

УДК 681.7.068./069

**А.В. Исаев, А.А. Колегов, Е.Г. Акулинин, Е.А. Белов, Ю.В. Осеев**

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт технической физики  
им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

## **МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ**

Разработан компактный импульсно-периодический волоконный лазер с длительностью импульса ~2,4 нс, частотой следования импульсов 11 кГц, номинальной энергией в импульсе ~180 мкДж и длиной волны генерации 1061,6 нм.

**Ключевые слова:** импульсно-периодический волоконный лазер, иттербиевое активное волокно.

**A.V. Isaev, A.A. Kolegov, E.G. Akulinin, E.A. Belov, Yu.V. Oseev**

E.I. Zababakhin All-Russian Scientific-Research Institute of Technical Physics,  
Russian Federal Nuclear Centre, Snezhinsk, Russian Federation

## **COMPACT PULSE-PERIODIC YTTERBIUM FIBER LASER WITH HIGH ENERGY**

A compact repetitively pulsed fiber laser with a pulse duration of ~2.4 ns, a pulse repetition rate of 11 kHz, a nominal pulse energy of ~180  $\mu$ J, and a generation wavelength of 1061.6 nm was developed.

**Keywords:** repetitively pulsed fiber laser, ytterbium active fiber.

### **Введение**

Импульсно-периодические волоконные лазеры являются привлекательными источниками излучения для таких приложений, как обработка материалов, дальнометрия, системы 3D-видения и др. В настоящее время перспективными и востребованными являются лазеры с высокими энергетическими характеристиками, сочетающие в себе многофункциональность и компактность.

В данной работе представлены результаты разработки и экспериментальной отработки компактного импульсно-периодического иттербиевого волоконного лазера с возможностью бортового применения.

### Оптическая схема лазера

Существующие аналогичные лазерные системы имеют следующие параметры излучения:

- импульсный режим генерации;
- центральная длина волны  $1064 \pm 3$  нм;
- спектральная ширина линии импульсного излучения не более 5 нм;
- номинальная энергия в импульсе на менее 180 мкДж;
- длительность импульса не более 3 нс;
- частота повторения импульсов 11 кГц.

Оптическая схема разрабатываемого лазера должна обеспечивать указанные параметры излучения с учетом факторов, ограничивающих выходную мощность (оптический пробой, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР)), а также внешних факторов, влияющих на работоспособность лазера.

В результате обзора литературы найдены схемы лазеров с близкими к необходимым параметрами излучения [1], [2]. Определена общая концепция построения схемы – «задающий генератор-усилитель» (рис. 1). Задающий генератор представляет собой полупроводниковый лазерный диод. Излучение задающего генератора усиливается в предусилителе, а затем в усилителе. Делитель излучения позволяет отслеживать мощность лазера и ввести пилотное излучение.

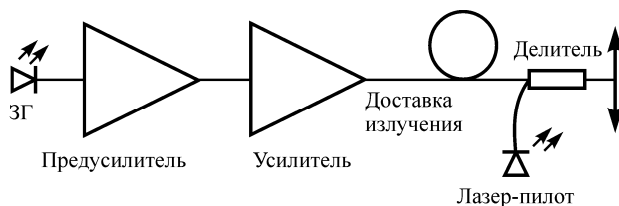


Рис. 1. Общая концепция схемы лазера

По результатам собственных исследований выявлено, что основными ограничивающими выходную мощность факторами являются оптический пробой и ВКР. Вынужденное рассеяние Манделъштама–

Брюллиена (ВРМБ) не учитывается, поскольку длительность импульсов менее 10 нс [3] и спектр излучения составляет 5 нм [3]. Пороговая мощность возникновения ВКР [3]:

$$P_{th}^{SRS} \sim \frac{16A_{eff}}{L_{eff} \cdot g_R},$$

где  $g_R$  – коэффициент ВКР усиления для объемного образца (для кварца,  $g_R = 0,5 \cdot 10^{-13}$  м/Вт),  $L_{eff}$  – эффективная длина волокна,

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha \cdot L)],$$

$\alpha$  – коэффициент потерь ЛИ;  $L$  – физическая длина волокна.

Таблица 1

Порог возникновения ВКР для разных волокон

Параметр	Волокно с поддержкой поляризации			
	6/125 мкм	10/125 мкм	15/125 мкм	20/125 мкм
$d$ , мкм	6	10	15	20
$A_{eff}$ , мкм <sup>2</sup>	28	79	177	314
$L_{eff}$ , м	10	5	3	2
$P_{SRS}$ , кВт	0.9	5	19	50

Примечание:  $d$  – диаметр сердцевины;  $A_{eff}$  – площадь моды;  $L_{eff}$  – эффективная длина волокна;  $P_{SRS}$  – порог возникновения ВКР.

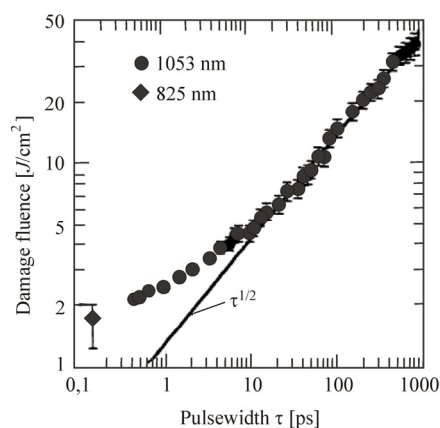


Рис. 2. Порог оптического пробоя для кварцевого стекла [4]

В табл. 1 представлены результаты оценки порога возникновения ВКР для разных типовых волокон, учитывая, что  $A_{эфф}$  равна площади сердцевины волокна.

Для оценки порога оптического пробоя воспользуемся зависимостью, приведенной в работе [5] и представленной на рис. 2.

В соответствии с рис. 2, учитывая корневую зависимость порога оптического пробоя [5], примем порог оптического пробоя равным

70 Дж/см<sup>2</sup> или 0,7 мкДж/мкм<sup>2</sup>. Учитывая, что длительность импульса составляет 3 нс, то пороговая интенсивность составит порядка 233 Вт/мкм<sup>2</sup>. Результаты оценки пороговой мощности пробоя сведены в табл. 2.

Таблица 2

Пороговая мощность оптического пробоя

Параметр	Волокно с поддержкой поляризации			
	6/125 мкм	10/125 мкм	15/125 мкм	20/125 мкм
$d$ , мкм	6	10	15	20
$A_{\text{eff}}$ , мкм <sup>2</sup>	28	79	177	314
$P_{OD}$ , кВт	6.6	18.3	41.2	73.3

Примечание:  $d$  – диаметр сердцевины;  $A_{\text{eff}}$  – площадь моды;  $P_{OD}$  – порог оптического пробоя.

Из табл. 1 и 2 видно, что порог возникновения ВКР ниже, поэтому это ключевой ограничивающий выходную мощность критерий. Кроме того, учитывая, что при заданных параметрах излучения (длительность импульса ~ 3 нс, номинальная энергия в импульсе ~ 180 мкДж) пиковая мощность в импульсе составит ~ 60 кВт, что выше оценки порога возникновения ВКР для рассмотренных волокон.

В табл. 3 приведены оценки порогов оптического пробоя и ВКР для волокна с диаметром сердцевины 25 мкм.

Таблица 3

Оценка порогов для волокна с диаметром сердцевины 25 мкм

Параметр	Волокно с поддержкой поляризации (25/250 мкм)
$d$ , мкм	25
$A_{\text{eff}}$ , мкм <sup>2</sup>	490
$L_{\text{eff}}$ , м	2
$a$ , дБ/м (920 нм)	2.6
$P_{\text{SRS}}$ , кВт	78
$P_{OD}$ , кВт	114,5

Примечание:  $d$  – диаметр сердцевины;  $A_{\text{eff}}$  – площадь моды;  $L_{\text{eff}}$  – эффективная длина волокна;  $P_{\text{SRS}}$  – порог возникновения ВКР;  $P_{OD}$  – порог оптического пробоя.

Использование данного волокна теоретически делает возможным достижение необходимых параметров излучения.

Учитывая возможность бортового применения лазера, проведены испытания оптоволоконных элементов лазера на воздействие внешних факторов:

- широкий температурный диапазон (хранение от  $-60$  до  $+60$  °С, рабочая температура от  $-20$  до  $+40$  °С);
- механические нагрузки (линейные ускорения, синусоидальные воздействия и вибрации, ударные ускорения).

Результаты испытаний показали, что оптические характеристики оптоволоконных элементов остались без изменения. Выявлено, что мощность модулей накачки снижается от 4 до 8 % при температурном воздействии плюс 80 °С.

Стоит отметить, что стойкость к воздействию внешних факторов электронных компонентов лазера обеспечивается их исполнением в соответствующей категории качества.

### Оптическая схема лазера

Исходя из общей концепции построения оптической схемы лазера (см. рис. 1), а также учитывая возможные условия эксплуатации и приведенные выше расчеты, предложены схемы предусилителя и усилителя (рис. 3 и 4).

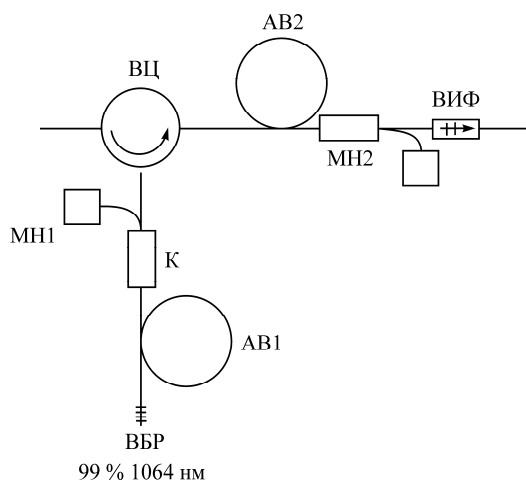


Рис. 3. Схема предусилителя: МН – модуль накачки; ВЦ – волоконный циркулятор; К – волоконный объединитель накачки; АВ – активное волокно; ВИФ – волоконный изолятор с фильтром; ВБР – волоконная брэгговская решетка

Предусилитель (см. рис. 3) представляет собой два усилительных каскада выполненных на волокне с диаметром сердцевины/оболочки 6/125 мкм. Первый предусилительный каскад работает в двухпроходном режиме за счет применения волоконного циркулятора и глухой брэгговской решетки. В то же время циркулятор выступает

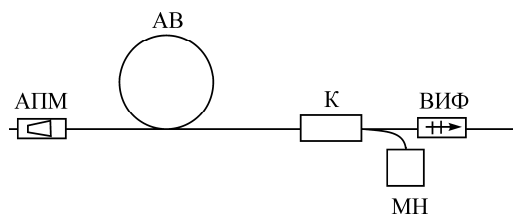


Рис. 4. Схема усилителя: АПМ – адаптер поля моды; АВ – активное волокно; К – волоконный объединитель накачки; МН – модуль накачки; ВИФ – волоконный изолятор с фильтром

в качестве развязки между каскадами предусиления, а волоконная брэгговская решетка – в качестве узкополосного фильтра излучения накачки и люминесценции. Второй предусилительный каскад работает в однопроходном режиме и накачивается в направлении, противоположном распространению сигнала, что исключает из спектра излучения лазера непоглощенную накачку. На выходе второго предусилителя приварен волоконный изолятор с узкополосным фильтром излучения.

Усилительный каскад выполнен на волокне с диаметром сердцевины/оболочки 25/250 мкм. Переход с волокна 6/125 мкм на волокно 25/250 мкм осуществляется с помощью волоконного адаптера поля моды. Архитектура каскада идентична второму предусилительному каскаду.

Стоит отметить, что основным параметром, зависящим от температуры, является длина волны излучения накачки. Дрейф длины волны лазерных диодов составляет 0,3 нм/К. Поэтому для накачки активного волокна используются диоды с длиной волны 915 нм. Пик поглощения ионов иттербия в этой области шире, чем в области 975 нм. Таким образом, снижены требования к термостабилизации диодов накачки. Спектр поглощения и эмиссии ионов иттербия представлен на рис. 5.

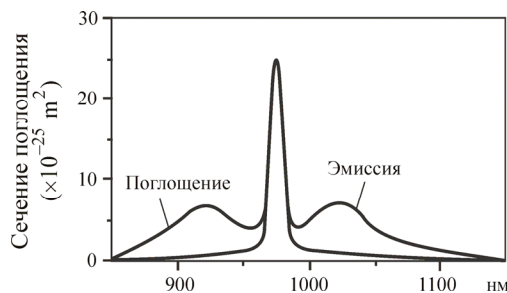


Рис. 5. Спектр поглощения и эмиссии ионов иттербия

## Результаты экспериментальной отработки

Сборка и отработка схем предусилителя и усилителя производилась с задающим генератором, формирующим импульсы излучения средней мощностью  $\sim 2$  мВт. Таким образом, усиление должно составлять 6 порядков, при этом

предварительные каскады усиления должны приводить к насыщенному усилению (примерно 100 мВт). Спектр излучения лазера представлен на рис. 6.



Рис. 6. Спектр излучения лазера

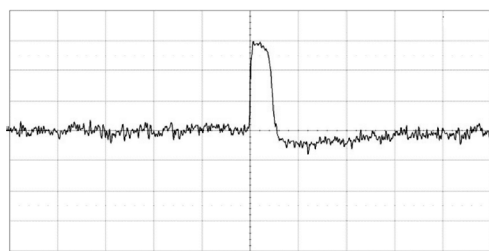


Рис. 7. Форма импульса излучения лазера

Спектр излучения измерялся с помощью спектрометра с разрешающей способностью 0,2 нм. Центральная длина волны составила 1061,6 нм, при этом ширина спектра на  $\sim 2$  нм.

Осциллограмма импульса излучения, представленная на рис. 7, измерялась с помощью фотодатчика на основе фотодиода HFBR-2316 TZRХ 1143 и осциллографа с полосой пропускания 4 ГГц. Длительность импульса  $\sim 2,4$  нс, цена деления – 1 нс.

Средняя мощность излучения лазера составила  $\sim 2$  Вт, что при частоте следования импульсов 11 кГц соответствует энергии  $\sim 180$  мкДж и пиковой мощности  $\sim 75$  кВт.

## Заключение

Разработан компактный импульсно-периодический иттербиевый волоконный лазер с длительностью импульса  $\sim 2,4$  нс, частотой следования импульсов 11 кГц и энергией в импульсе  $\sim 180$  мкДж. Длина волны генерации лазера 1061,6 нм, ширина спектра  $\sim 2$  нм. Габаритные размеры лазера: 232×160×55 мм. Масса лазера 2,5 кг. Проведены комплексные исследования по стойкости волоконных элементов лазера, корпуса, механических изделий на воздействие температуры в широком диапазоне и механических нагрузок. Показано, что разработанный

отечественный макет волоконного лазера не уступает по характеристикам зарубежным лазерам ведущих производителей.

### Список литературы

1. 50W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns- $\mu$ s pulse durations and kHz-MHz repetition rates / V. Khitrov, B. Samson, D. Machewirth, K. Tankala // *Proc. of SPIE*. – 2008. – Vol. 6873. – P. 68730C–68730D.

2. Simple design for singlemode high power CW fiber laser using multimode high NA fiber / B. Morasse, S. Chatigny, C. Desrosiers, É. Gagnon, M.-A. Lapointe, J.-P de Sandro // *Proceedings Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications*. – 2009. – Vol. 7195. – P. 71952C–71952D.

3. Agraval G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. – London: Academic press, 1989. – 342 p.

4. Koechner W. *Solid state laser engineering*. – 6<sup>th</sup> edition. – Springer, New York, 2006. – 750 p.

5. Wood R.R. *Laser induced damage of optical material*. – Philadelphia, CRC Press Published, 2003. – 241 p.

### References

1. Khitrov V., Samson B. Machewirth D., Tankala K. 50W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns- $\mu$ s pulse durations and kHz-MHz repetition rates. *Proc. of SPIE*, 2008, vol. 6873. pp. 68730C-68730D.

2. Morasse B., Chatigny S., Desrosiers C., Gagnon É., Lapointe M.-A., de Sandro J.-P. Simple design for singlemode high power CW fiber laser using multimode high NA fiber. *Proceedings Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications*, 2009, vol. 7195, pp 71952C-71952D.

3. Agraval G.P. *Nonlinear fiber optics*. London, Academic press, 1989. 342 p.

4. Koechner W. *Solid state laser engineering*. Springer, 2006. 750 p.

5. Wood R.M. *Laser induced damage of optical material*. Philadelphia, CRC Press Published, 2003, 241 p.

Получено 18.09.2018