

PACS 42.55.Rz; 42.60.By; 42.60.Da; 42.60.Jf

## Мощный компактный лазер с сегментированной продольной накачкой связанных каналов генерации

Д.Н.Мамонов, Н.Н.Ильичев, А.А.Сироткин, П.А.Пивоваров, С.Г.Ребров,  
С.И.Державин, С.М.Климентов

*Представлены характеристики компактного Nd:YAG/Cr:YAG-лазера с сегментированной торцевой накачкой с использованием жгута из семи оптических волокон. В режиме оптической связи возникающих таким образом семи каналов генерации получены импульсы длительностью 3 нс с энергией до 20 мДж, а также их последовательности. Используемый метод позволяет масштабировать энергию и мощность лазеров подобного типа при контролируемом пространственном профиле излучения.*

**Ключевые слова:** Nd:YAG/Cr:YAG, микрочип-лазер, торцевая накачка, связывание каналов генерации, масштабирование мощности излучения.

Мощные компактные импульсные лазеры находят все более широкое применение в лазерной локации, в лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии и в устройствах воспламенения топлива в двигателях [1–4]. Устройства с пассивной модуляцией добротности весьма востребованы благодаря простоте, надежности и небольшой стоимости [5–9]. Использование продольной диодной накачки активной среды позволяет уменьшить габариты лазера при хорошем согласовании областей накачки и генерации, а малая длина резонатора дает возможность генерировать короткие мощные импульсы. Сообщается о достижении энергии  $E \sim 6$  мДж при длительности импульса  $\tau = 1.5$  нс [10], а в аналогичных системах, предназначенных для генерации оптических гармоник, до 3 мДж в импульсе с  $\tau = 230$  пс [11]. Однако дальнейшее увеличение выходной энергии таких лазеров оказывается проблематичным. Протяженность активной среды при торцевой накачке ограничена глубиной поглощения, и рост запасенной в ней энергии может быть достигнут лишь увеличением поперечных размеров накачиваемой области и, до некоторой степени, уровня начальных потерь в резонаторе. Продвижение по второму пути ограничено оптической стойкостью элементов. Увеличение объема накачиваемой среды в условиях контролируемого модового состава излучения может быть осуществлено при формировании нескольких каналов генерации в одном активном элементе за счет секционирования накачки, т.е. разнесения возбуждаемых областей в пространстве. Следуя этому прин-

ципу, авторы работы [12] добились утроения выходной энергии Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG-лазера, однако импульсы в трех созданных каналах генерировались независимо ( $E = 2.4$  мДж на канал,  $\tau = 0.85$  нс), и временное рассогласование между импульсами превышало 10 мкс. Секционная продольная накачка использовалась также в работе [13] для создания канала генерации в пределах одной поперечной моды резонатора. Энергия импульса, как следствие, была мала, и потенциал ее масштабирования не реализовывался. В качестве концептуально близкого описываемому в работе подходу можно рассматривать сопряжение близкорасположенных полупроводниковых, волоконных или газовых суперлюминесцентных излучателей, помещаемых в общий резонатор [14–18].

Представленный в настоящей работе лазер содержит семь накачиваемых каналов, генерация которых может происходить как раздельно, так и в режиме оптической связи (в зависимости от настройки оптической системы секционированной торцевой накачки). Схема лазера представлена на рис.1. Резонатор длиной 24 мм образован плоским зеркалом на торце активного элемента Nd:YAG длиной 12 мм и выходным плоским зеркалом. Модуляция добротности осуществляется отдельно стоящим элементом Cr<sup>4+</sup>:YAG, накачка на длине волны 808 нм – семь

Д.Н.Мамонов, Н.Н.Ильичев, П.А.Пивоваров, С.И.Державин, С.М.Климентов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: mamonau.dzmitry@gmail.com, kliment@kapella.gpi.ru  
А.А.Сироткин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; ГИЦ РФ «Исследовательский центр им. М.В.Келдыша», Россия, 125438 Москва, ул. Онежская, 8; e-mail: anatolysirotkin@gmail.com  
С.Г.Ребров. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 25 июня 2014 г., после доработки – 28 ноября 2014 г.

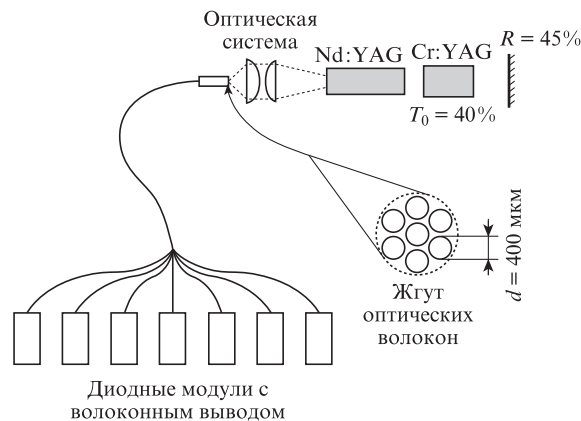


Рис.1. Схема лазера.

импульсными диодными модулями (DILAS) с волоконным выводом мощностью 100 Вт каждый. Многомодовые оптические волокна с сердцевинной диаметром 400 мкм собирались в жгут, выход которого отображался на кристалл активного элемента с помощью просветленного двухлинзового объектива. Аналогично [6] совокупность связанных параметров оптической схемы, таких как отражение выходного зеркала  $R$ , начальное пропускание затвора  $T_0$ , увеличение объектива  $\Gamma$  и продольное положение торца активного элемента, оптимизировалась для получения максимальной выходной энергии импульса длительностью не более 5 нс. Наибольшая суммарная энергия (20 мДж) достигалась при  $R = 45\%$ ,  $T_0 = 40\%$  и  $\Gamma = 3$ .

Характер генерации существенным образом зависел от расстояния  $L$  между выходной линзой оптической системы и торцом кристалла Nd:YAG. Если кристалл оказывался вблизи плоскости изображения торца волоконного жгута, наблюдалась генерация импульсов в семи независимых каналах. Временной разброс импульсов между ними достигал нескольких десятков микросекунд, а энергия каждого составляла 2.8–3.0 мДж. С уменьшением расстояния  $L$  устанавливалась связь каналов, при этом излучался одиночный импульс длительностью 3 нс по высоте (рис.2). Наблюдаемое изменение режима генерации обусловлено трансформацией поперечного профиля накачки, задающего распределение поглощенной энергии по объему активного элемента, что в конечном счете определяет профиль усиления активной среды в направ-

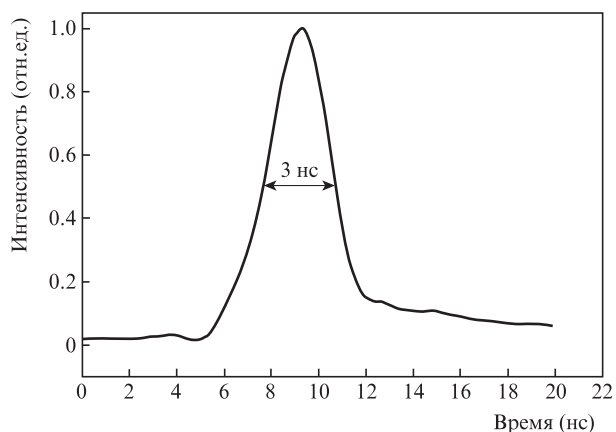


Рис.2. Форма импульса синхронной генерации.

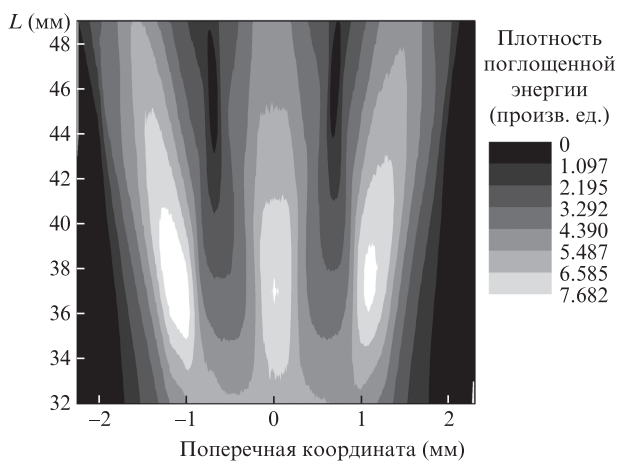


Рис.3. Поперечные профили поглощенной энергии накачки в активном элементе в зависимости от параметра настройки оптической системы  $L$ .

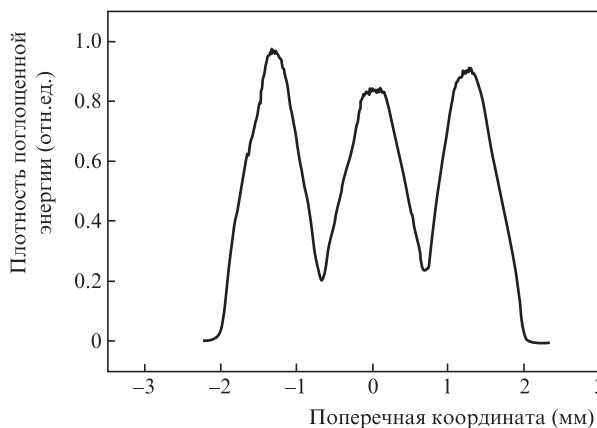


Рис.4. Профиль поглощенной энергии накачки в активном элементе в режиме связи каналов генерации ( $L = 40$  мм).

лении оси резонатора. Диаграмма на рис.3 позволяет сравнивать поперечные профили поглощенной энергии или усиления в зависимости от параметра настройки оптической системы, т.е. от  $L$ . Для каждого из значений  $L$  с помощью ПЗС-матрицы измерялась серия профилей накачки с небольшим шагом в области размещения кристалла активного элемента, а полученные значения суммировались вдоль его оси с учетом ослабления накачки по закону Бугера. Необходимость продольного сканирования объясняется заметным изменением профиля вдоль оси из-за небольшой глубины резкости объектива ( $\sim 5$  мм). Положению торца кристалла в плоскости изображения оптической системы соответствует  $L = 47$  мм, а связь каналов генерации происходит при  $L = 42$  мм. Как следует из рис.4, связь возникает при небольшом ( $\sim 20\%$ ) перекрытии профилей поглощения накачиваемых сегментов. Максимальная энергия в режиме синхронизации каналов (20 мДж) имела место вблизи порога связывания ( $L = 40-42$  мм). Профиль выходного излучения в этом диапазоне формировался совокупностью семи излучателей с диаметром пучка  $\sim 1$  мм и расходимостью примерно 7 мрад для каждого канала. Дальнейшее сокращение расстояния между объективом и кристаллом сопровождалось постепенным снижением энергии одиночного импульса. Предполагается, что это обусловлено уменьшением диаметра накачиваемой области в кристалле и ухудшением пространственного согласования областей накачки и генерации. Пространственное распределение выходного излучения при этом заметно сглаживалось, плавно переходя к распределению, характерному для многомодовой лазерной генерации.

При увеличении длительности импульса накачки в режиме связи каналов наблюдалась генерация двух и более коротких импульсов приблизительно равной энергии, характерный интервал между которыми составлял 200 мкс. Рабочий цикл используемых диодных модулей, работающих в квазинепрерывном режиме, позволял получать последовательности до четырех импульсов.

Описанный в настоящей работе подход открывает возможность масштабирования выходной энергии и мощности лазеров с продольной накачкой простыми средствами — путем создания большего числа накачиваемых сегментов, а также позволяет управлять пространственным профилем излучения за счет их перекрытия и, кроме того, допускает корректировку профилей выходного излучения балансировкой накачки по каждому из каналов.

Достигнуты рекордные для данного типа устройств энергия и близкая к рекордной мощность коротких лазерных импульсов.

1. Titterton D. H. *Development of Infrared Countermeasure Technology and Systems* (London: Springer, 2006, с. 635).
2. Bhandari R., Taira T. *Opt. Express*, **19**, 19135 (2011).
3. Sennaroglu A. *Solid-state Lasers and Applications* (CRC Press, 2010).
4. Kopecek H., Maier H., Reider G., Winter F., Wintner E. *Experim. Thermal Fluid Sci.*, **27**, 499 (2003).
5. Басиев Т.Т., Гарнов С.В., Климентов С.М., Пивоваров П.А., Гаврилов А.В., Сметанин С.Н., Солохин С.А., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **37**, 956 (2007).
6. Гарнов С.В., Епифанов А.С., Климентов С.М., Маненков А.А., Никольский М.Ю., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **18**, 1040 (1991).
7. Данилов А.А., Жариков Е.В., Загуменный А.И., Лутц Г.Б., Никольский М.Ю., Цветков В.Б., Щербаков А.И. *Квантовая электроника*, **16**, 474 (1989).
8. Calmano T., Siebenmorgen J., Hellmig O., Petermann K., Huber G. *Appl. Phys. B*, **100**, 131 (2010).
9. Сироткин А.А. Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. *Квантовая электроника*, **41**, 584 (2011).
10. Kofler H., Tauer J., Tartar G., Iskra K., Klausner J., Herdin G., Wintner E. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 322 (2007).
11. Bhandari R., Taira T. *Opt. Eng.*, **52**, 076102 (2013).
12. Pavel N., Tsunekane M., Taira T. *Opt. Express*, **19**, 9378 (2011).
13. Kaneda Y., Oka M., Masuda H., Kubota S. *Opt. Lett.*, **17**, 1003 (1992).
14. Лиханский В.В., Напартович А.П. *УФН*, **160**, 101 (1990).
15. Глова А.Ф. *Квантовая электроника*, **33**, 283 (2003).
16. Yelden E.F., Seguin H.J.J., Capjack C.E., Reshef H. *J. Opt. Soc. Am. B*, **10**, 1475 (1993).
17. Leger J.R., Scott M.L., Veldkamp W.B. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1771 (1988).
18. Державин С.И., Дюкель О.А., Лындин Н.М. *Квантовая электроника*, **42**, 561 (2012).