

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ С ПРИМЕСЬЮ

© 2008 г. **Е. З. Савин**, канд. техн. наук; **Н. Г. Осипова**, канд. физ.-мат. наук;  
**А. И. Ливашвили**, канд. физ.-мат. наук

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

E-mail: telecomm@festu.khv.ru

Работа посвящена исследованию особенностей нелинейного преобразования излучения в оптических волокнах разных типов. Обнаружено, что при использовании узкополосного источника излучения в кольцевой волоконно-оптической установке происходит значительное уширение спектра преобразованного излучения, характер которого зависит от типа оптического волокна. Показано, что уширение спектра излучения возникает в результате эффекта частично вырожденного четырехволнового смешения. Найдены решения в явном виде, удовлетворяющие граничным условиям, которые соответствуют условиям проведения эксперимента.

Коды OCIS: 120.0120, 120.5710.

Поступила в редакцию 28.06.2007.

Современные тенденции развития волоконно-оптических систем передачи заключаются в увеличении пропускной способности оптических волокон и дальности связи. Все это в ближайшем будущем неминуемо приведет к росту передаваемых мощностей, уменьшению длительности импульсов и другим факторам, которые способствуют возрастанию роли нелинейных эффектов в волоконных световодах и в реализованных на их основе приборах.

В настоящее время широкое распространение получили кольцевые волоконно-оптические устройства. Особый интерес вызывает использование в таких конструкциях оптических волокон с присадками ионов переходных металлов таких, как  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и др [1]. В связи с этим возникает необходимость в проведении исследований, направленных на обнаружение особенностей нелинейных явлений, возникающих в кольцевых волоконно-оптических приборах, основу которых составляют стекловолокна, легированные ионами переходных металлов.

Работа посвящена изучению нелинейного преобразования спектра узкополосного излучения в волоконно-оптической конструкции с обратной связью, основными элементами которой являются световоды разных типов: оптическое волокно с присадкой хрома и стандартное одномодовое волокно.

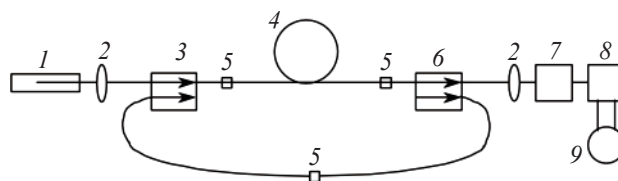
Конструкции современных волоконно-оптических усилителей, лазеров, конвертеров предусматривают наличие обратной связи, благодаря которой становится возможным взаимодействие нескольких оптических волн с характеристиками, отличными от параметров излучения накачки. Поэтому несомненный интерес представляет исследование кольцевого устройства, функциональная схема которого приведена на рис. 1.

Основным элементом установки является оптическое волокно 4. Непрерывное излучение от He-

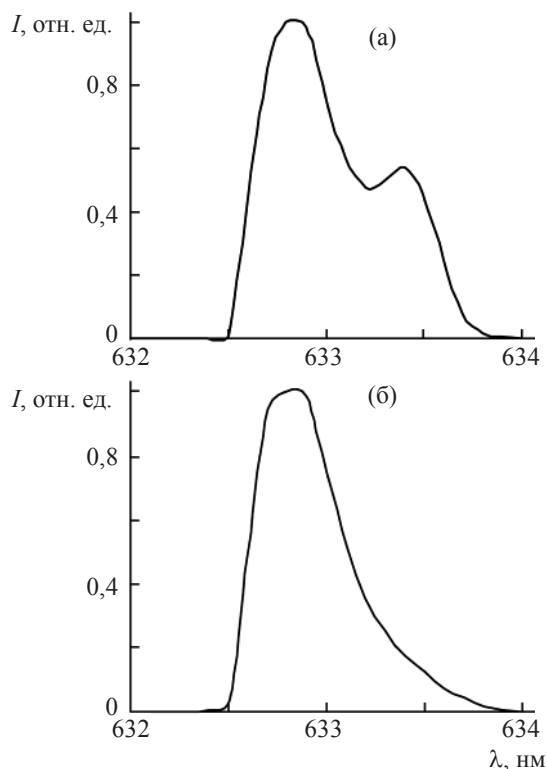
Ne-лазера 1, работающего на длине волны 632,8 нм, поступает через линзу 2 в один из портов ответвителя 3. Пройдя через волокно, световой поток с порта ответвителя 6 через систему линз попадает на спектрограф 7. Интенсивность излучения в исследуемом диапазоне длин волн фиксируется с помощью фотоэлектронного умножителя 8 и вольтметра 9. Используемый лазер, длина резонатора которого составляет 1,4 м, излучает несколько мод. Интервал между соседними модами  $\Delta\lambda = 0,00143 \text{ \AA}$ .

Результаты экспериментальных исследований устройства с волокнами двух типов представлены в виде зависимости интенсивности преобразованного излучения от длины волны  $I = \varphi(\lambda)$  (рис. 2).

В обоих случаях происходит значительное уширение спектров преобразованного излучения в сторону длинноволновой области. Характер спектральной характеристики зависит от типа исследуемого волокна. Так, при использовании волокна, легированного хромом, в спектре появляется пик в районе 633,4 нм, который отсутствует при тех же условиях в стандартном одномодовом волокне.



**Рис. 1.** Функциональная схема экспериментальной волоконно-оптической установки. 1 – He-Ne-лазер, 2 – система линз, 3, 6 – ответвители; 4 – оптическое волокно, 5 – коннекторы, 7 – спектрограф, 8 – ФЭУ, 9 – вольтметр.



**Рис. 2.** Экспериментальные спектральные характеристики преобразованного излучения при использовании следующих волокон: а – легированного  $\text{Sr}^{3+}$ , б – стандартного одномодового.

Рассмотрим нелинейные явления, которые способны вызвать подобное уширение спектров в экспериментальной установке.

Фазовая кросс-модуляция не может служить причиной наблюдаемого уширения вследствие малой мощности возникающего излучения.

Согласно теории рассеяния излучения в волоконных световодах совместно с излучением накачки  $\omega_n$  появляется новый сигнал  $\omega = \omega_n \pm \Omega$ . Так как интенсивность антистоксовой волны ниже интенсивности стоксовой на несколько порядков, то имеет смысл рассмотреть только случай, когда  $\omega = \omega_n - \Omega$ .

Вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ) дает частотный сдвиг  $\Omega_B = 55\pi \times 10^9$  рад/с, что соответствует  $\Delta f_B = 27,5$  ГГц или  $\Delta \lambda_B = 0,0367$  нм.

Оценивая частотный сдвиг  $\Omega_R$ , вызванный комбинационным рассеянием, следует иметь в виду, что коэффициент комбинационного усиления  $g_R$  сильно зависит от частотного сдвига между накачкой и стоксовой волной. Для плавленого кварца  $g_R$  принимает максимальное значение на частоте, смещенной от частоты накачки на 13,2 ТГц ( $440 \text{ см}^{-1}$ ). Согласно [2] существуют другие значения  $\Omega_R$ , при которых  $g_R$  имеет дополнительные максимумы (см. таблицу). Расчеты показывают, что при накач-

Смещение стоксовой волны относительно накачки на 632,8 нм при ВКР

$g_R, \text{см}^{-1}$	128	440	466	490
$\Omega_R \times 10^{-12}, \text{Гц}$	5,60	19,27	20,41	21,46
$\Delta f_R \times 10^{-12}, \text{Гц}$	0,98	3,01	3,26	3,42
$\Delta \lambda_R, \text{нм}$	1,18	4,01	4,35	4,56

ке He–Ne-лазером на выходе волокна из чистого плавленого кварца следует ожидать максимумы усиления в спектре на длинах волн: 633,98; 636,81; 637,15 и 637,36 нм.

Судя по оценкам частотного сдвига, уширение спектра, представленного на рис. 2, можно было бы интерпретировать эффектами вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и ВРМБ, если бы не одна важная особенность, которая состоит в том, что ВКР и ВРМБ – явления пороговые. Иначе говоря, преобразование энергии накачки возникает лишь тогда, когда мощность излучения превышает некоторое пороговое значение. Оценка порога мощности для ВРМБ составляет  $P_B \approx 1,3$  мВт [3].

Можно предположить, что уширение спектра возникает вследствие эффекта ВРМБ, так как мощность используемого лазера (60 мВт) в несколько раз превышает пороговое значение мощности ВРМБ. Однако уширение, возникшее в ходе эксперимента, не может быть объяснено эффектом ВРМБ, поскольку излучение, рассеянное по механизму Манделъштама–Бриллюэна, распространяется в направлении, противоположном накачке. И хотя в световоде в прямом направлении может возникать спонтанное тепловое рассеяние Манделъштама–Бриллюэна, однако оно исключительно слабое и имеет слишком малую величину частотного сдвига порядка  $\sim 10$ –1000 МГц. Такое малое значение частотного сдвига также не может объяснить уширения исследуемых спектров.

Анализируя возможность проявления ВКР, необходимо отметить, что порог возникновения вынужденного комбинационного рассеяния составляет  $P_R \approx 400$  мВт, для преодоления которого мощности применяемого лазера недостаточно, следовательно, необходимо иное объяснение уширения спектра.

Для случая четырехволнового смешения (ЧВС) соответствующий коэффициент усиления характеризуется величиной  $g_p \approx 3,2 \times 10^{-13}$  м/Вт. Сравним величины  $g_p$  и  $g_R$  ( $g_R$  – коэффициент усиления ВКР). Полагая, что  $g_R = 10^{-13}$  м/Вт, получим численное значение их отношения  $g_p/g_R = 3,2$ .

Если световод не поддерживает поляризацию, то  $g_R$  понижается вдвое из-за относительной деполяризации волны накачки и стоксовой волны вдоль

световода и отношение  $g_p/g_R > 3,2$ . Таким образом, пороговая мощность возникновения ЧВС меньше пороговой мощности ВКР в несколько раз.

Следовательно, вероятной причиной уширения спектра является четырехволновое смешение, которое возникает в волоконно-кольцевой схеме. Причем наиболее вероятно частично вырожденное ЧВС (случай  $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$ ,  $i, j \neq k$ ,  $\omega_i = \omega_j$ ), при кото-

ром легче всего обеспечиваются условия фазового синхронизма [2, 4].

Определим выражение для процесса параметрического усиления, когда взаимодействуют четыре волны, причем  $\omega_i \neq \omega_j$  (общий случай ЧВС).

При использовании метода связанных мод система уравнений для каждой волны  $A_j$ , распространяющейся вдоль оси  $Oz$  (рис. 3), имеет вид [2]:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = \frac{i\bar{n}_2\omega_1}{c} \left[ \left( f_{11}|A_1|^2 + 2 \sum_{k \neq 1} f_{1k}|A_k|^2 \right) A_1 + 2f_{1234}A_2^*A_3A_4 \exp(i\Delta kz) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = \frac{i\bar{n}_2\omega_2}{c} \left[ \left( f_{22}|A_2|^2 + 2 \sum_{k \neq 2} f_{2k}|A_k|^2 \right) A_2 + 2f_{2134}A_1^*A_3A_4 \exp(i\Delta kz) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_3}{\partial z} = \frac{i\bar{n}_2\omega_3}{c} \left[ \left( f_{33}|A_3|^2 + 2 \sum_{k \neq 3} f_{3k}|A_k|^2 \right) A_3 + 2f_{3412}A_4^*A_1A_2 \exp(-i\Delta kz) \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_4}{\partial z} = \frac{i\bar{n}_2\omega_4}{c} \left[ \left( f_{44}|A_4|^2 + 2 \sum_{k \neq 4} f_{4k}|A_k|^2 \right) A_4 + 2f_{4312}A_3^*A_1A_2 \exp(-i\Delta kz) \right], \quad (4)$$

где  $f_{jk}$  и  $f_{ijkl}$  ( $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ ) – интегралы перекрытия,  $\bar{n}_2$  – нелинейный показатель преломления,  $\Delta k$  – расстройка волновых векторов.

Уравнения (1)–(4) учитывают эффекты фазовой стоксовой и кросс-модуляции, истощение накачки и четырехволновое смешение. В общем случае система уравнений решается численно. Применительно к выполненному эксперименту можно рассмотреть случай, когда волны накачки  $A_1$  и  $A_2$  значительно интенсивнее сигнальной (стоксовой)  $A_3$  и холостой (антистоксовой)  $A_4$  волн и остаются неизтощенными в процессе взаимодействия.

Выражения для мощности сигнальной  $P_3(l)$  и холостой  $P_4(l)$  волн на выходе световода длиной  $l$  в этом случае имеют вид [2]

$$P_3(l) = P_3(0) \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\chi^2}{4g^2} \right) \text{sh}^2(gl) \right], \quad (5)$$

$$P_4(l) = P_3(0) \left( 1 + \frac{\chi^2}{4g^2} \right) \text{sh}^2(gl), \quad (6)$$

где  $\chi = \Delta k + \gamma(P_1 + P_2)$ ,  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.

Усиление за один проход определится как

$$G_A = \frac{P_3(l)}{P_3(0)} = 1 + \left( 1 + \frac{\chi^2}{4g^2} \right) \text{sh}^2(gl). \quad (7)$$

Известно, что наличие примесей в световоде приводит к возрастанию поглощения. Поэтому адекватной математической моделью для данного эффекта и экспериментальных условий могут стать выражения (1)–(4), в которых поглощение целесообразно учитывать введением в них слагаемых вида  $0,5\alpha A_j$ , где  $j = 1$  или  $2$ ;  $\alpha$  – затухание оптического волокна. То есть считаем, что волны накачки  $A_1, A_2$  гораздо интенсивнее стоксовой и антистоксовой волн ( $|A_1|^2, |A_2|^2 \gg |A_3|^2, |A_4|^2$ ) и могут слегка истощаться в процессе взаимодействия. В таком приближении выражение для мощности сигнала на выходе из волокна имеет вид

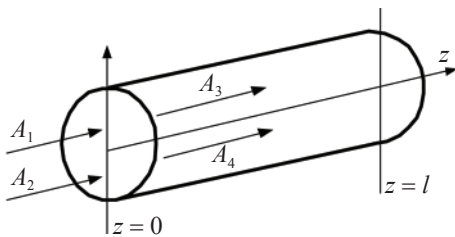
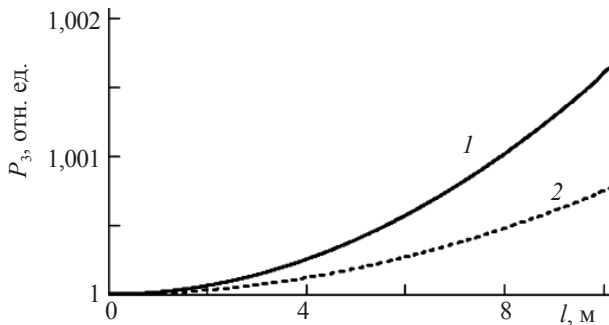


Рис. 3. Отрезок оптоволокон.  $A_1$  и  $A_2$  – волны накачки,  $A_3$  и  $A_4$  – стоксовая и антистоксовая волны.

$$P_3(l) = P_3(0) \left\{ 4 \left( g^2 + \frac{\chi^2 \alpha^2}{16g^2} \right) \left[ 1 - \sin^2 \left( \frac{\chi \alpha}{4g} l \right) + \text{sh}^2(gl) \right] + 2 \left( \alpha g + \frac{\chi^2 \alpha}{4g} \right) \text{sh}(2gl) + \right. \\ \left. + 2 \left( \frac{\chi \alpha^2}{4g} - \chi g \right) \sin \left( \frac{\chi \alpha}{2g} l \right) + (\alpha^2 + \chi^2) \left[ \text{sh}^2(gl) + \sin^2 \left( \frac{\chi \alpha}{4g} l \right) \right] \right\} \frac{\exp(-\alpha l)}{4 \left( g^2 + \frac{\chi^2 \alpha^2}{16g^2} \right)}. \quad (8)$$



**Рис. 4.** Теоретические зависимости мощности выходного сигнала от длины оптического волокна. 1 –  $\alpha = 0$ , 2 –  $\alpha = 0,004419$  дБ/м.

При  $\alpha = 0$  выражение (8) переходит в (5), которому соответствует кривая 1 на рис. 4.

Приведенные графики построены для значений:  $P_1 = 60$  мВт,  $P_2 = 10$  мВт,  $\lambda = 632,8$  нм. С учетом рис. 4 становится очевидным, что затухание в световоде играет существенную роль и даже для ко-

ротких отрезков волокна ( $l \sim 10$  м) его следует учитывать.

Исследования в данном направлении, безусловно, имеют практическую ценность. Полученные результаты и используемые методы могут стать основой для создания новых волоконно-оптических приборов и устройств, применяемых в волоконно-оптических системах передачи, в частности, волоконно-оптических конвертеров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology // USA: ACADEMIC PRESS, 1997. 464 с.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 323 с.
3. Гольшиев В.Ю., Жуков Е.А., Самарцев И.Э., Слепов Д.Г. Влияние самомодуляции на вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна в волоконно-оптических линиях связи // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 7. С. 66–69.
4. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики // М.: Наука, 1989. 557 с.