

07

Кольцевой волоконный лазер с синхронизированными релаксационными колебаниями

© В.И. Белотицкий, М.П. Петров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 13 сентября 1998 г.

Исследуется процесс синхронизации релаксационных колебаний в кольцевом волоконном лазере, активная средой которого является фосфорно-алюмосиликатное стекло, допированное ионами эрбия и иттербия. Показана возможность получения стабильного импульсно-периодического излучения в области $1.5 \mu\text{m}$ с частотой следования импульсов от 80 до 160 КHz при длительности импульсов 2–3 μs . На основе одномодовой модели определены параметры лазера: степень перекачки и время жизни фотонов в резонаторе.

Стабильная генерация последовательности микро- и субмикросекундных импульсов в твердотельных лазерах может быть получена при синхронизации релаксационных колебаний. В известных нам работах для синхронизации релаксационных колебаний волоконных лазеров использовалась низкочастотная модуляция излучения накачки [1–3]. В волоконных лазерах при модуляции накачки вблизи релаксационных частот наблюдалось также более сложное нелинейное поведение (модуляция с двойным и четверным периодом), а также хаотический отклик [2]. В данной работе синхронизация релаксационных колебаний кольцевого волоконного лазера наблюдалась при инжекции в волоконный лазер оптического импульсно-периодического излучения полупроводникового лазера, длина волны которого попадает в диапазон усиления активированного волокна.

Экспериментальная конфигурация кольцевого волоконного лазера приведена на рис. 1. В качестве активной среды использовался отрезок одномодового в области $1.5 \mu\text{m}$ оптического волокна, близкого по своим свойствам и характеристикам к волокнам, описанным в [4]. Длина активированного волокна составляла 3.5 м. Сердцевина волокна, выполненная из фосфора-алюмосиликатного стекла, была допирована ионами

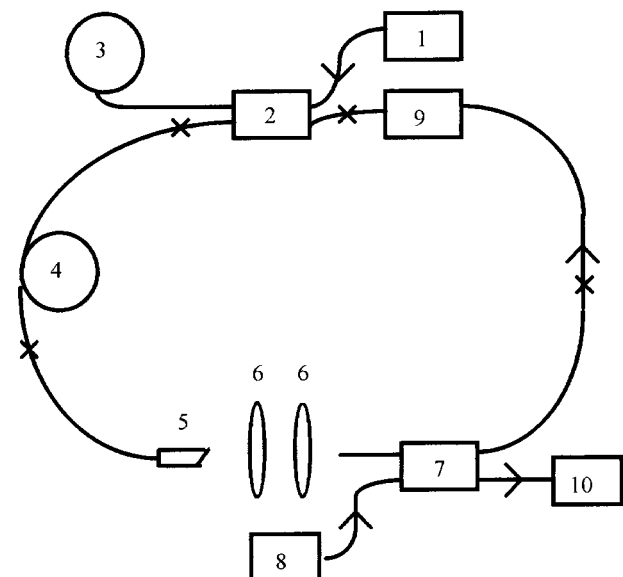


Рис. 1. Схема кольцевого волоконного лазера на основе Er:Yb-волокна. 1 — лазер накачки, 2 — волновой демультиплексор, 3 — кремниевый фотодиод для индикации мощности накачки, 4 — Er:Yb-волокно, 5 — оптическое волокно с отполированным под углом 10° торцом, 6 — микрообъективы для ввода-вывода света из волокна в волокно, 7 — оптический ответвитель 1 : 10, 8 — полупроводниковый лазер, используемый для синхронизации релаксационных колебаний, 9 — оптический изолятор, 10 — германиевый фотодиод для регистрации выходного излучения кольцевого лазера. Крестиками отмечены места сварок. Стрелками указаны направления распространения излучения.

эрбия и иттербия (уровень допирования около 500 ppm по эрбию, отношение количества ионов Er:Yb составляло 1:20, $NA \sim 0.16$). Максимальные потери в волокне не превышали 0.16 dB/m. Дополнительное допирование иттербием позволило использовать в качестве лазера накачки непрерывный Nd:YAC лазер (длина волны излучения 1064 nm). Средняя максимальная мощность накачки в активированном волокне не превосходила 500 mW. Кольцевой волоконный лазер на основе иттербий-эрбиевого стекловолокна включал в себя также волновой

демультиплексор, который объединял сигнальное излучение и излучение накачки длиной волны 1064 nm и направлял их в активное волокно, поляризационно-нечувствительный магнитооптический изолятор и ответвитель 1 : 10, используемый для вывода излучения волоконного лазера и ввода излучения полупроводникового лазера. Длина кольцевого лазера соответствовала частоте межмодовых биений 16 MHz. Длина волны излучения кольцевого лазера 1535 nm. Средняя максимальная мощность излучения не превышала 30 mW и практически не изменялась в режиме синхронизации релаксационных колебаний и свободной генерации.

Для синхронизации релаксационных колебаний использовались полупроводниковые лазеры, длины волн излучения которых попадали в область усиления Yb-Er-волокна. Средняя мощность излучения полупроводниковых лазеров, введенная в кольцевой лазер, не превышала 100–500 μ W. Полупроводниковые лазеры модулировались прямоугольными токовыми импульсами, частоту следования которых можно изменять в широких пределах.

Режим свободной генерации исследовался как при импульсной, так и при непрерывной накачке. Так, при воздействии на кольцевой лазер, изображенный на рис. 1, прямоугольными импульсами накачки (длительность импульсов около 2 ms время включения–выключения меньше 40 μ s, частота следования импульсов 50 Hz) наблюдался затухающий колебательный процесс с выходом на стационар, типичный для твердотельных лазеров. Характерное время затухания переходных осцилляций зависело от мощности накачки и при указанных выше уровнях накачки наименьшее наблюдаемое нами время составляло около 70 μ s.

При непрерывной накачке излучение кольцевого волоконного лазера носило также непрерывный характер. Радиочастотный спектр в области релаксационных колебаний носил ярко выраженный шумовой характер, положение максимума спектра зависело от величины накачки.

При накачке кольцевого волоконного лазера непрерывным сигналом на длине волны 1064 nm и одновременной инжекции в волоконный лазер излучения полупроводникового лазера, накачиваемого прямоугольными импульсами тока, и при условии, что частота следования импульсов близка к частоте релаксационных колебаний, а длина волны излучения полупроводникового лазера лежит в области усиления волоконного лазера, характер излучения кольцевого лазера существенно изменяется. В частности, излучение кольцевого лазера имело импульсно-непрерывный характер (отношение пиковой мощности импульсного

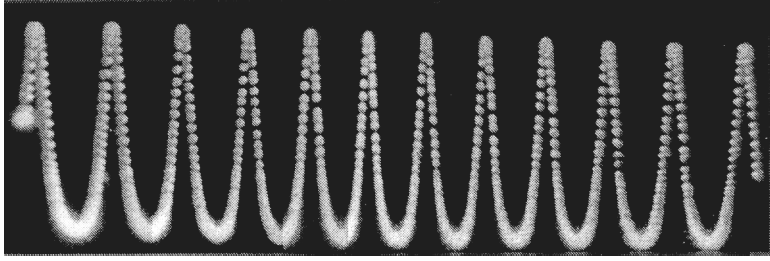


Рис. 2. Оциллограмма излучения кольцевого волоконного лазера при синхронизации релаксационных колебаний при инъекции в кольцевой лазер излучения полупроводникового лазера.

сигнала к минимальному сигналу между импульсами больше 100) (рис. 2), а радиочастотный спектр в области релаксационных колебаний перестает носить шумовой характер.

Стабильная синхронизация релаксационных колебаний наблюдалась в диапазоне 80–160 КHz, при этом длительность импульсов не превышала $3 \mu\text{s}$. Оптимальная длительность импульсов полупроводникового лазера составляла половину периода синхронизирующего излучения.

Следует отметить, что оптимальная частота синхронизации определяется величиной мощности накачки в исследуемом диапазоне частот релаксационных колебаний. Зависимость частоты релаксационных колебаний (и соответственно частоты оптимальной синхронизации) прямо пропорциональна корню квадратному от величины мощности накачки.

Из полученных результатов можно определить некоторые параметры исследуемого лазера, если воспользоваться одномодовой моделью, описываемой балансными уравнениями [5]. Из этой модели следует, что закон убывания амплитуды пиков в режиме свободной генерации при импульсной накачке определяется формулой

$$m_{\max} = m_{\max}^0 \exp(-2\alpha t/3T_1), \quad (1)$$

где m_{\max} — максимальная амплитуда пиков в режиме затухания переходных осцилляций, α — параметр накачки, T_1 — время релаксации разности населенностей (в нашем случае $T_1 = 10 \text{ ms}$). Из экспериментальных результатов по исследованию переходных пульсаций и соотношения (1) был определен параметр накачки $\alpha = 100$. При такой

же величине мощности накачки была измерена оптимальная частота синхронизации релаксационных колебаний (или частота релаксационных колебаний), которая соответствовала 111 КГц. Частота релаксационных колебаний в рассматриваемой модели определяется соотношением

$$F = (1/2\pi) \cdot \sqrt{(\alpha - 1)/T_1 T_c}, \quad (2)$$

где T_c — время жизни фотонов в резонаторе. Из вышеприведенных результатов по вычислению α и экспериментальных данных для F получаем, что время жизни фотонов в резонаторе $T_c = 2 \cdot 10^{-8}$ с.

Таким образом, в данной работе показано, что релаксационные колебания волоконного иттербий-эрбиевого лазера могут быть синхронизированы внешним импульсно-периодическим излучением полупроводникового лазера, длина волны которого близка к длине волны излучения волоконного лазера в режиме свободной генерации. Это открывает возможность формирования режима стабильного периодического излучения волоконных лазеров.

Авторы благодарны Е.Л. Портному и Г.Б. Венусу за предоставление полупроводниковых лазеров.

Список литературы

- [1] *Okhotnikov O.G., Salcedo J.R.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1994. V. 6. N 3. P. 367–371.
- [2] *Lacot E., Stoeckel F., Chenevier M.* // Phys. Rev. A. V. 9. N 5. P. 3997–4008.
- [3] *Ionov S.I., Reeder R.A.* // Appl. Opt. 1996. V. 35. N 15. P. 2580–2582.
- [4] *Townsend J.E., Barnes W.L., Jedrzejewski K.P.* // Electron. Lett. 1991. V. 27. N 21. P. 1958–1959.
- [5] *Ханин Я.И.* Динамика квантовых генераторов. (Квантовая радиофизика) М.: Сов. Радио, 1975. 496 с.