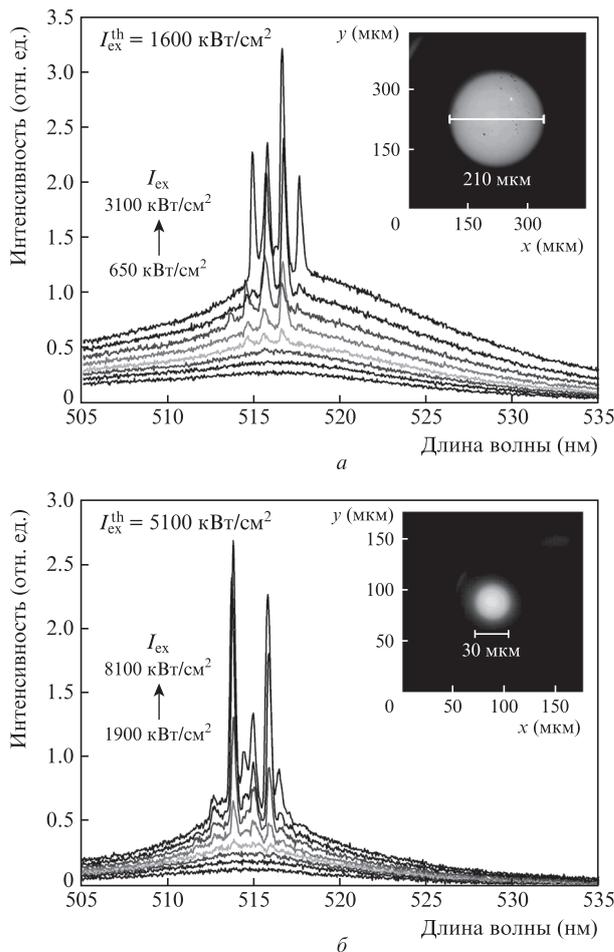


Рис.2. Спектры излучения микропорошка CdS при температуре 300 К и различных плотностях мощности  $I_{ex}$  излучения N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 337$  нм), сфокусированного в пятна диаметром 210 (а) и 30 мкм (б);  $I_{ex}^{th}$  – пороговая плотность мощности. На вставках – пространственные распределения плотности мощности в пятнах излучения накачки.

сивности в пределах пятна накачки. Поэтому для дальнейших исследований был использован азотный лазер накачки, который обладает высокой стабильностью выходного излучения. На рис.2 представлены спектры случайной генерации лазерного излучения в микропорошке CdS при накачке излучением N<sub>2</sub>-лазера и диаметрах круглого пятна возбуждающего излучения 30 и 210 мкм.

Очевидным отличием полученных спектров генерации лазерного излучения в районе 515–520 нм в микропорошке CdS при возбуждении излучением азотного лазера от спектров генерации при накачке излучением Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера является четкая структура узких спектральных линий генерации шириной на полувысоте  $\sim 1$  нм (рис.2). Высокая стабильность выходной мощности излучения N<sub>2</sub>-лазера накачки и достаточная однородность распределения интенсивности в пределах пятна возбуждения привели к достижению стабильного режима случайной генерации лазерного излучения в микропорошке CdS при ЧСИ 700 Гц, что проявилось в достижении порога случайной генерации для всех импульсов накачки выше порога, а также в стабильности спектрального положения узких спектральных линий при фиксированной накачке. Значительное увеличение плотности мощности накачки над порогом приводило лишь к незначительному перераспределению интенсивности между спектральными ли-

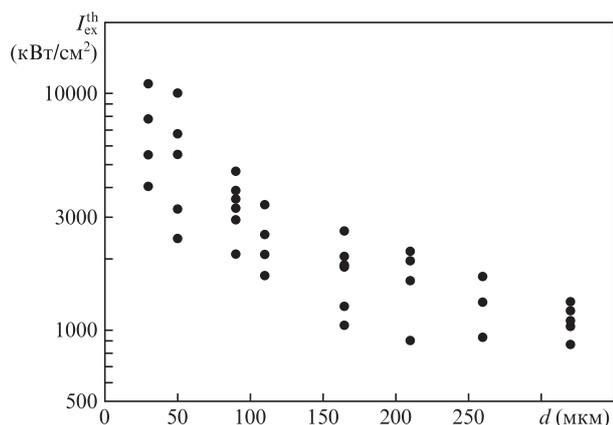


Рис.3. Зависимость порога случайной генерации в микропорошке CdS от диаметра пятна возбуждающего излучения  $N_2$ -лазера ( $\lambda = 337$  нм).

ниями генерации лазерного излучения в микропорошке CdS (рис.2).

Кроме того, оказалось, что размер пятна возбуждающего излучения на поверхности микропорошка существенно влияет на порог случайной генерации. Было обнаружено, что при уменьшении пятна накачки от 210 до 30 мкм (рис.2) порог генерации увеличивается от 1600 до 5100 кВт/см<sup>2</sup>. На рис.3 показан разброс значений порогов случайной генерации лазерного излучения для разных мест облучаемого образца микропорошка CdS при изменении диаметра пятна возбуждающего излучения от 30 до 320 мкм. Также отчетливо видно существенное уменьшение порога генерации при увеличении пятна накачки, т.е. размера активной среды, что можно объяснить следующим образом. Вынужденное излучение за счет рассеяния в большем объеме активной среды имеет более длинную траекторию до момента выхода за ее пределы, т.е. большую длину контуров усиления, в результате чего приобретает большее усиление [17, 18]. Это приводит к уменьшению порога при увеличении объема активной среды. Таким образом, увеличение порога генерации лазерного излучения с уменьшением пятна возбуждения свидетельствует в пользу механизма создания обратной связи именно за счет формирования случайным образом контуров усиления в активной рассеивающей среде.

Стабильный режим генерации лазерного излучения был достигнут и в микропорошках тройных твердых растворов CdSSe, выгодно отличающихся от двойных соединений типа  $A^{II}B^{VI}$  возможностью плавной перестройки спектра излучения в пределах видимого спектрального диапазона. Спектры излучения твердых растворов при комнатной температуре и накачке излучением  $N_2$ -лазера на  $\lambda = 337$  нм представлены на рис.4.

Твердые растворы  $CdS_{0.95}Se_{0.05}$ ,  $CdS_{0.8}Se_{0.2}$ ,  $CdS_{0.65}Se_{0.35}$  и  $CdS_{0.5}Se_{0.5}$  обладают интенсивной фотолюминесценцией в зеленой, желтой, оранжевой и красной областях спектра соответственно при возбуждении излучением  $N_2$ -лазера с плотностью мощности около 700 кВт/см<sup>2</sup>. Увеличение уровня накачки вызвало резкое возрастание интенсивности излучения, сужение спектральных полос и проявление в их максимумах ярко выраженной структуры узких линий излучения. В результате достигнута случайная генерация на длинах волн 525, 570, 600 и 650 нм (рис.4). Пороговые плотности мощности накачки составили 1100,

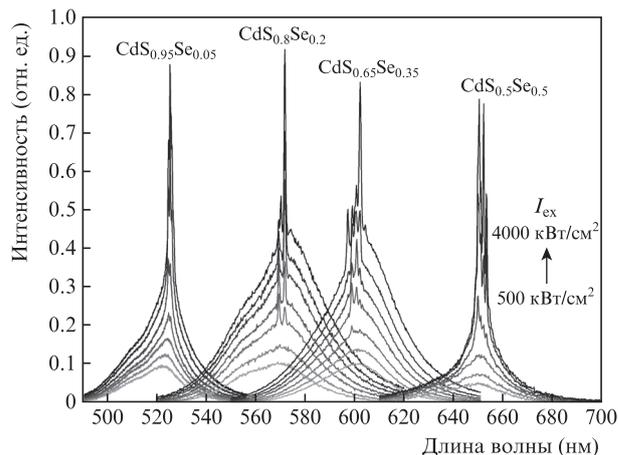


Рис.4. Спектры излучения микропорошков CdSSe при температуре 300 К и различных плотностях мощности  $I_{ex}$  излучения  $N_2$ -лазера ( $\lambda = 337$  нм).

1300, 1200 и 1600 кВт/см<sup>2</sup> для  $CdS_{0.95}Se_{0.05}$ ,  $CdS_{0.8}Se_{0.2}$ ,  $CdS_{0.65}Se_{0.35}$ ,  $CdS_{0.5}Se_{0.5}$  соответственно.

Полученные результаты могут найти применение при создании лазеров со случайной генерацией излучения видимого диапазона, в том числе и белого света, для применения в системах визуализации изображения, в технологиях освещения и др.

#### 4. Заключение

Получена случайная генерация лазерного излучения в микропорошке CdS на длине волны вблизи  $\lambda = 520$  нм при комнатной температуре и возбуждении десятинаносекундным импульсным излучением  $Nd^{3+}$ :YAG- и  $N_2$ -лазеров. Показано, что изменение от импульса к импульсу неоднородности распределения интенсивности в плоскости пятна возбуждающего излучения  $Nd^{3+}$ :YAG-лазера накачки приводит к нестабильности достижения случайной генерации лазерного излучения в микропорошке CdS при повторяющихся экспериментальных условиях. Использование  $N_2$ -лазера накачки с высокой пространственной однородностью излучения позволило получить стабильный режим генерации лазерного излучения в микропорошке CdS с наличием четкой структуры узких линий в районе 515–520 нм и с устойчивостью их спектрального положения при работе в импульсном режиме с частотой следования 700 Гц. Кроме того, стабильный режим генерации получен впервые в микропорошках твердых растворов  $CdS_{0.95}Se_{0.05}$ ,  $CdS_{0.8}Se_{0.2}$ ,  $CdS_{0.65}Se_{0.35}$ ,  $CdS_{0.5}Se_{0.5}$  на длинах волн 525, 570, 600 и 650 нм соответственно, с пороговыми интенсивностями в интервале 1100–1600 кВт/см<sup>2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф18А3-020).

1. Wiersma D.S. *Nat. Phys.*, **4**, 359 (2008).
2. Fallert J., Dietz R.J.B., Sartor J., Schneider D., Klingshirn C., Kalt H. *Nat. Photonics*, **3**, 279 (2009).
3. Noginov M. *Solid-State Random Lasers* (New York: Springer-Verlag, 2005).
4. Luan F., Gu B., Gomes A.S.L., Yong K.-T., Wen S., Prasad P.N. *Nano Today*, **10**, 168 (2015).
5. Cao H. *Waves Random Media*, **13**, R1 (2003).

6. Stasio F., Polovitsyn A., Angeloni I., Moreels I., Krahn R. *ACS Photonics*, **3**, 2083, (2016).
7. Li L.W. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 015206 (2016).
8. Gollner Cl., Ziegler J., Protesescu L., Dirin D.N., Lechner R.T., Fritz-Popovski G., Sytnyk M., Yakunin S., Rotter S., Amin A.A.Y., Vidal C., Hrelescu C., Klar T.A., Kovalenko M., Heiss W. *ACS Nano*, **9**, 9792 (2015).
9. Tian Y., Ma X., Jin L., Li D., Yang D. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 231101 (2012).
10. Takahashi T., Nakamura T., Adachi S. *Opt. Lett.*, **34**, 3923 (2009).
11. Леоненя М.С., Луценко Е.В., Павловский В.Н., Яблонский Г.П., Нагиев Т.Г., Тагиев Б.Г., Тагиев О.Б., Абушов С.А. *ЖИС*, **82**, 57 (2015).
12. Liu B., Chen R., Xu X.L., Li D.H., Zhao Y.Y., Shen Z.X., Xiong Q.H., Sun H.D. *J. Phys. Chem. C*, **115**, 12826 (2011).
13. Chen R., Utama M.I.B., Peng Z., Peng B., Xiong Q., Sun H. *Adv. Mater.*, **23**, 1404 (2011).
14. Alyamani A.Y., Leanenia M.S., Alanazi L.M., Aljohani M.M., Aljariwi A.A., Rzhetski M.V., Lutsenko E.V., Yablonskii G.P. *Proc. SPIE*, **9726**, 972625 (2016).
15. Mujumdar S., Türck V., Torre R., Wiersma D.S. *Phys. Rev. A*, **76**, 033807 (2007).
16. Redding B., Choma M.A., Cao H. *Nat. Photonics*, **6**, 355 (2012).
17. Wiersma D.S. *Nat. Photonics*, **7**, 188 (2013).
18. Mujumdar S., Ricci M., Torre R., Wiersma D.S. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 053903 (2004).