

# Повышение чувствительности рециркуляционного волоконного кольцевого интерферометра с импульсной накачкой внутрирезонаторного оптического усилителя на иттербий-эрбиевом волокне

Э.И.Алексеев, Е.Н.Базаров, В.П.Губин, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, А.И.Усов

*Экспериментально исследованы сигнальная чувствительность и обнаружительная способность рециркуляционного волоконного кольцевого интерферометра (РВКИ) при импульсной накачке внутрирезонаторного волоконно-оптического усилителя (ВОУ) на эрбиевом волокне, сенсibilизированном иттербием. Показана возможность значительного увеличения числа эффективных циркуляций света по кольцевому резонатору в переходном режиме, при котором порог самовозбуждения превышен, однако генерация не успевает развиться. Установлено, что необходимый переходной режим реализуется за счет эффекта самоограничения (сброса) усиления ВОУ, связанного с насыщением активной среды при росте мощности излучения в резонаторе. Продемонстрировано повышение сигнальной чувствительности РВКИ в 25 раз и обнаружительной способности в 4 раза при работе в импульсном режиме ВОУ.*

**Ключевые слова:** рециркуляционный интерферометр, волоконный усилитель, импульсная накачка.

В рециркуляционных волоконных кольцевых интерферометрах (РВКИ) для возбуждения высокодобротного кольцевого резонатора применяется широкополосное излучение, что позволяет резко снизить влияние многочисленных факторов на точность измерения фазы [1]. Характеристики РВКИ определяются числом эффективных рециркуляций цугов излучения в кольцевом резонаторе, периметр  $L$  которого много больше длины когерентности  $l_c$  излучения. Число рециркуляций может быть значительно увеличено при частичной компенсации потерь в резонаторе с помощью оптического усилителя, включенного в резонатор [2–4]. По существу из-за наличия активного элемента (усилителя) в кольцевой структуре такой РВКИ является регенеративной системой, т. е. системой, в которой при полной компенсации потерь возникает генерация, нарушающая нормальную работу интерферометра.

Между тем наилучшие характеристики РВКИ получаются при усилении, максимально близком к порогу генерации. Один из подходов к реализации такого режима состоит в применении тех или иных методов стабилизации величины оптического усиления вблизи порога генерации при непрерывном режиме работы усилителя. Другим подходом может являться использование импульсного режима работы усилителя. В этом случае усилитель с повышенным усилением включается на определенное время, за которое происходит значительное число циркуляций света в кольцевом резонаторе, но генерация не успевает развиться [5, 6], после чего усилитель выключается.

Импульсная модуляция усиления может быть осуществлена рядом способов, например с помощью модуляции мощности накачки оптического усилителя или модуляции потерь в кольцевом резонаторе.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности повышения чувствительности РВКИ путем использования импульсной модуляции мощности накачки внутрирезонаторного волоконного оптического усилителя (ВОУ), выполненного на основе активного иттербий-эрбиевого волокна.

Эксперименты проводились на установке (рис. 1), представляющей собой макет РВКИ с суперфлуоресцентным волоконным источником (СВИ) излучения и внутрирезонаторным ВОУ [4]. В качестве ВОУ использовался коммерческий оптический усилитель на  $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ - кварцевом волокне с алюмосиликатной сердцевиной, представленный НТО «ИРЭ–ПОЛЮС». Ионы иттербия с большой концентрацией, сильно поглощающие излучение накачки, служат для повышения эффективности на-

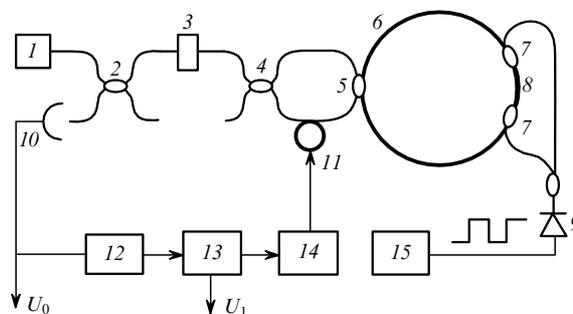


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – СВИ; 2, 4, 5 – направленные ответвители; 3 – поляризатор; 6 – кольцевой резонатор; 7 – ответвители-мультиплексоры; 8 – активное волокно; 9 – лазерный диод; 10 – фотодиод; 11 – фазовый модулятор; 12 – полосовой фильтр; 13 – синхронный детектор; 14 – генератор синусоидальных колебаний; 15 – генератор импульсов.

Э.И.Алексеев, Е.Н.Базаров, В.П.Губин, А.И.Сазонов, Н.И.Старостин, А.И.Усов. Фрязинское отделение института радиотехники и радиоэлектроники РАН, Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. акад. Введенского, 1; e-mail: nis229@ire216.msk.su; http://fire.relarn.ru

Поступила в редакцию 19 февраля 2004 г., после доработки – 27 апреля 2004 г.

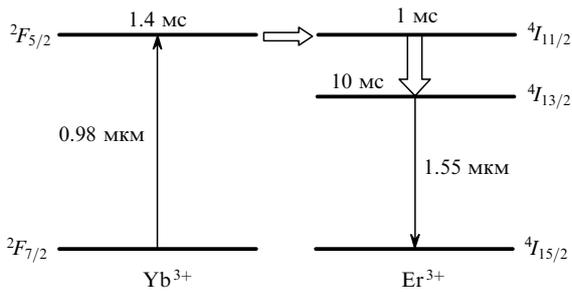


Рис.2. Схема энергетических уровней иттербия и эрбия.

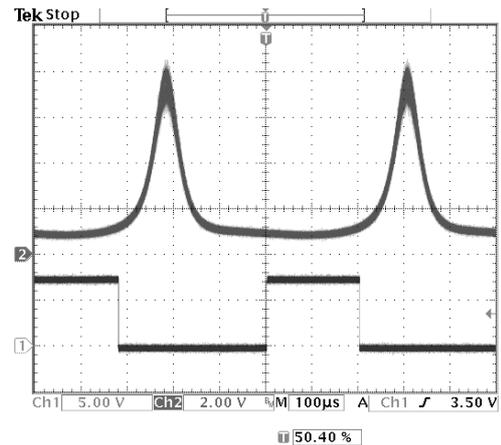
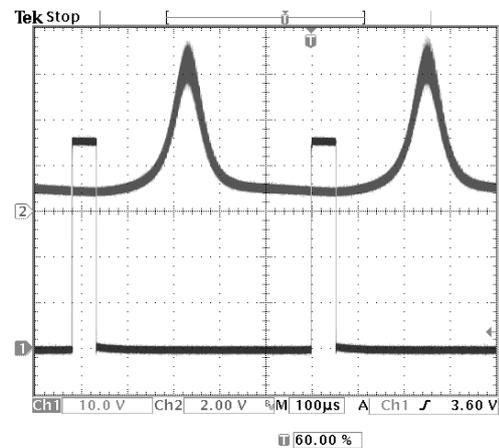
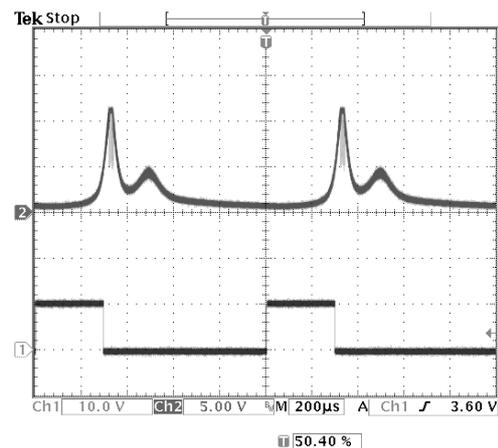
качки (сенсбилизации) ионов эрбия [6]. В качестве источника накачки использован полупроводниковый многомодовый лазерный диод с  $\lambda = 0.98$  мкм, излучение которого вводится симметрично в оба конца активного волокна. Энергетические уровни  ${}^2F_{5/2}$  и  ${}^2F_{7/2}$  иттербия очень близки к рабочим уровням  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{15/2}$  эрбия (рис.2), так что возбуждение переносится с иттербия на эрбий, обеспечивая требуемое усиление на  $\lambda = 1.55$  мкм при относительно небольшой мощности накачки. Типичное значение коэффициента усиления ВОУ составляло около 5 дБ. Ниже показано, что данная схема накачки определяет свойства импульсного режима исследуемого РВКИ. Импульсная работа осуществлялась при частоте следования  $F_p$  и длительности  $\tau_p$  импульсов тока диода накачки, выбранных на основании предварительных экспериментов.

Кольцевой резонатор РВКИ был выполнен из одномодового ( $\lambda \approx 1.55$  мкм) анизотропного волокна типа «Панда» длиной  $L = 200$  м и представлял собой катушку диаметром  $D = 125$  мм.

Схема обработки сигнала содержала синхронный детектор с полосовым фильтром на входе. Регистрация выходного сигнала РВКИ осуществлялась на частоте  $f_m = 291$  кГц первой гармоники вспомогательной гармонической фазовой модуляции излучения. Полосовой фильтр, настроенный на эту частоту, обеспечивал подавление на 60 дБ гармоник импульсной модуляции излучения, которые могли создавать помехи для полезного сигнала. Фильтр нижних частот на выходе синхронного детектора имел полосу пропускания  $\Delta F = 1$  Гц. Коэффициент передачи синхронного детектора при импульсном входном сигнале зависел от скважности детектируемых радиоимпульсов и определялся экспериментально.

Оциллограммы напряжения  $U_0$  на выходе фотоприемника РВКИ при различных длительностях  $\tau_p$  импульсов тока накачки ВОУ представлены на рис.3, 4 (устойчивые режимы работы) и рис.5 (нестабильный режим). Выходное напряжение в устойчивом режиме работы представляет собой колоколообразные видеоимпульсы с амплитудой  $U \approx 10$  В и длительностью  $\tau \approx 60$  мкс на половине высоты, на которые наложены модуляционные компоненты гармоник  $f_m$  (радиоимпульсы, на рис.3, 4 видны нечетко). Для определения сигнальной чувствительности РВКИ использовался как датчик угловой скорости.

В отсутствие вращения резонатора РВКИ вокруг оси, перпендикулярной плоскости витков катушки, имеются только четные гармоники  $f_m$ . При наличии вращения появляются нечетные гармоники, амплитуды которых при малых угловых скоростях  $\Omega$  пропорциональны  $\Omega$ . В настоящем эксперименте полезным сигналом являлась первая гармоника, величина которой в условиях экспери-

Рис.3. Сигнал на выходе фотоприемника при  $F_p = 2000$  Гц,  $\tau_p = 200$  мкс.Рис.4. Сигнал на выходе фотоприемника при  $F_p = 2000$  Гц,  $\tau_p = 50$  мкс.Рис.5. Сигнал на выходе фотоприемника при  $F_p = 1000$  Гц,  $\tau_p = 300$  мкс.

мента (при  $\Omega = 130$  град/ч) мала и на рисунках не видна. Данные на рис.3, 4 получены при максимально допустимых токах накачки, для которых имеет место устойчивая работа РВКИ. При увеличении тока накачки сверх этих значений работа становится неустойчивой и появляются второй и последующие импульсы (рис.5). Характерными особенностями наблюдаемых режимов являются слабая зависимость формы и длительности видеоимпульса по-

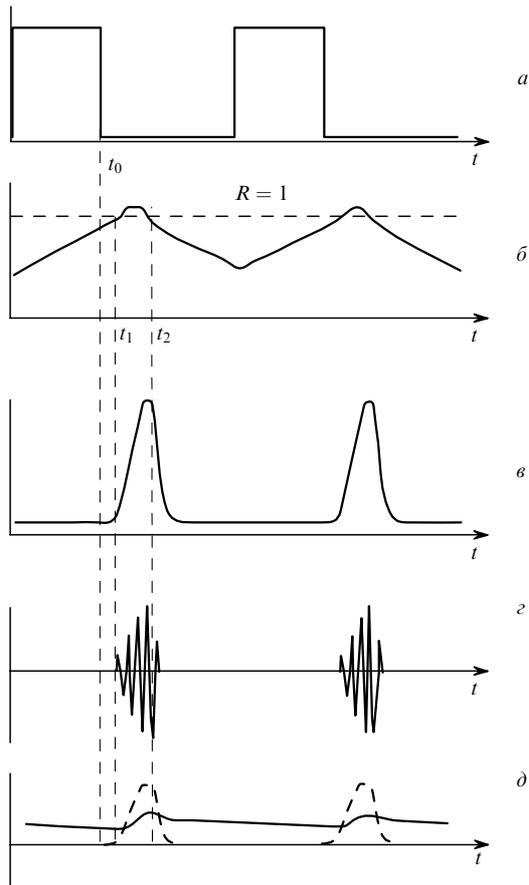


Рис.6. Иллюстрация работы РВКИ с импульсной накачкой эрбиевого ВОУ: ток накачки ВОУ (а), коэффициент передачи по кольцу (б), мощность излучения в резонаторе (в), сигнал на входе фазового детектора (г) и сигнал на выходе фазового детектора (д).

лезного сигнала от частоты следования и скважности импульсов накачки, практически одинаковая форма переднего и заднего фронтов видеоимпульса в отсутствие заметной плоской вершины, а также задержка возникновения видеоимпульса относительно импульса накачки.

Приведенные осциллограммы можно интерпретировать следующим образом (рис.6). При включении импульса накачки (рис.6,а) начинается увеличение инверсии населенностей рабочих уровней эрбия (переход  ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ , см. рис.2), а значит, и рост коэффициента усиления  $g$  ВОУ. Сигнальная чувствительность РВКИ определяется числом эффективных циркуляций излучения по кольцевому резонатору, которое в свою очередь зависит от коэффициента  $R$  передачи по амплитуде за один оборот кольца,  $R = ag$  [2]. Здесь  $a \approx 0.6$  – коэффициент передачи по кольцу, определяемый пассивными потерями, включая потери на связь с выходом. Поэтому с ростом  $g$  увеличивается и  $R$  (рис.6,б), причем это увеличение продолжается и после окончания в момент времени  $t_0$  импульса накачки за счет передачи энергии, накопленной на уровне  ${}^2F_{5/2}$  ионов  $Yb^{3+}$ . При  $R > 1$ , что имеет место в момент времени  $t_1$ , интенсивность поля в резонаторе быстро возрастает (рис.6,в). Это приводит к насыщению рабочего перехода эрбия, в результате чего усиление начинает уменьшаться и в момент времени  $t_2$  становится ниже порога генерации (при этом  $R < 1$ ). Начиная с данного момента интенсивность поля в резонаторе быстро уменьшается (рис.6,в). Стационарное состояние генерации за время видеоимпульса не успевает развиваться, т. к. в дан-

ной экспериментальной ситуации происходит сброс усиления (инверсии населенностей), после которого накопленной в ионах иттербия энергии накачки не хватает для нового роста поля. Однако за время видеоимпульса обеспечивается значительное число циркуляций излучения в резонаторе.

Следует подчеркнуть, что эти процессы происходят в режиме «автоматического» регулирования (параметры системы с обратной связью определяются временами жизни уровней среды и добротностью оптического резонатора), что обеспечивает слабую зависимость формы видеоимпульса (точнее, его ширины по основанию) от параметров импульсов накачки (см. рис.3, 4). Конечно, при большой величине накачки может оказаться, что после сброса усиления в ионах иттербия еще остается достаточно накопленной энергии для возникновения второго (и даже третьего) импульса поля в резонаторе (рис.5).

Как упоминалось выше, выходной сигнал РВКИ состоит из видеоимпульсов определенной мощности излучения, следующих с частотой  $F_p$  (рис.6,в), а также из наложенных на них и зависящих от угловой скорости радиоимпульсов, которые после прохождения полосового фильтра имеют вид, показанный на рис.6,г. Отметим, что огибающая этих радиоимпульсов не совпадает с огибающей видеоимпульсов. Радиоимпульсы поступают на синхронный детектор, который при  $F_p \gg \Delta F$  вырабатывает постоянное напряжение  $U_1(\Omega)$ , пропорциональное среднему значению огибающей радиоимпульсов. Измеренный коэффициент передачи синхронного детектора  $K = 43$  при  $f_m = 291$  кГц,  $F_p = 2000$  Гц и  $\tau_p = 200$  мкс. В режиме детектирования непрерывного радиосигнала с частотой  $f_m = 291$  кГц коэффициент передачи  $K = 94$ .

Используя экспериментальные данные, сравним сигнальные чувствительности и обнаружительные способности РВКИ в непрерывном и импульсном режимах работы. Сигнальная чувствительность РВКИ (величина отклика на малые вращения)  $Q_s$  пропорциональна отношению  $U_1(\Omega)/\Omega$ . Отметим, что в обоих режимах она измерялась при одних и тех же параметрах электронного блока обработки сигнала. Обнаружительная способность (пороговая чувствительность) РВКИ оценивалась по формуле  $\Omega_{\min} = U_{1n}/Q_s$ , где  $U_{1n}$  – среднеквадратичное напряжение шума на выходе синхронного детектора при выключенной фазовой модуляции, определяемое шумом на выходе РВКИ в отсутствие вращения. В обоих режимах  $U_{1n}$  измерялось также при неизменных параметрах электронного блока. Сравнение проводилось в предпороговом режиме работы РВКИ. Значения  $Q_s$  были равны 5.3 и 62 мВ·град $^{-1}$ ·ч для непрерывного и импульсного режимов соответственно. После приведения к одному и тому же значению коэффициента передачи синхронного детектора указанные величины составили 5.3 и 135 мВ·град $^{-1}$ ·ч соответственно. Для этих режимов  $\Omega_{\min}$  была равна 0.15 и 0.034 град·ч $^{-1/2}$ ·Гц $^{-1/2}$ ). Таким образом,  $Q_s$  увеличилась в 25 раз, а  $\Omega_{\min}$  уменьшилась в 4.4 раза. Отметим также, что максимальное значение напряжения на фотоприемнике ( $U_0$  в непрерывном режиме и  $U_p$  – в импульсном) выросло при переходе к импульсному режиму примерно в 12 раз.

Были измерены также зависимости сигнальной чувствительности от усиления ВОУ для непрерывного и импульсного режимов РВКИ. Они представлены на рис.7, где по оси абсцисс отложены зависящие от усиления мак-

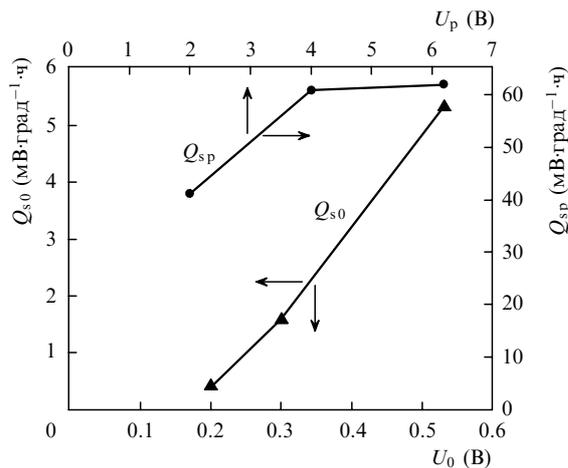


Рис. 7. Зависимости сигнальной чувствительности для непрерывного ( $Q_{s0}$ ) и импульсного ( $Q_{sp}$ ) режимов от усиления ВОУ (напряжения на фотоприемнике).

симальные значения напряжения на фотоприемнике в непрерывном и в импульсном режимах. Относительно более слабая зависимость для импульсного режима может быть пояснена следующими соображениями. Можно предположить, что чувствительность РВКИ пропорциональна произведению амплитуды импульса на число эффективных циркуляций за время импульса. Число эффективных циркуляций, по-видимому, увеличивается при уменьшении  $U_p$ , на что указывает более пологая вершина импульса при снижении его амплитуды (это следует из сравнения формы первого (большого) и второго импульсов на рис.5). В результате при уменьшении усиления ВОУ снижение чувствительности из-за уменьшения  $U_p$  частично компенсируется ростом числа эффективных циркуляций. Отметим, что при всех значениях  $U_p$  видеоимпульсы сохраняют свою симметричную форму.

Таким образом, рассматриваемый импульсный режим позволяет существенно увеличить сигнальную чувствительность РВКИ. Этот режим также дает возможность потенциально увеличить обнаружительную способность РВКИ, обусловленную шумами излучения и измеряемую при выключенной фазовой модуляции излучения. Следует, однако, отметить, что в рабочих условиях (когда фазовая модуляция включена) наблюдается повышенный уровень шума, обусловленный, по-видимому, случайными вариациями начальных фаз радиоимпульсов при их формировании при каждом импульсе накачки. Механизм указанных шумов и пути их снижения

требуют дополнительного изучения.

Полученные результаты свидетельствуют о заметном увеличении числа эффективных циркуляций излучения по кольцевому резонатору при работе в рассматриваемом импульсном режиме. Для грубой оценки числа эффективных циркуляций можно взять величину  $m \approx \tau/\tau_1 = 60$ , где  $\tau \approx 60$  мкс – ширина на половине высоты стабильных по форме импульсов,  $\tau_1 = nL/c \approx 1$  мкс – время одной циркуляции. Полагая, что  $m \approx F$ , где  $F = \pi R/(1 - R^2)$  – резкость оптического резонатора, можно оценить максимальный коэффициент передачи для непрерывного режима, эквивалентного по чувствительности импульсному режиму для данной экспериментальной установки:  $R_{max} = 0.975$ . Разумеется, реальный импульсный режим не может быть охарактеризован фиксированным значением  $R$ , поскольку оно изменяется во времени и в основном превышает единицу. Следует отметить, что в реальном предпороговом непрерывном режиме для данной установки  $R = 0.9$ .

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследованы сигнальная чувствительность и обнаружительная способность РВКИ при импульсной накачке внутрирезонаторного ВОУ на эрбиевом волокне, сенсibilизированном иттербием. Показана возможность значительного увеличения числа эффективных циркуляций света по кольцевому резонатору в переходном режиме, при котором порог самовозбуждения превышен, однако генерация не успевает развиваться. Установлено, что необходимый переходной режим реализуется за счет эффекта самоограничения (сброса) усиления ВОУ, связанного с насыщением активной среды при росте поля в резонаторе. Продемонстрировано повышение сигнальной чувствительности РВКИ в 25 раз и обнаружительной способности в 4 раза при работе в импульсном режиме ВОУ.

Авторы благодарны В.П.Гапонцеву и И.Э.Самарцеву за поддержку работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минпромнауки (проект по теме 01.40.01.08.02).

1. Farhadiroushan M., Giles I.P., Youngquist R.C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **719**, 178 (1986).
2. Yu A., Siddiqui A.S. *Electron. Lett.*, **28**, 1778 (1992).
3. Kringelbotn J.T., Blotekjaer K. *J. Lightwave Technol.*, **12**, 573 (1994).
4. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 1113 (2001).
5. Chen D.N., Motoshima K., Downs M.M., Desurvire E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 813 (1992).
6. Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (New York: A Wiley-Interscience Publication, 1994).