

# Новый класс источников монохроматического пространственно-некогерентного излучения: безрезонаторные порошковые лазеры с накачкой от полевых эмиссионных катодов

В.С.Летохов, С.К.Секацкий

*Предложен новый класс монохроматического пространственно-некогерентного излучения, использующих безрезонаторную генерацию света при накачке нанокристаллов электронным пучком.*

*Ключевые слова:* порошковые лазеры, нанокристаллы, эмиссионные катоды.

Безрезонаторная генерация света в сильнорассеивающей усиливающей среде была предсказана в 1967 г. [1, 2]. Первая экспериментальная демонстрация этого явления была осуществлена в середине 80-х годов на порошках кристаллов, содержащих редкоземельные ионы [3]. В последние годы наблюдается новый всплеск интереса к данной проблеме: лазерная генерация была продемонстрирована для растворов красителя, содержащего сильнорассеивающие частицы  $\text{TiO}_2$  [4], порошков  $\text{ZnO}$  [5, 6] и красителей в различных полимерных матрицах [7, 8]. Появились также новые теоретические работы в данной области (см., напр., [9] и цитируемую там литературу).

Совсем недавно была продемонстрирована возможность получения генерации при накачке порошков наночастиц (средний диаметр 20–40 нм), допированных редкоземельными ионами церия, празеодима и неодима, слабосфокусированным пучком электронов из электронной пушки с энергией в несколько килоэлектронвольт [10, 11]. Накачка электронным пучком, наряду с очевидными технологическими преимуществами, имеет и теоретическое обоснование: фотоны, используемые для оптической накачки сильнорассеивающих сред, в которых только и возможна безрезонаторная лазерная генерация [1, 2], испытывают очень сильное отражение от активной среды, что резко снижает эффективность процесса. Возбуждение же таких сред электронами с энергией 2–10 кэВ, напротив, весьма выгодно, поскольку глубина проникновения электронов при таких энергиях составляет десятки и сотни нанометров: электроны пронизывают весь объем нанокристалла и эффективно рассеивают свою энергию, накачивая активную среду. В зависимости от энергии электронов «активная зона», в которой достигается инверсия населенностей, может при этом создаваться на определенной глубине под поверхностью образца.

В работах [10, 11] были найдены следующие условия, необходимые для достижения лазерной генерации: токи электронов с энергией 2–10 кэВ и интенсивностью 3–30 мкА, позволяющие получить при фокусировке плотность тока 0.1–3 мА/см<sup>2</sup>.

Цель настоящей работы – обратить внимание на то, что указанная плотность тока обычно достигается сегодня при использовании многоострижных полевых эмиссионных катодов. Уже в одной из первых работ, где были предложены и реализованы многоострижные полевые эмиссионные катоды [12], продемонстрирована возможность получения плотности тока 3.2 А/см<sup>2</sup>; в настоящее время существуют десятки различных материалов и технологий изготовления таких катодов – как классических диодов Шпиндта, так и массивов кремниевых, алмазоподобных и других острых эмиттеров, эмиттеров на основе графитовых нанотрубок и т. п. (см. напр., [13]).

Заметим, что плотность тока, необходимая для достижения лазерной генерации, как раз близка к требуемой для реализации достаточно ярких плоских эмиссионных дисплеев, что является главной мотивацией при разработке полевых эмиссионных катодов (см., напр., [14]). Значительное увеличение плотности тока с точки зрения возбуждения когерентного излучения не имеет смысла, т. к. линейный рост интенсивности лазерного излучения, наблюдающийся после прохождения порога генерации «порошкового лазера», достаточно быстро сменяется насыщением. Так, например, для порошков  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  со средним диаметром нанокристаллов 27 нм (содержащих в среднем 240 ионов  $\text{Nd}^{3+}$  на нанокристалл) порог генерации достигался при токе 3.5 мкА и энергии электронов 8 кэВ, а насыщение – при токе 12 мкА [11]. Имеет смысл лишь увеличение геометрических размеров накачиваемой области при сохранении прежней плотности тока, а это как раз и есть та задача, которую решают разработчики полевых эмиссионных дисплеев.

На наш взгляд, использование хорошо разработанной (и дешевой при массовом производстве) технологии получения полевых эмиссионных массивов для накачки сильнорассеивающих безрезонаторных активных сред («порошковых лазеров») способно придать этому направлению совершенно новое значение. По сути, поскольку речь идет о *безрезонаторном* источнике света, задача состоит лишь в добавлении к стандартному полевому эмиссионному катоду слоя активной среды (рис. 1).

В качестве активной среды могут быть использованы как нанокристаллы, допированные редкоземельными металлами (разработана и запатентована оригинальная пироэлектrolитическая технология их получения [15],



Рис.1. Предлагаемая схема «порошкового» лазера, накачиваемого током от полевого эмиссионного многоострийного катода (масштаб не соблюден). Лазерное пространственное некогерентное излучение выводится через полупрозрачный анод, управляющий электрод может не применяться, что позволяет снизить требования к используемому эмиссионному катоду.

хотя нанокристаллы размером  $\sim 100$  нм вполне могут быть образованы путем механического раздробления макрообразцов и последующей их сортировки, см. напр., [16]), так и различные полимерные матрицы, насыщенные красителем, а также наночастицы алмаза, содержащие центры окраски (нанокристаллы алмаза размером до нескольких нанометров в настоящее время коммерчески доступны и технология их окрашивания хорошо разработана [17]), и т. д.

Типичный полевой эмиссионный катод должен быть таким, чтобы давать рабочий эмиссионный ток при напряжении в несколько десятков или сотен вольт. Это устройство должно быть оборудовано дополнительным электродом, на который подается ускоряющее напряжение в несколько киловольт, необходимое для накачки порошкового лазера (см. рис.1). Вся конструкция, таким образом, аналогична шпиндт-диоду с его управляющим электродом и анодом. В нашем случае, однако, поскольку использование напряжения в несколько киловольт является обязательным, можно обойтись и без управляющего электрода. Большие плотности тока должны создаваться при подаче на массив полевых эмиттеров напряжения в несколько киловольт, что позволяет резко снизить требования к остроте эмиттирующих острий и, следовательно, увеличить долговечность катода.

Геометрические размеры структуры могут достигать нескольких миллиметров. Изготовление отпаянных вакуумных устройств, содержащих такую конструкцию, не вызывает никаких трудностей.

Области применения подобного безрезонаторного лазера с накачкой от полевых эмиссионных катодов могут быть многочисленны. Это, разумеется, прежде всего те же области, где уже работают компактные полупроводниковые лазеры (к чему добавляются дополнительные возможности, обусловленные наличием узкой спектральной линии и возможностью генерации в самых различных спектральных областях, – УФ генерация на длине волны 362 нм уже была продемонстрирована в [10] для порошков  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Ce}$ ). Кроме того, беспспекловая пространственная структура генерируемого лазерного пространственного излучения может быть полезной при построении «не содержащих ряби» изображений, для устройств связи, дисплеев и даже для новых систем освещения.

1. Летохов В.С. *Письма в ЖЭТФ*, **5**, 262 (1967).
2. Летохов В.С. *ЖЭТФ*, **53**, 1442 (1967).
3. Маркушев В., Золин И., Брискина С. *Квантовая электроника*, **13**, 427 (1986).
4. Lawandy N.M., Balachandran R.M., Gomes A.S.L., Sauvain E. *Nature (Ldn)*, **368**, 436 (1994).
5. Cao H., Zhao Y.G., Ong H.C., Ho S.T., Dai J.Y., Wu J.Y., Chang R.P.H. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3656 (1998).
6. Cao H., Zhao Y.G., Ho S.T., Seelig E.W., Wang Q.H., Chang R.P.H. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2278 (1999).
7. Cao H., Xu J.Y., Chang S.H., Ho S.T. *Phys. Rev. E*, **61**, 1985 (2000).
8. Frolov S.V., Vardeny Z.V., Yoshino K. *Phys. Rev. B*, **57**, 9141 (1998).
9. Burin A.L., Ratner M.A., Cao H., Chang R.P.H. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, № 21, 215503 (2001).
10. Williams G.R., Bayram S.B., Rand S., Hinklin T., Lane R.M. *Phys. Rev. A*, **65**, 013807 (2001).
11. Li B., Williams G.R., Rand S., Hinklin T., Lane R.M. *Opt. Lett.*, **27**, № 6, 394 (2002).
12. Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E. R. *J. Appl. Phys.*, **47**, 5248 (1976).
13. *15th Intern. Field Emission Symp. and 48th Intern. Conf. on Vacuum Microelectronics Joint Meeting* (Lyon, France, 2002); *13th Intern. Conf. on Vacuum Microelectronics* (Guangou, China, 2000); *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, № 3, 862 (2001).
14. Chalamala B.R., Wei Y., Gnade B.E. *IEEE Spectrum*, **35**, 42 (1998).
15. Sutorik A.C., Neo S.S., Hinklin T., Baranwal R., Treadwell D.R., Narayan R., Laine R.M. *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**, 1477 (1998).
16. Choi W.B., Cuomo J.J., Zhirnov V.V., Myers A.F., Hren J.J. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 720 (1996).
17. Martin J., Wannamacher R., Teichert J., Bischoff L., Koehler B. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3096 (1999).