

## Экспериментальное исследование спектральных характеристик усилителя на эрбиевом волокне в рециркуляционном режиме

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

*Экспериментально исследованы спектральные профили коэффициента усиления оптического усилителя на легированном ионами эрбия волокне, включенного в рециркуляционное волоконное кольцо, возбуждение которого осуществлялось суперфлуоресцентным волоконным источником. Разработана методика измерения спектрального профиля коэффициента усиления и предложен критерий оценки однородности профиля при использовании широкополосного излучения. Изучено влияние формы спектра входного излучения, уровня накачки и состава активного волокна на однородность спектрального профиля коэффициента усиления и установлено, что последний имеет максимум при некотором определенном уровне накачки. Показана необходимость оптимизации параметров волоконно-оптического усилителя совместно с волоконным источником излучения при их использовании в активном рециркуляционном интерферометре для получения максимального числа рециркулирующих широкополосного оптического сигнала.*

**Ключевые слова:** волоконный усилитель, спектр усиления, рециркуляционный интерферометр.

Активные оптические кольцевые устройства, основным компонентом которых является волоконное кольцо со встроенным в него волоконно-оптическим усилителем (ВОУ), вызывают в настоящее время большой интерес исследователей. Предполагается, что подобные устройства найдут применение в волоконно-оптической памяти, в системах обработки оптических сигналов, волоконных датчиках нового поколения (гироскопах, гидрофонах) [1, 2].

В зависимости от соотношения между временем когерентности источника излучения  $\tau_c$  и временем обхода света волоконного кольца  $T$  различают два режима работы таких колец. Если используется узкополосное возбуждающее излучение ( $\tau_c \gg T$ ), кольцо работает как волоконно-оптический кольцевой резонатор, а при использовании широкополосного излучения ( $\tau_c \ll T$ ) – как рециркуляционная кольцевая линия задержки.

В настоящей работе рассматривается рециркуляционный режим работы кольца с ВОУ. Этот режим был реализован нами в работе [3] в датчике угловой скорости на основе рециркуляционного волоконного кольцевого интерферометра (РВКИ) с эрбиевым ВОУ внутри рециркуляционного кольца. В таком интерферометре благодаря введению необходимого усиления можно компенсировать потери при обходе кольца и увеличить чувствительность путем накопления сигнала за счет многократных проходов излучения (рециркулирующий) по кольцевому контуру. В теоретической работе [4] было показано, что активный РВКИ может иметь на два порядка большую чувствительность по сравнению с традиционным интерферометром Саньяка. Однако в [3] полученный в эксперименте выигрыш оказался меньше расчетного.

Возможной причиной расхождения является невозможность реализации большого числа рециркулирующих света в кольце из-за «деформации» спектральной характеристики усиления ВОУ вблизи порога генерации.

Действительно, число рециркулирующих сигнала в кольце с ВОУ определяется резкостью резонатора [4]  $F = \pi R / (1 - R^2)$ , где  $R = ag < 1$  – пропускание кольца по амплитуде сигнала при круговом обходе;  $a$  – пассивные потери в кольце;  $g$  – коэффициент усиления ВОУ по амплитуде. В большинстве применений эти параметры считаются не зависящими от длины волны света  $\lambda$ . В действительности же спектральный профиль  $g(\lambda)$  усиления эрбиевого ВОУ имеет, как правило, заметную неоднородность в пределах широкой полосы сигнала источника, причем зависимость  $g(\lambda)$  может быть обусловлена формой спектра сигнала. Поскольку это ограничивает получение большого числа рециркулирующих спектральных компонент света в пределах всей полосы сигнала, необходимо оптимизировать параметры системы волоконный источник – волоконный усилитель. Цель оптимизации – получение наиболее однородного профиля  $g(\lambda)$  при использовании этих элементов в РВКИ.

В настоящей работе экспериментально изучалось влияние ряда факторов на форму спектрального профиля коэффициента усиления эрбиевого ВОУ при работе в рециркуляционном режиме с входным излучением от суперфлуоресцентного волоконного источника (СВИ).

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В качестве источника широкополосного света со средней длиной волны 1550 нм применялись СВИ на иттербий-эрбиевом волоконном световоде двух типов, различающиеся формой спектра излучения при средневзвешенной по мощности ширине спектра около 20 нм. ВОУ (элементы 6, 7, 8) был изготовлен на основе световода, легированного ионами иттербия и эрбия. В качестве источника накачки ВОУ использовались многомодовые лазерные диоды с длиной волны 0.97 мкм, излучение которых вводилось в волокно с по-

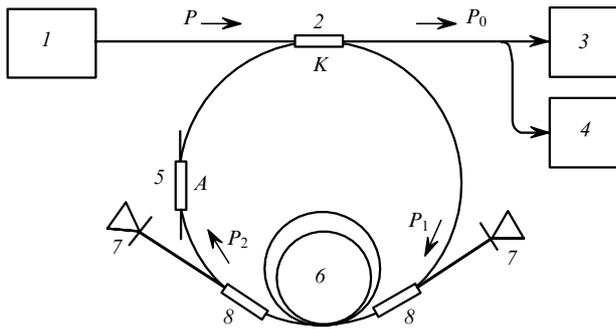


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – волоконный источник света; 2 – направленный ответвитель; 3 – анализатор спектра; 4 – измеритель мощности; 5 – аттенуатор; 6 – активный световод; 7 – лазерные диоды накачки ВОУ; 8 – ответвители-мультиплексоры.

мощью направленных ответвителей-мультиплексоров. Усиление ВОУ регулировалось изменением тока диодов накачки. Для создания рециркуляционного режима ВОУ был включен в кольцевую линию задержки последовательно с аттенуатором и направленным ответвителем. Аттенуатором служил направленный ответвитель 5 с заданным коэффициентом связи во всем спектральном диапазоне измерений. Ответвитель 2 имел коэффициент связи по мощности  $K = 0.5$ . Ответвители были изготовлены из изотропного одномодового световода.

Спектральный профиль  $G(\lambda)$  коэффициента усиления ВОУ по мощности при работе с широкополосным излучением с заданным спектром  $P(\lambda)$  определялся как отношение мощностей сигналов на выходе и входе ВОУ, взятое для данной длины волны света:  $G(\lambda) = P_2(\lambda)/P_1(\lambda)$  (рис.1). В эксперименте спектры сигналов  $P_0(\lambda)$  и  $KP(\lambda)$  на выходе ответвителя 2 измерялись анализатором спектра, средние мощности этих сигналов  $P_0$  и  $KP$  – фотодиодным измерителем мощности. Измерения осуществлялись с одного и того же выхода ответвителя при включенной и выключенной накачке ВОУ. Следует отметить, что при выключенной накачке световод ВОУ полностью поглощает входное излучение. Сигнал  $P_0(\lambda)$  связан с сигналом на выходе фиксированного аттенуатора (коэффициент пропускания  $A$  которого считается независимым от  $\lambda$ ). Изменяя  $A$ , можно в широком диапазоне исследовать влияние на спектр усиления уровня накачки, не допуская генерации кольца. Отметим, что предлагаемая методика определения спектрального профиля  $G(\lambda)$  в некоторой полосе длин волн  $\lambda_1 - \lambda_2$ , соответствующей полосе входного сигнала ВОУ, позволяет, по нашему мнению, более правильно описывать поведение ВОУ при его использовании в РВКИ.

Выведем соотношение для вычисления  $G(\lambda)$  по измеряемым спектрам  $P_0(\lambda)$  и  $KP(\lambda)$ . В соответствии с рис.1 составим систему уравнений

$$P_1(\lambda) = (1 - K)P(\lambda) + AKP_2(\lambda), \quad (1)$$

$$P_0(\lambda) = KP(\lambda) + (1 - K)AP_2(\lambda). \quad (2)$$

Из (1), (2) найдем соотношение для спектрального профиля усиления

$$G(\lambda) = \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} = \frac{P_0(\lambda) - KP(\lambda)}{A[KP_0(\lambda) + (1 - 2K)P(\lambda)]}, \quad (3)$$

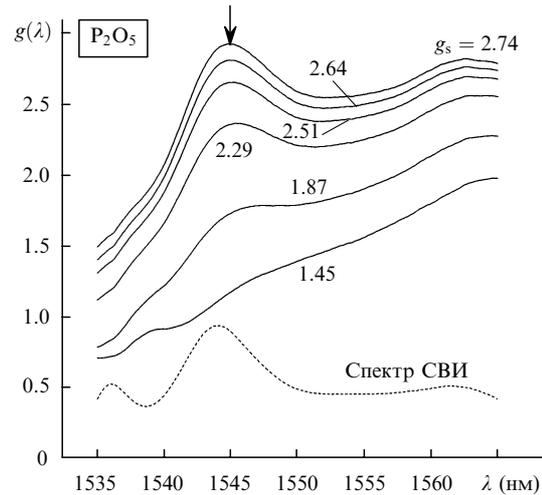


Рис.2. Эволюция спектральных профилей усиления при изменении среднего коэффициента усиления ВОУ по амплитуде  $g_s$  для фосфоросиликатного световода.

которое было использовано при компьютерной обработке измеренных спектров. В дальнейшем будем рассматривать амплитудные спектры ВОУ ( $g(\lambda) = [G(\lambda)]^{1/2}$ ) и СВИ ( $e(\lambda) = [P(\lambda)]^{1/2}$ ).

На рис.2 в качестве примера представлены спектральные профили усиления по амплитуде ВОУ на основе фосфоросиликатного световода при разном уровне накачки (разном среднем коэффициенте усиления  $g_s$ ), причем спектр СВИ был весьма неравномерным (около 5 дБ). Мощность СВИ на входе ВОУ составляла 100 мкВт, дополнительные потери в кольце  $A = 7.2$  дБ ( $A[\text{дБ}] = 10 \lg A^{-1}$ ). Параметром кривых является среднее значение коэффициента усиления  $g_s = [(P_0 - KP)/A(KP_0 + (1 - 2K) \times P)]^{1/2}$ , рассчитанное по показаниям измерителя мощности. Кривая, соответствующая  $g_s = 2.74$ , измерена при максимально возможном уровне накачки вблизи порога генерации кольца, при котором режим работы ВОУ остается стабильным (предпороговый режим). Из рис.2 следует, что профили  $g(\lambda)$  заметно неоднородны, особенно при малой накачке. При увеличении накачки на распределениях  $g(\lambda)$  появляются пики, возрастающие с накачкой. В области одного из пиков (здесь – коротковолнового) при некоторой накачке происходит самовозбуждение кольца в узкой спектральной области (на рис.2 отмечено стрелкой).

При дальнейшем анализе неоднородность профиля определялась параметром  $\delta = g_0/g_{\max}$ , где  $g_0$  – средний по измеренному спектру коэффициент усиления в полосе  $\lambda_1 - \lambda_2$ ;  $g_{\max}$  – его максимальное значение. Полоса выбиралась примерно равной средневзвешенной ширине амплитудного спектра СВИ. Отметим, что  $g_0$  и  $g_s$  – это один и тот же параметр ВОУ, но измеренный разными способами (имеет место небольшое различие значений  $g_0$  и  $g_s$ , которое, по-видимому, связано с методикой их определения и в данной работе не анализируется). Величина  $\delta$  (для однородного профиля  $\delta = 1$ ) характеризует возможности рециркуляционного режима кольцевого резонатора и определяет среднее число рециркуляций в кольце.

Для выявления зависимости  $\delta$  от уровня накачки в более широких пределах были измерены спектральные профили усиления при потерях  $A$  в кольце, равных 0.5, 7.2 и 13 дБ, и неизменных остальных параметрах СВИ и

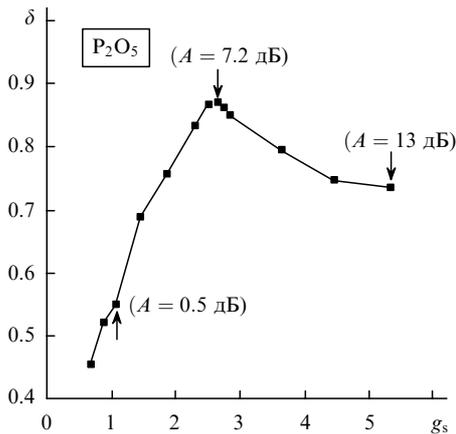


Рис.3. Неоднородность спектрального профиля усиления ВОУ по амплитуде для фосфоросиликатного световода в зависимости от уровня накачки (от среднего коэффициента усиления  $g_s$ ).

ВОУ. На рис.3 показана зависимость  $\delta$  от  $g_s$  для широкого диапазона среднего усиления, представленная последовательно расположенными тремя группами точек, ординаты которых вычислены по измеренным для указанных потерь спектрам (стрелками отмечены точки, соответствующие предпороговому режиму для указанных выше значений потерь). Видно, что наибольшая спектральная неоднородность имеет место при малых потерях и, соответственно, малых накачках ВОУ. Следует отметить, что отвечающие разным  $A$  точки образуют относительно гладкую кривую с выраженным максимумом  $\delta$  при  $g_s \approx 2.65$ . Кроме того, в данном эксперименте уровень накачки, при котором  $\delta$  максимально, оказался немного меньше уровня предпороговой накачки (максимально возможного среднего усиления).

Далее было изучено влияние равномерности спектра СВИ на спектральный профиль ВОУ. На рис.4 показаны спектральные профили усиления для такого же фосфоросиликатного световода, измеренные с помощью СВИ, неравномерность спектра излучения которого равна 1.5 дБ. Исследования показали, что однородность профиля усиления ВОУ не очень сильно зависит от формы спектра СВИ, причем в условиях данного эксперимента предпочтительным является спектр СВИ с плоской формой линии.

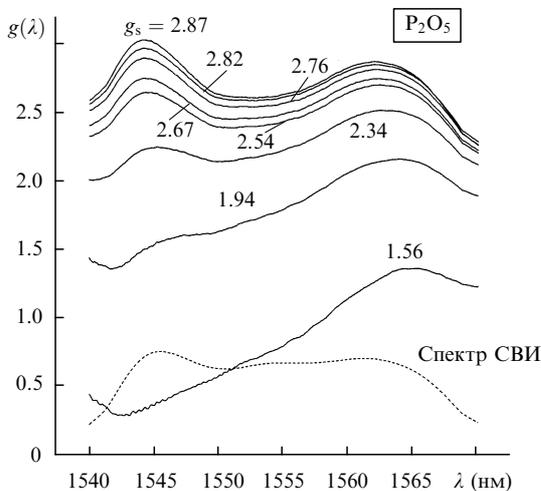


Рис.4. Эволюция спектральных профилей усиления при изменении среднего коэффициента усиления ВОУ по амплитуде  $g_s$  для фосфоросиликатного волокна и равномерного спектра СВИ.

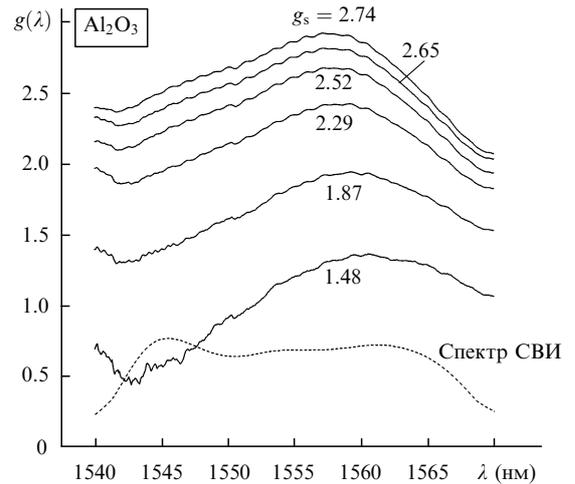


Рис.5. Эволюция спектральных профилей усиления при изменении среднего коэффициента усиления ВОУ по амплитуде  $g_s$  для аллюминатного световода и равномерного спектра СВИ.

Для рассмотрения влияния состава активного световода были измерены спектры усиления ВОУ на аллюминатном световоде (рис.5) при разных накачках и равномерном спектре СВИ. Видно, что форма профиля заметно отличается от таковой в случае фосфоросиликатного волокна (рис.4).

На рис.6 показаны зависимости параметра однородности профиля  $\delta$  от уровня накачки, построенные с использованием представленных на рис.2, 4, 5 профилей усиления. Видно, что наиболее однородный профиль (кривая 2) имел место для фосфоросиликатного волокна и равномерного спектра СВИ. При этом максимальное  $\delta = 0.93$  достигнуто при накачке, заметно меньшей порога генерации кольца, т. е. неоптимальной для работы в РВКИ. Предварительные эксперименты показывают, что для оптимизации необходимо подбирать длину световода ВОУ.

Профили спектров  $g(\lambda)$ , полученные при различных уровнях накачки (рис.2, 4, 5), примерно аналогичны профилям, измеренным по традиционной методике [1]. При малом уровне накачки доминирует длинноволновый участок профиля, с ростом накачки наблюдается подъем

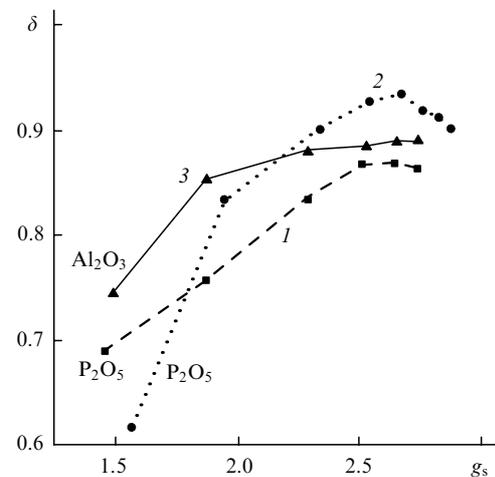


Рис.6. Неоднородность спектрального профиля усиления ВОУ по амплитуде при неравномерном (1) и равномерном (2, 3) спектрах СВИ для фосфоросиликатного и аллюминатного световодов в зависимости от уровня накачки (от среднего коэффициента усиления  $g_s$ ).

коротковолнового участка, который постепенно становится доминирующим. Это можно объяснить [1] неодинаковой спектральной зависимостью сечения поглощения  $\sigma_{ab}(\lambda)$  и сечения усиления  $\sigma_{am}(\lambda)$  света в пределах рабочей полосы ионов эрбия при накачке через третий уровень, а также распределением по длине активного волокна населенностей  $n_1(z)$  и  $n_2(z)$  уровней в основном и возбужденном состояниях. Эти факторы обуславливают наличие уровня накачки, при котором профиль  $\sigma(\lambda)$  максимален однороден. Спектры  $\sigma_{ab}(\lambda)$  и  $\sigma_{am}(\lambda)$  зависят также от состава кварцевого стекла (фосфатное, алюминатное), что приводит к различию профилей  $g(\lambda)$  для разных стекол.

Исследованный в настоящей работе ВОУ на фосфоросиликатном световоде был использован нами ранее [3] в РВКИ совместно со СВИ, имеющим равномерный спектр излучения. Результаты настоящей работы позволяют объяснить расхождение расчета и измерения крутизны выходной характеристики РВКИ, отмеченное в [3]. Расчет проводился в предположении однородности профиля усиления ВОУ. При анализе эксперимента в [3] были отмечены два факта. Во-первых, выигрыш в крутизне характеристики в предпороговом режиме оказался заметно меньше ожидаемого, поскольку генерация в кольце РВКИ наступала уже при относительно малых значениях параметра  $R$  ( $R \sim 0.9$ ). Во-вторых, зависимость крутизны характеристики от усиления ВОУ в области предпорогового режима заметно отличалась от расчетной (линейной) зависимости.

Оба этих факта станут понятными, если учесть неоднородность профиля усиления и неоптимальность накачки ВОУ в предпороговом режиме. Проведенный в настоящей работе анализ показал, что ВОУ имел неоднородный профиль усиления, параметры которого (зависимость  $\delta(g_s)$ ) можно охарактеризовать кривой 2 на рис.6. Таким образом, в эксперименте [3]  $\delta < 0.9$  для предпорогового режима. Учитывая зависимость  $R$  от  $\lambda$  для широкополосного сигнала, можно предположить, что среднее число рециркуляций будет определяться средним по спектру значением  $R_s$ , которое связано с  $\delta$ . Для предпорогового режима можно показать, что  $R_s = ag_s \simeq g_0/g_{\max} = \delta$ . Тогда в условиях эксперимента [3]  $R_s \simeq 0.9$ , и число рециркуляций будет небольшим, что объясняет небольшой выигрыш в крутизне выходной характеристики РВКИ.

Нелинейное поведение крутизны при увеличении усиления ВОУ в эксперименте [3] может быть объяснено зависимостью  $\delta$  от усиления. Как следует из рис.6, максимальное значение  $\delta$  имело место при некотором среднем усилении, с ростом которого величина  $\delta$  становилась заметно меньше максимальной. Это приводило к относительно небольшому снижению числа рециркуляций по сравнению с ожидаемым, что проявлялось в нелинейности зависимости крутизны от усиления ВОУ.

Итак, для повышения чувствительности активных РВКИ необходимо повышать однородность профиля усиления внутрирезонаторного ВОУ. Согласно приведенным выше результатам, для этого необходимо обеспечить по меньшей мере два условия. Во-первых, нужно

работать при таком уровне накачки активного световода, при котором значение  $\delta$  максимально. Во-вторых, этот уровень накачки должен соответствовать предпороговому режиму кольца. Для получения наиболее однородного профиля можно использовать методы, уже предложенные для ВОУ на эрбиевом световоде [1, 5]. Одним из таких методов является использование комбинации активных волокон разного состава и длины. Вместе с тем при использовании ВОУ в РВКИ необходимо обеспечивать взаимность свойств ВОУ для встречных волн. Этот вопрос требует отдельного исследования.

Кроме того, практическое применение усилителя в РВКИ требует стабильности профиля усиления, прежде всего стабильности усиления в той части спектральной области, в которой возможна генерация кольца. Следует иметь в виду, что стабильность профиля является свойством системы, состоящей из СВИ и ВОУ. В настоящей работе экспериментально выявлена относительно слабая зависимость однородности профиля от формы спектра СВИ (а также, согласно предварительным исследованиям, от средней мощности СВИ). Вместе с тем выявлена зависимость профиля усиления от числа рециркуляций в ВОУ. Однако влияние этих факторов на стабильность профиля усиления требует дополнительного изучения.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследованы спектральные профили коэффициента усиления ВОУ на эрбиевом световоде при работе в рециркуляционном режиме с входным излучением от СВИ, выполненным на основе иттербий-эрбиевого волокна. Предложена методика измерения спектрального профиля ВОУ и оценки его однородности при использовании широкополосного входного излучения от СВИ. Изучена зависимость однородности спектрального профиля ВОУ от формы спектра входного излучения, уровня накачки и состава активного световода. Показано, что однородность спектрального профиля усиления имеет максимум при определенном уровне накачки. Установлена необходимость оптимизации комплекса параметров системы СВИ – ВОУ для получения наиболее однородного спектрального профиля. Использование оптимизированной системы СВИ – ВОУ с однородным профилем усиления позволит обеспечить большое число рециркуляций сигнала, что является необходимым условием существенного повышения чувствительности рециркуляционных волоконных кольцевых интерферометров.

Авторы благодарны В.П.Гапонцеву, И.Э.Самарцеву за поддержку работы, а также Э.И.Алексееву за сотрудничество и И.А.Андроновой и Г.Б.Малькину за дискуссии. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минпромнауки (проект по теме 01.40.01.08.02) и РФФИ (грант № 00-02-17344).

1. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications* (New York: A Wiley-Interscience Publication, 1994).
2. Kringlebotn J.T., Blotekjaer K. *J.Lightwave Technol.*, **12**, 573 (1994).
3. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 1113 (2001).
4. Yu A., Siddiqui A.S. *IEE Proc.-J*, **140**, 150 (1993).
5. Liaw S.K., Chen Y.K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 879 (1996).