

И. А. Лобач¹, С. И. Каблуков²¹ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия² Институт автоматки и электрометрии СО РАН
пр. Акад. Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: djam@gorodok.net

СЕЛЕКЦИЯ ЧАСТОТЫ В ЛАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХСЕРДЦЕВИННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В данной работе реализован и исследован лазер на основе четырехсердцевинного иттербиевого волокна и одномодовой брэгговской решетки. Несмотря на то что обратная связь была сделана только для одной сердцевинки, лазерная генерация происходит во всех четырех сердцевинах. Это доказывает взаимодействие излучений из разных сердцевин. Модель взаимодействия, основанная на теории связанных мод, не подтвердилась.

Ключевые слова: оптическое волокно, волоконный лазер, брэгговская решетка.

Введение

Волоконные лазеры являются одним из ярких достижений волоконной оптики и лазерной физики. Основными преимуществами оптоволоконных лазеров являются: эффективный теплоотвод, компактность и малый вес, высокое качество выходного излучения, высокая стабильность, высокая эффективность использования накачки и при всем этом относительно низкая стоимость.

Во многих приложениях требуется мощное (более 1 кВт) одномодовое излучение. Однако для увеличения мощности необходимо увеличение площади сердцевинки оптического волокна, что в свою очередь приводит к неодномодовости выходного излучения. Для сохранения одномодового режима излучения при производстве оптического волокна необходимо точно соблюсти очень маленькую ($\Delta n \sim 0,002$) разность показателей преломления между сердцевинкой и оболочкой. Дальнейший рост выходной мощности может быть получен при использовании когерентного сложения излучения нескольких лазеров. Один из способов реализации данной задачи основан на интерферометрической конфигурации резонатора с использованием волоконных ответвителей.

Однако выходная мощность, полученная данным методом мала, так как волоконный ответвитель вносит в систему дополнительные оптические потери.

Другой подход – применение многосердцевинных активных волокон в качестве активной среды лазера. Главная проблема в когерентном сложении состоит в реализации фазовой синхронизации излучений, распространяющихся в различных сердцевинах. Например, в работе [1] был реализован лазер на основе 19-сердцевинного иттербиевого волокна. В качестве резонатора использованы пассивные волокна определенной длины и нанесенные на торцы волокна зеркала (резонатор Тальбота).

Другая реализация фазовой синхронизации излучений – использование многомодовой брэгговской решетки. В работе [2] был сделан лазер на основе иттербиевого четырехсердцевинного оптического волокна и брэгговской решетки показателя преломления, записанной в градиентном волокне. Одним из результатов этой работы стало получение генерации во всех сердцевинах с очень узкой шириной спектра – порядка 0,02 нм (для лазеров на основе иттербиевого односердцевинного волокна ширина линии составляет 0,2 нм). Этот факт объясняется тем, что излучения из разных сердцевин взаимо-

действуют между собой внутри многомодового волокна между решеткой Брэгга и местом сварки с активным волокном. Авторы исключают прямое оптическое взаимодействие по длине световода, так как расстояние между сердцевинами очень велико (при диаметре сердцевины 6 мкм расстояние между ближайшими сердцевинами – 25 мкм). В настоящей работе был реализован лазер на основе иттербиевого четырехсердцевинного оптического волокна и одномодовой брэгговской решетки.

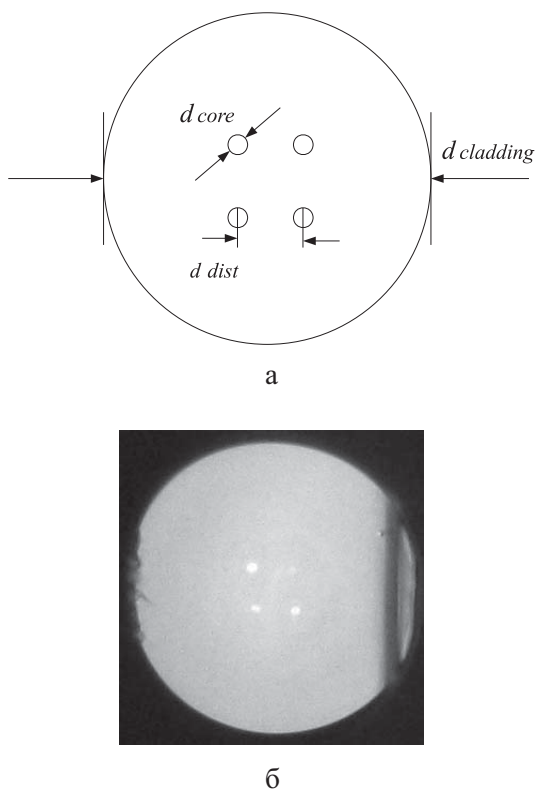


Рис. 1. Четырехсердцевинное волокно: а – модель; б – фотография

Характеристики четырехсердцевинного иттербиевого оптического волокна

В качестве активной среды лазера использовалось четырехсердцевинное иттербиевое оптическое волокно (рис. 1).

Характеристики волокна: диаметр сердцевины $d_{core} = 6,5$ мкм; диаметр оболочки $d_{cladding} = 200$ мкм; расстояние между сердцевинами $d_{dist} = 27,5 \div 28,5$ мкм; разность показателей преломления между сердцевиной и оболочкой $\Delta n = 0,008$; концентрация ионов иттербия в сердцевинах $N \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Схема установки и ее описание

В качестве накачки исследуемого лазера использовался диодный лазер с волоконным выходом и длиной волны излучения $\lambda_{pump} = 970$ нм. Для заведения накачки применены две линзы (с фокусными расстояниями 11,0 и 4,5 мм) и зеркало. Оно пропускает излучение накачки, но не пропускает генерируемую в волоконном лазере волну обратно в диодный лазер. Такая схема необходима для защиты лазерного диода от обратного излучения. Линза с фокусным расстоянием $f_2 = 4,5$ мм фокусирует излучение накачки в иттербиевое четырехсердцевинное волокно длиной 6 м.

В качестве зеркал резонатора лазера использовались с одной стороны прямой скол волокна (коэффициент отражения $R_1 \sim 4\%$), с другой – одномодовая брэгговская решетка на длину волны $\lambda_{laser} = 1066$ нм с шириной $\Delta\lambda \sim 1$ нм (коэффициент отражения $R_2 > 99\%$), приваренная к одной из сердцевины. Сварка волокон производилась с применением геля (показатель преломления геля

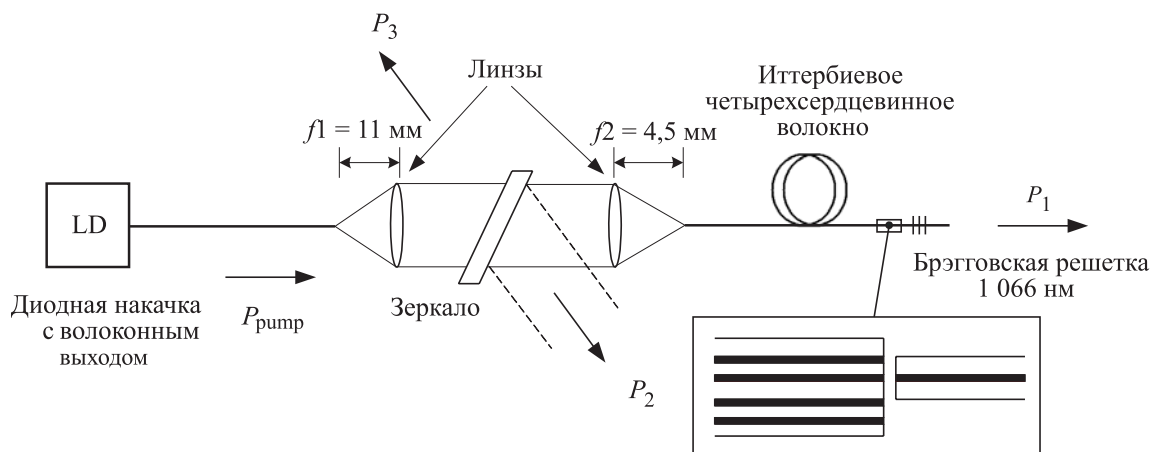


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

близок к показателю преломления стекла), чтобы исключить генерацию лазера на торцах активного волокна. Таким образом, была реализована обратная связь только для одной сердцевинки, а не для всех, в отличие от работы [2].

Характеристики лазера

Несмотря на то что обратная связь была создана только для одной из сердцевин (для ядра 4), было обнаружено, что все четыре сердцевинки генерируют излучение на длине волны решетки 1 066 нм. На рис. 3 представлены энергетические характеристики лазера. Нумерация сердцевин производилась по часовой стрелке.

На рис. 4 представлены спектры генерации каждой сердцевинки до и после склейки с решеткой. Видно, что в отсутствие геля помимо генерации на решетке происходит генерация на торцах волновода. При нанесении геля паразитная генерация исчезает.

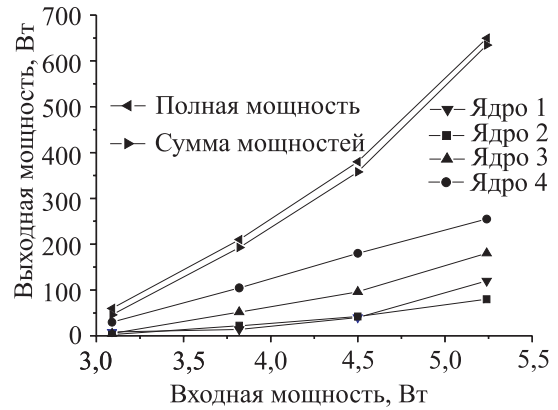


Рис. 3. Зависимость выходной мощности лазера (P_2) от мощности, входящей в лазер

На рис. 5, а представлено семейство спектров генерации каждой сердцевинки, снятых в различные моменты (спектры наложены один на другой). Видно, что спектр генерации лазера состоит из двух пиков, разделенных расстоянием 0,2 нм. Отметим, что этот

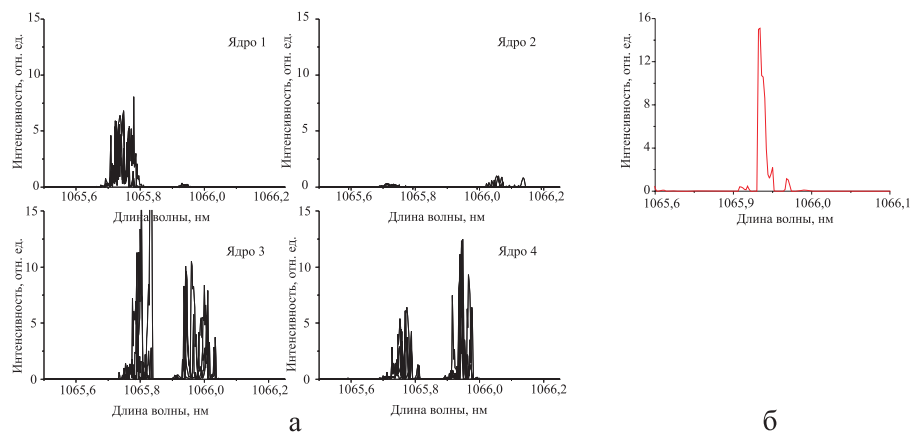
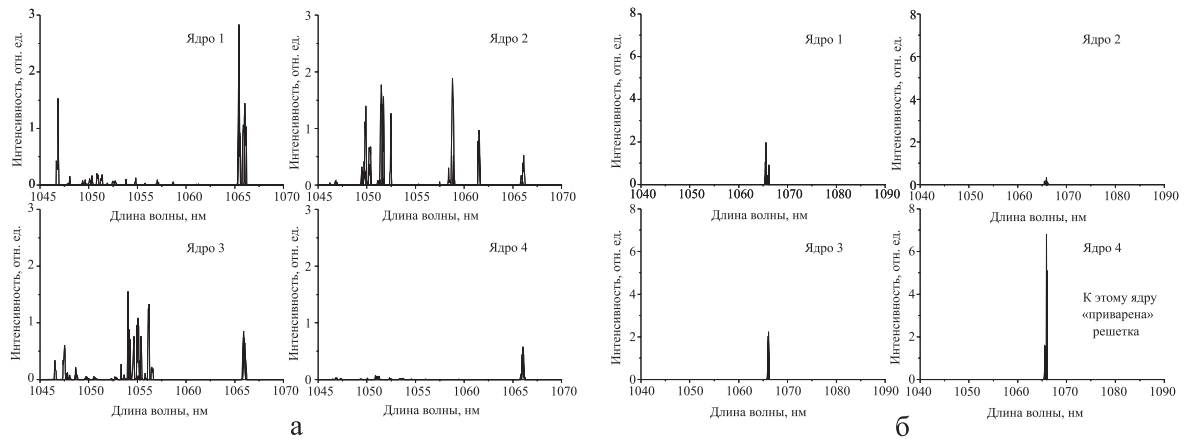


Рис. 5. Спектр генерации лазера после склейки с решеткой. Мощность накачки 3,8 Вт. Разрешение спектроанализатора 0,02 нм

эффект в лазере на основе односердцевинного активного волокна не наблюдался. На рис. 5, б изображен спектр генерации сердцевинны 4. Ширина пика $\Delta\lambda \sim 0,025$ нм. Для лазера на основе односердцевинного иттербиевого волокна эта ширина составляет $\Delta\lambda \sim 0,2$ нм, что на порядок больше.

Обсуждение полученных результатов

Мы видим, что в поставленном эксперименте проявляется взаимодействие излучений из разных сердцевин по длине волокна. Остается вопрос о механизме этого взаимодействия. Ранее считалось, что излучения взаимодействуют посредством туннелирования (теория связанных мод, направленный ответитель [3; 4]). Оценим роль этого эффекта, для чего обратимся к задаче о двух параллельных волноводах, в которых взаимодействуют основные моды. Мощность в такой системе будет периодически по длине перекачиваться из одного волновода в другой. Характерный масштаб перекачки определяется отношением расстояния между волноводами к их размеру. К примеру, если мы запустим излучение в первый волновод, то зависимость распределения мощности по сердцевинам от расстояния, пройденного излучением, будет следующей [4]:

$$\begin{aligned} P_1(z) &= 1 - \sin^2(C \cdot z), \\ P_2(z) &= \sin^2(C \cdot z). \end{aligned} \quad (1)$$

C – коэффициент связи между соседними сердцевинами при взаимодействии основных мод, который находится из следующего выражения:

$$C = \frac{2\sqrt{\delta} U^2}{d_{core} V^3} \frac{K_0(W \cdot 2d_{dist} / d_{core})}{K_1^2(W)},$$

где

$$\delta = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2.$$

V – безразмерная частота, которая определяется следующим образом:

$$V^2 = \left(\frac{\pi d_{core} n_1}{\lambda} \right)^2 \cdot \delta = U^2 + W^2.$$

U – является решением уравнения

$$U \cdot K_0(W) \cdot J_1(U) = W \cdot K_1(W) \cdot J_0(U),$$

где J – функции Бесселя; K – модифицированные функции Ханкеля; n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевинны и оболочки соответственно; λ – длина волны распространяющегося излучения.

Как видно из уравнения (1), через длину, равную $L = \pi / 2C$, излучение из первой сердцевинны полностью перейдет во вторую. В настоящей работе была рассчитана длина взаимодействия с параметрами исследуемого волокна. Получено, что $L \approx 4$ км, что намного больше длины лазера $L_{laser} = 6$ м. Таким образом, эффект перекачки по механизму туннелирования в данном случае пренебрежимо мал.

Выводы

Установлено, что взаимодействие излучений из разных сердцевин происходит на всей длине активного волокна. При этом гипотеза о механизме перекачки, основанная на теории связанных мод, не подтвердилась.

Также обнаружено, что спектр генерации полученного лазера состоит из двух пиков, разделенных расстоянием 0,2 нм. Такой эффект в односердцевинном волокне не наблюдался.

Установлено, что ширина спектра генерации в четырехсердцевинном волокне на порядок меньше, чем в односердцевинном. Аналогичный результат был получен в работе [2].

Последние два эффекта, наиболее вероятно, связаны с природой взаимодействия излучений. Для установления механизмов взаимодействия требуются дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Li L., Schulzgen A., Chen S., Temyanko V. L. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers // Optics Lett. 2006. Vol. 31. No. 17. P. 2577–2579.
2. Kurkov A. S., Paramonov V. M., Dianov E. M. et al. Fiber laser based in 4-core Yb-doped fiber and multimode Bragg grating // Laser Phys. Lett. 2006. Vol. 3. No. 9. P. 441–444.
3. Яриу А. Введение в оптическую электронику. М.: Высш. шк., 1983. С. 338–366.
4. Snyder A. W. Coupled-mode theory for optical fibers // J. Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62. No. 11. P. 1267–1277.