

01;06;07;12

©1994 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЬЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО ВКР ЛАЗЕРА ВБЛИЗИ ОБЛАСТИ НУЛЕВОЙ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ

В.В.Спирин, М.П.Петров, Е.А.Кузин, В.И.Белотицкий

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 24 февраля 1994 г.)

Представлены результаты экспериментального и численного исследования динамики развития генерации и снижения порога попутного ВКР в кольцевом волоконном синхронно накачиваемом ВКР лазере в условиях согласования групповых скоростей импульсов накачки и стоксовой компоненты.

Введение

Известно, что кольцевые ВКР схемы представляют интерес как в качестве ВКР лазеров, в частности генераторов солитонов [1], так и в качестве полностью оптической динамической памяти [2,3]. В последнем случае весьма остро стоит вопрос о снижении порога ВКР, так как именно высокая пороговая мощность накачки препятствует созданию систем памяти с большими тактовыми частотами. Порог попутного ВКР может быть снижен путем увеличения длины взаимодействия импульсов накачки и стоксова излучения в кольцевом волоконном лазере при многократном прохождении стоксова импульса по контуру усиления. Исследования в области нормальной дисперсии групповых скоростей [4,5] показали, что заметный выигрыш в этом случае ограничен дисперсией групповых скоростей, но возможен для импульсов наносекундного диапазона длительностей. Выбор длины волны накачки и стоксова сигнала вблизи точки нулевой дисперсии позволяет свести к минимуму разницу их групповых скоростей и увеличить длину взаимодействия для коротких и сверхкоротких световых импульсов.

В предлагаемой работе проведено экспериментальное исследование динамики развития генерации и снижения порога попутного ВКР в кольцевом волоконном синхронно накачиваемом ВКР лазере вблизи точки нулевой дисперсии групповых скоростей. Показано, что в условиях согласования групповых скоростей импульсов накачки и стоксовой компоненты порог ВКР может быть снижен более чем на порядок.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Для накачки использовался непрерывный Nd:YAG лазер с активной синхронизацией мод и средней мощностью 1.5 Вт. Лазер обеспечивал генерацию непрерывной последовательности импульсов длительностью 200 пс с периодом следования 6 нс в диапазоне 1.32 мкм. Механический прерыватель S периодически, каждые 12 мс, пропускал излучение накачки в течение 1.2 мс. Прошедшее через прерыватель излучение накачки вводилось с помощью объектива O_1 в канал 1 спектрально-селективного ответвителя C . Ответвитель обеспечивал одновременно передачу излучения накачки с длиной волны 1.32 мкм из входного канала 1 и стоксова излучения с длиной волны 1.4 мкм из входного канала 2 в выходной канал 4. Потери при этом не превышали 0.3 дБ, а развязка каналов была не хуже 20 дБ. Из выходного канала ответвителя 4 излучение поступало в рабочий отрезок волокна длиной 2.43 км. С выхода рабочего отрезка волокна излучение через регулируемую задержку AD поступало на вход 2 ветвителя C , замыкая тем самым обратную связь. Регистрация стоксового излучения и накачки, прошедших через рабочий отрезок волокна, осуществлялась фотодиодом ЛФД-2 после спектрального разделения на дифракционной решетке RG . Потери в исследованном отрезке волокна в диапазоне 1.32 мкм равнялись 0.7 дБ/км, а в диапазоне 1.4–1.43 мкм — 1.5 дБ/км.

Параметры волокна были подобраны таким образом, что выравнивались групповые скорости импульсов накачки и первой стоксовой компоненты со спектральным сдвигом, близким к максимальному ВКР усилению. На рис. 2 представлены зависимости групповой задержки и хроматической дисперсии для использованного в эксперименте отрезка волокна. Нулевая дисперсия групповых скоростей имеет место при $\lambda_0 = 1.353$ мкм, а согласование групповых скоростей для накачки с длиной волны 1.32 мкм при длине волны стоксовой компоненты $\lambda_s = 1.41$ мкм, что соответствует стоксову сдвигу, равному $\Delta = 483 \text{ см}^{-1}$.

Зависимость средней мощности излучения волоконного лазера P_c и величины стоксового сдвига Δ от расстройки длины резонатора лазера δ представлена на рис. 3. Нулевая расстройка длины резонатора соответствует оптической длине кольцевого резонатора, кратной периоду следования импульсов накачки. При условии согласования групповых скоростей импульсов накачки и стоксовой компоненты нулевой

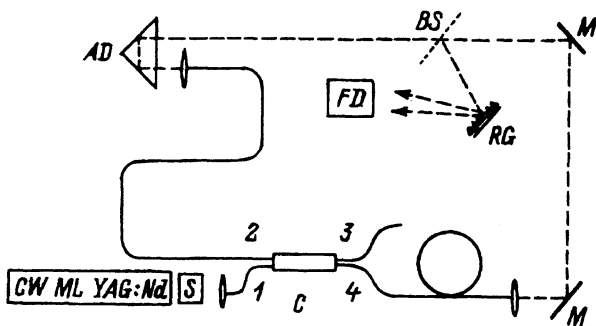


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

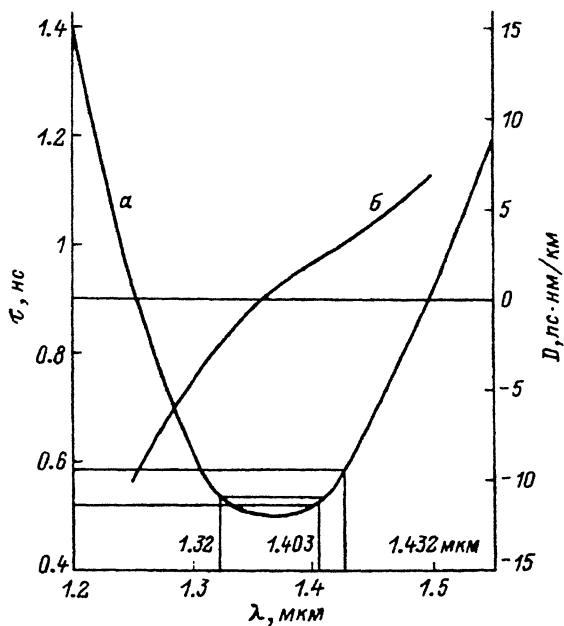


Рис. 2. Групповая задержка (а) и хроматическая дисперсия (б) в использованном отрезке волокна.

расстройке соответствует режим "строго" синхронной накачки, когда на входе рабочего отрезка волокна совпадают по времени максимумы импульсов накачки и стоковса импульса.

При расстройке длины резонатора наибольший инкремент усиления имеет место для стоковых импульсов, компенсирующих внесенное временное рассогласование за счет изменения групповой скорости распространения стоковса импульса. Компенсация временного рассогласования возможна лишь при изменении длины волны стоковсового излучения. В эксперименте при изменении длины резонатора в пределах $-24 - +26$ мм, что соответствует временному рассогласованию $-80 - +87$ пс, длина волны генерации волоконного лазера изменялась от 1.432 ($\Delta = 568 \text{ см}^{-1}$) до 1.403 мкм ($\Delta = 411 \text{ см}^{-1}$). Перестройка происходила в несколько большем спектральном диапазоне, чем это можно было ожидать, исходя из данных по спектральной зависимости груп-

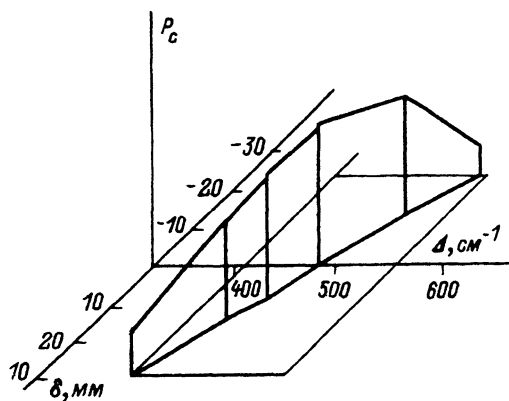


Рис. 3. Зависимость средней мощности лазерного излучения P_c и величины стоковса сдвига Δ от расстройки длины резонатора δ .

повых задержек, представленных на рис. 2. Связано это, по-видимому, с локальными особенностями поведения коэффициента ВКР усиления и коэффициента затухания в кварцевом волокне вблизи длины волны 1.4 мкм. Этими же причинами может быть объяснен тот факт, что в отсутствие обратной связи стоксов сдвиг равнялся 496 см^{-1} и отличался от стоксового сдвига, который должен был бы иметь место при строгом согласовании групповых скоростей.

Пороговые условия ВКР в кольцевой схеме

На рис. 4, а представлена осциллограмма огибающей импульсов накачки на выходе отрезка волокна 2.43 км при нулевой расстройке длины резонатора волоконного лазера в отсутствие стоксова излучения. Как уже отмечалось механический прерыватель обеспечивал прохождение импульсов накачки в течение 1200 мкс. Время прохождения импульса по кольцевому резонатору равнялось 12.2 мкс, таким образом, в одном временном окне помещалось примерно 100 циклов, соответствующих 100 обходам импульса накачки и стоксова излучения по контуру усиления, а в каждом цикле в свою очередь содержалось около 2000 импульсов. Конечное время срабатывания прерывателя и конечный размер пучка накачки приводили к наличию фронтов нарастания и спада огибающих накачки с временами Δt_i , Δt_d соответственно. В эксперименте $\Delta t_i = \Delta t_d = 80 \text{ мкс}$.

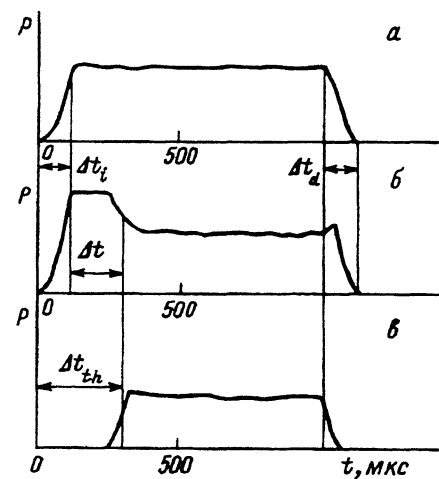


Рис. 4. Огибающие импульсов накачки и стоксова излучения на выходе 2.43 км отрезка волокна.

а — огибающая импульсов накачки в отсутствие стоксова излучения, б — огибающая импульсов накачки, в — стоксова излучения при превышении порога ВКР.

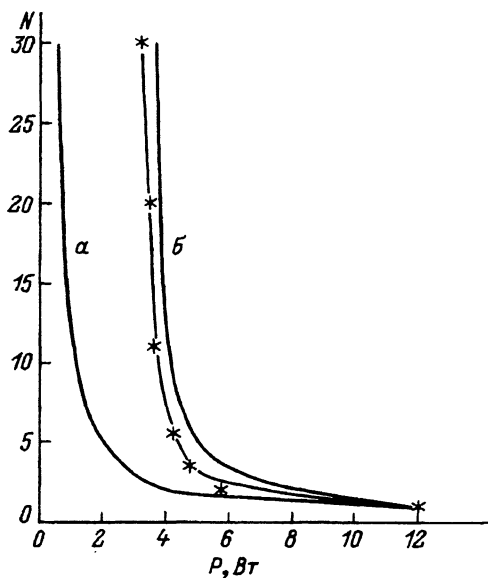


Рис. 5. Зависимость числа циклов N , необходимых для достижения пороговых условий от мощности введенной накачки.

Точки — экспериментальные данные, а — расчетные данные при 100%-ном коэффициенте обратной связи, б — расчетные данные при 1%-ном коэффициенте обратной связи.

На рис. 4, б, в представлены осциллограммы огибающих импульсов накачки (рис. 4, б) и соответствующего стоксового излучения (рис. 4, в) при нулевой расстройке длины резонатора при некотором превышении порога ВКР. Как следует из данных, представленных на рис. 4, б, в, интенсивное стоксово излучение возникает не сразу после полного открытия затвора прерывателя, а спустя некоторое время Δt , зависящее от мощности накачки. Экспериментально измеренная зависимость времени Δt , выраженного в числе циклов обхода контура усиления, от мощности, введенной в волокно накачки, представлена на рис. 5. Порог ВКР генерации в отсутствие обратной связи, т.е. на одном проходе составлял 400 мВт средней мощности, что соответствует пиковой мощности 12 Вт.

Пороговой мощностью накачки при ВКР, как правило, считается мощность, при которой стоксово излучение и накачка имеют одинаковые мощности на выходе волокна [6]. Такое определение пороговых условий удобно при проведении численных расчетов, однако при обработке экспериментальных результатов его использование связано с рядом трудностей. В эксперименте регистрировались огибающие последовательностей импульсов накачки и стоксовой компоненты. На основании этих данных, учитывая не прямоугольную форму огибающих импульсов, невозможно определить мощность истощенных импульсов накачки, а следовательно, и проверить выполнение пороговых условий согласно критерию, приведенному в [6]. Поэтому при обработке экспериментальных данных считалось, что пороговые условия достигаются в момент времени t_{th} , соответствующий достижению стоксовым излучением половины своего стационарного значения (рис. 4, б, в).

Возрастание мощности прошедшей накачки в конце временного окна (рис. 4, б), связано с тем, что уже в начале перекрытия затвором прерывателя пучка накачки происходит резкий спад стоксового излучения (рис. 4, в). Энергия перестает перекачиваться в стоксову компоненту, что и приводит к временному возрастанию мощности, прошедшей через волокно накачки.

Был проведен численный расчет зависимости числа циклов, необходимых для достижения пороговых условий, от мощности, введенной в волокно накачки. Расчет проводился на основе решения системы дифференциальных уравнений в предположении, что на вход оптического волокна поступает часть выходного стоксового излучения, а все импульсы прямоугольные.

Система уравнений, описывающих процесс попутного стационарного ВКР, может быть записана в виде [7]

$$dP_p/dz + \alpha_p P_p = -(g/s)P_p(P_{s1} + Q),$$

$$dP_{s1}/dz + \alpha_{s1} P_{s1} = (g/s)(\lambda_p/\lambda_{s1})[P_p(P_{s1} + Q) - (P_{s1} + Q)(P_{s2} + Q)],$$

$$dP_{s2}/dz + \alpha_{s2} P_{s2} = (g/s)(\lambda_p/\lambda_{s2})(P_{s1} + Q)(P_{s2} + Q), \quad (1)$$

где P_p — мощность накачки; P_{s1} , P_{s2} — мощности первой и второй стоксовых компонент; α_p , α_{s1} , α_{s2} — затухание накачки, первой и второй стоксовых компонент соответственно; s — эффективная площадь сердцевины волокна; g — коэффициент ВКР усиления; λ_p , λ_{s1} , λ_{s2} — длины волн накачки, первой и второй стоксовых компонент.

Приведенная система уравнений не учитывает дисперсии групповых скоростей импульсов накачки и стокса, а также пространственного распределения света по сечению волокна. Спонтанное рассеяние учитывается членом Q . Согласно [6],

$$Q = h\nu_s \sqrt{\pi} \Delta\nu / 2 \sqrt{gP_p l_f / s}, \quad (2)$$

где $\Delta\nu$ — спектральная ширина линии ВКР усиления; l_f — эффективная длина волокна, равная в случае малых потерь полной длине отрезка волокна.

На рис. 5 представлены результаты численного моделирования при 100%- и 1%-ном коэффициенте обратной связи по стоксовой компоненте. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $g = 0.37 \cdot 10^{-13}$ м/Вт [8], $s = 46 \cdot 10^{-12}$ м², $l_f = 2.43$ км, $\Delta\nu = 240$ см⁻¹, $\lambda_p = 1.32$ мкм, $\lambda_{s1} = 1.418$ мкм, $\lambda_{s2} = 1.5$ мкм. Экспериментальные данные согласуются с расчетом при 10%-ном коэффициенте обратной связи. Снижение порога ВКР в кольцевой схеме наиболее значительно при небольших потерях по стоксовой компоненте в контуре усиления. Если при 1%-коэффициенте обратной связи снижение порога за 30 циклов составляет 3.2, то при 100%-ной обратной связи порог снижается более чем в 15 раз.

Предельное снижение пороговой мощности при бесконечно большом числе циклов полностью определяется потерями в контуре усиления. Действительно, мощность стоксового сигнала на выходе волокна при однократном прохождении контура усиления в пренебрежении затуханием и истощением накачки за счет нелинейного взаимодействия может быть представлена в виде

$$P_{s,1}(l) = S_0 \exp(gP_p l / s - \alpha_s l), \quad (3)$$

где S_0 — приведенная ко входу мощность шумового спонтанного рассеяния.

После двукратного прохождения контура усиления можно также пренебречь затуханием накачки, так как при каждом новом цикле со стоксовым импульсом взаимодействует новый импульс накачки

$$P_{s,2}(l) = [S_0 + f S_0 \exp(gP_p l / s)] \exp(gP_p l / s - \alpha_s l), \quad (4)$$

где $f = k \exp(-\alpha_s l)$ определяет суммарные потери стоксовой компоненты в контуре усиления за счет коэффициента обратной связи k и затухания в волокне.

Пренебрегая эквивалентным шумовым сигналом на входе по сравнению с усиленным шумовым сигналом с выхода волокна, имеем для мощности стоксова сигнала после n -го цикла

$$P_{s,n}(l) = (S_0 f^n / k) \exp(ngP_p l / s) = S_0 \exp\{n(gP_p l / s + \ln f) - \ln k\}. \quad (5)$$

Обозначим пороговый инкремент усиления, при котором шумовой сигнал усиливается приблизительно до уровня накачки, через G , т.е.

$$S_0 \exp G = P_p, \quad (6)$$

тогда пороговая мощность накачки после n -го цикла равняется

$$P_{th,n} = [(G + \ln k)/\eta - \ln f]s/gl, \quad (7)$$

в то время как пороговая мощность в разомкнутой схеме равна

$$P_{th,1} = (G + \alpha_s l)s/gl. \quad (8)$$

Таким образом, предельное снижение пороговой мощности при бесконечно большом числе циклов равняется

$$P_{th,1}/P_{th,\infty} = (G + \alpha_s l)/(-\ln f) \cong G/(-\ln f). \quad (9)$$

Заключение

Проведенное экспериментальное и теоретическое исследование динамики развития генерации в кольцевом волоконном ВКР лазере в условиях согласования групповых скоростей показало возможность существенного снижения порога генерации после нескольких циклов усиления. Экспериментально получено снижение пороговой мощности ВКР в 4 раза после 50 циклов усиления стокового сигнала. При бесконечно большом числе циклов пороговая мощность может быть снижена в $G/(-\ln f)$ раз, где G — пороговый инкремент ВКР усиления, а f — коэффициент ослабления стокова сигнала при обходе контура усиления, связанный как с эффективностью обратной связи, так и с затуханием в волокне.

Список литературы

- [1] Haus H.A., Nakazawa Y. // J. Opt. Soc. Amer. B. 1987. Vol. 4. N 5. P. 652-660.
- [2] Петров М.П., Кузин Е.А., Белотицкий В.И., Спиринов В.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. С. 29-33.
- [3] Belotitskii V.I., Kuzin E.A., Petrov M.P., Spirin V.V. // Electron. Lett. 1993. Vol. 29. N 1. P. 49-50.
- [4] Desurvire E., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. // J. Lightwave Technol. 1986. Vol. LT-4. N 4. P. 426-443.
- [5] Desurvire E., Imamoglu A., Shaw H.J. // J. Lightwave Technol. 1987. Vol. LT-5. N 1. P. 89-96.
- [6] Smith R.G. // Appl. Opt. 1972. Vol. 11. N 11. P. 2489-2494.
- [7] Yijiang Chen., Snyder A.W. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 23. P. 1450-1452.
- [8] Greer E.J., Hickmann J.M., Taylor J.R. // Electron. Lett. 1991. Vol. 27. N 13. P. 1171-1172.