

Исследование рассеяния Манделъштама – Бриллюэна в фосфоросиликатном волоконном световоде и его влияния на генерацию ВКР-лазера

С.А.Бабин, А.Е.Исмагулов, С.И.Каблуков, Е.В.Подивилов, Д.В.Чуркин

Представлены результаты исследования вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ) одночастотного излучения в оптических волокнах: в телекоммуникационном световоде AllWave[™] и фосфоросиликатном световоде; измерены частотный сдвиг и коэффициент ВРМБ-усиления. Исследована форма спектра генерации фосфоросиликатного волоконного ВКР-лазера в припороговом режиме. Показано, что ВРМБ не приводит к уширению спектра выходного излучения ВКР-лазера.

Ключевые слова: вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна, волоконный ВКР-лазер, уширение спектра.

1. Введение

Волоконный ВКР-лазер относится к перспективным источникам лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне [1]. Вследствие ВКР излучение накачки в нем преобразуется в излучение стоксовых компонент, что позволяет получить генерацию практически на любой длине волны в области 1.1–1.7 мкм. Использование световодов с высокой концентрацией GeO₂ дает возможность отодвинуть верхнюю границу достижимых длин волн генерации ВКР-лазеров до 2.2 мкм [2].

Волоконные ВКР-лазеры нашли широкое распространение в телекоммуникационных системах передачи данных со спектральным уплотнением каналов в качестве многоволновых источников сигнала [3] и источников многоволновой накачки волоконных усилителей [4]. Их предлагается также использовать для сверхдальнего детектирования параметров среды [5], для генерации суперконтинуума [6], в оптической томографии [7].

Проводимые в последние годы исследования направлены, в основном, на расширение возможностей ВКР-лазеров путем изменения спектральных характеристик этих лазеров и управления ими. В частности были предприняты попытки создать перестраиваемые волоконные ВКР-лазеры (см., напр., [8]). Одним из наиболее актуальных практических вопросов является создание волоконных ВКР-лазеров, излучающих в видимом диапазоне длин волн (550–770 нм) [9, 10].

Спектральные характеристики волоконного ВКР-лазера являются определяющими с точки зрения его практических применений. Хорошо известно, что спектр выходного излучения ВКР-лазера уширяется с ростом мощности, однако причины подобного уширения, припи-

сываемые обычно нелинейным эффектам, до сих пор до конца не выяснены [11].

Наиболее сильным из нелинейных эффектов является ВРМБ. Так, к примеру, ВРМБ заметно ограничивает мощность света, проходящего через волоконный световод: при характерной спектральной плотности мощности излучения ~ 1 кВт/нм распространяющееся по световоду излучение накачки начинает вынужденно рассеиваться в противоположном направлении со сдвигом частоты излучения (см., напр., [12]). Наиболее легко порог ВРМБ достижим для узкополосного излучения, в связи с чем этот процесс является главным фактором, ограничивающим эффективность одночастотных волоконных усилителей [13]. В некоторых работах указывается на то, что ВРМБ потенциально может приводить к уширению спектра выходного излучения ВКР-лазера, особенно в припороговом режиме, в котором спектр генерируемого излучения может быть узким [14]. Однако экспериментальное подтверждение или опровержение данной гипотезы до сих пор отсутствует.

Для выяснения возможности влияния ВРМБ на спектральные характеристики волоконного ВКР-лазера необходимо знать порог и коэффициент ВРМБ-усиления, которые зависят в первую очередь от состава и геометрических параметров волокна, в том числе от его длины, и требуют отдельного определения для каждого конкретного типа световода. Одним из наиболее перспективных вариантов активной среды ВКР-лазера является фосфоросиликатное волокно, имеющее большой стоксовый сдвиг (~ 1330 см⁻¹), который в три раза превышает сдвиг в стандартном германосиликатном волокне (~ 440 см⁻¹), что позволяет уменьшить количество ступеней ВКР-преобразования излучения накачки для достижения заданной длины волны генерации и тем самым упростить систему [15]. К сожалению, до настоящего времени ВРМБ в фосфоросиликатном волокне не изучалось.

В настоящей работе проведено исследование ВРМБ одночастотного узкополосного излучения в фосфоросиликатном и стандартном телекоммуникационном (AllWave[™]) волокнах; измерения в последнем проводились, главным образом, для проверки методики. Были

С.А.Бабин, А.Е.Исмагулов, С.И.Каблуков, Е.В.Подивилов, Д.В.Чуркин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: babin@iae.nsk.su, fibber@gorodok.net, kab@iae.nsk.su, podivilov@iae.nsk.su, dimkins@iae.nsk.su

измерены сдвиг частоты рассеянной волны и коэффициент ВРМБ-усиления. Также было экспериментально исследовано формирование выходного спектра ВКР-лазера при мощностях, близких к пороговой. Полученные результаты доказывают, что ВРМБ не влияет на спектральные характеристики фосфоросиликатного волоконного ВКР-лазера средней мощности.

2. Экспериментальная установка

Изучение ВРМБ в световоде проводилось на экспериментальной установке, показанной на рис.1. В качестве источника одночастотного излучения накачки использовался Nd:YAG-лазер Mephisto (InnoLight) с длиной волны генерации 1064 нм, максимальной выходной мощностью 1Вт и шириной спектра излучения ~1 кГц, что много меньше характерной ширины спектра ВРМБ (~20

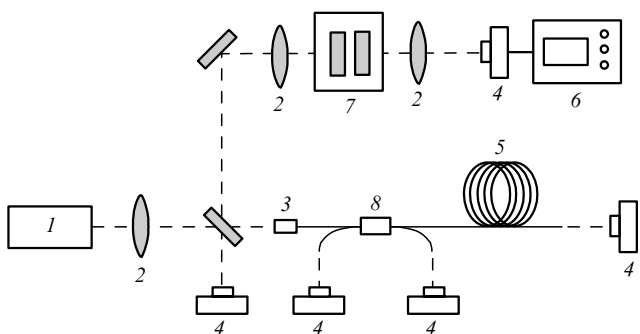


Рис.1. Схема экспериментальной установки по измерению параметров ВРМБ в фосфоросиликатном волокне: 1 – одночастотный Nd:YAG-лазер накачки; 2 – линзы; 3 – коллимирующая линза; 4 – фотодиоды; 5 – волокно; 6 – осциллограф; 7 – сканирующий интерферометр Фабри – Перо; 8 – ответвитель 90 : 10.

МГц) [12]. Ввод излучения в волокно осуществлялся коллиматором на основе градиентной линзы, эффективность ввода достигала 70 %. Уровень введенной в световод мощности измерялся волоконным ответвителем с коэффициентом разделения 90 : 10.

К выходу ответвителя приваривались отрезки волокна AllWave™ или фосфоросиликатного световода с 12 %-ным молярным содержанием P₂O₅ в сердцевине (диаметр модового пятна 6.3 мкм на $\lambda = 1064$ нм). Спектр рассеянного назад излучения регистрировался с помощью сканирующего интерферометра Фабри – Перо, область свободной дисперсии которого можно было менять от 0.1 до 50 ГГц, или оптического анализатора спектра ANDO AQ6317, устанавливаемого вместо интерферометра. В спектре рассеянного сигнала наблюдались основной и смещенный пики; по положению последнего определялся сдвиг частоты рассеянной волны. Для того чтобы исключить влияние отраженного от торцов волокна излучения на характеристики лазера накачки и рассеиваемой волны, все волоконные торцы скалывались под небольшим углом (~10°). В эксперименте измерялись входная мощность накачки, прошедшая мощность и мощность рассеянной волны. По полученным зависимостям мощностей прошедшей и рассеянной волн от мощности входной волны можно было рассчитать коэффициент ВРМБ-усиления в данном волокне.

Результаты эксперимента для волокна AllWave™ представлены на рис.2. При длине отрезка волокна 100 м процесс вынужденного рассеяния волны накачки только начинается – мощность рассеянной волны мала и растет экспоненциально, а прошедшая мощность накачки насыщается на уровне ~0.5 Вт. В 1300-метровом отрезке волокна ВРМБ быстро достигает насыщения, мощность рассеянной волны растет линейно, а прошедшая мощность накачки насыщается на уровне ~40 мВт. Сдвиг

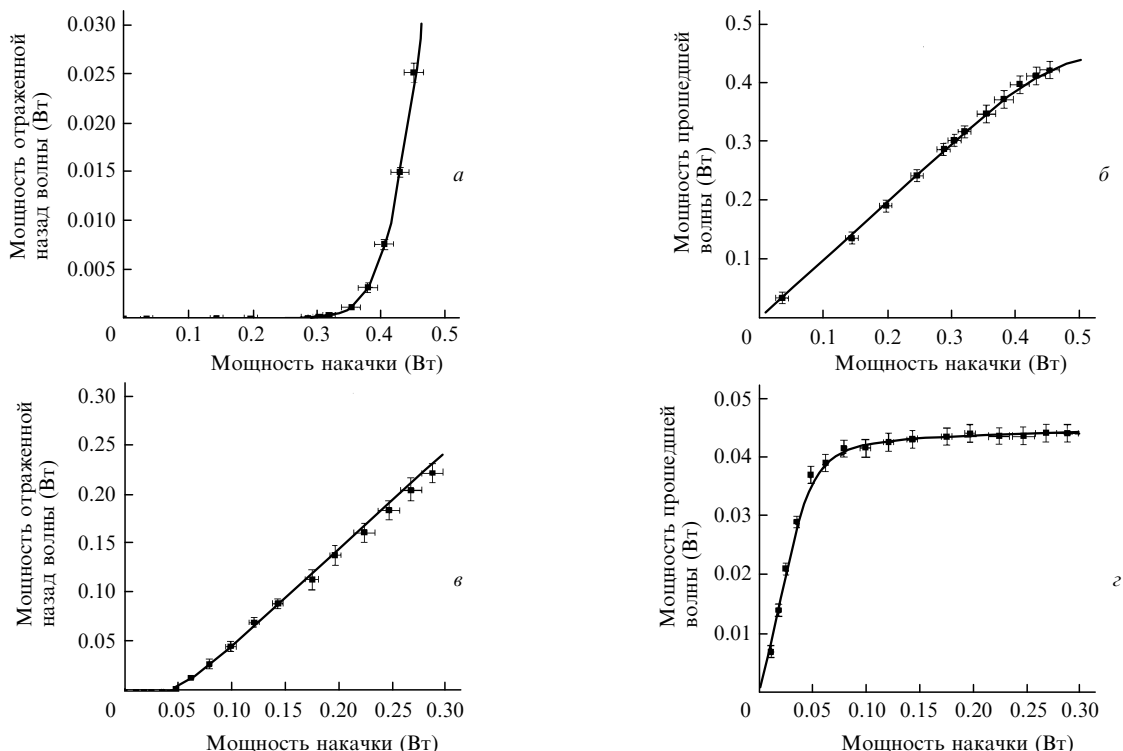


Рис.2. ВРМБ в волокне AllWave™ длины 100 м (а, б) и 1300 м (в, з): зависимости мощности отраженной (а, в) и прошедшей через волокно (б, з) волн. Точки – эксперимент, кривые – результат аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

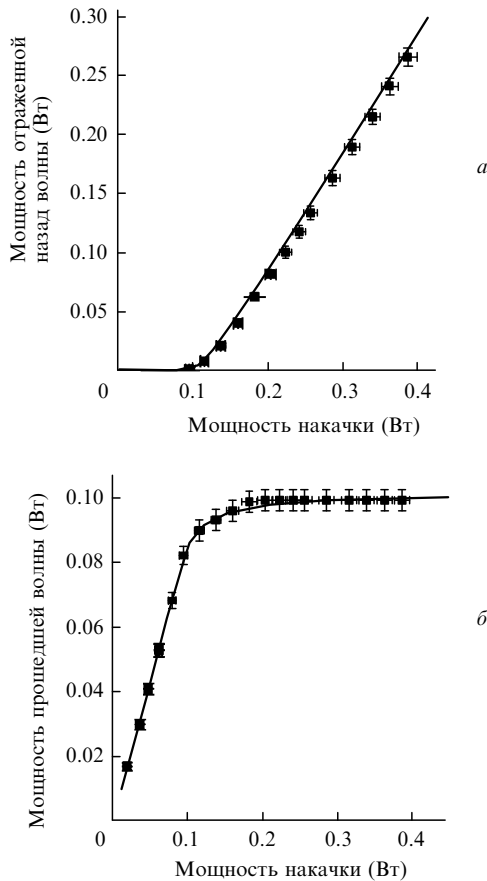


Рис.3. ВРМБ в фосфоросиликатном волокне длиной 370 м: зависимость мощности отраженной (а) и прошедшей через волокно (б) волн. Точки – эксперимент, кривые – результат аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

частоты рассеянной волны $\Delta\nu$, измеренный при помощи сканирующего интерферометра, составляет 16 ± 1 ГГц.

Заметим, что существенное различие уровней насыщения в коротком и длинном отрезках волокна имеет простое качественное объяснение. Чем больше длина взаимодействия излучения со световодом, тем большая доля излучения накачки преобразуется в отраженную волну и тем больше проявляется эффект истощения волны накачки. Таким образом, мощность волны накачки, прошедшей через волокно длиной 1300 м, значительно меньше мощности излучения, прошедшего через волокно длиной 100 м.

В фосфоросиликатном световоде длиной 370 м уровень насыщения мощности накачки составляет 100 мВт (рис.3). Сдвиг частоты рассеянной волны равен 14 ± 1 ГГц на длине волны 1064 нм.

3. Определение коэффициента ВРМБ-усиления

Для нахождения коэффициента ВРМБ-усиления из экспериментальных данных необходимо провести аналитическое рассмотрение эффекта. Известно, что процесс ВРМБ описывается следующей системой уравнений [12]:

$$\frac{dP}{dz} = -g_B IP - \alpha_P P, \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dz} = -g_B IP + \alpha_I I, \quad (2)$$

где I – мощность рассеянного излучения; P – мощность волны накачки; α_P, α_I – коэффициенты затухания в волокне для волны накачки и рассеянной волны соответственно ($\alpha_P \approx \alpha_I$); g_B – коэффициент ВРМБ-усиления; z – координата оси вдоль волокна. Данную систему необходимо дополнить двумя граничными условиями: $P(0) = P_0$ – мощность излучения накачки на входе волокна равна введенной мощности; $I(L) = I_{sp} \rightarrow 0$ – условие отсутствия вынужденно рассеянной волны на выходе из волокна. Здесь I_{sp} – мощность спонтанно рассеянной волны; L – длина световода.

Система нелинейных уравнений (1), (2) в общем случае не имеет точного аналитического решения. Однако оказывается возможным получить приближенное аналитическое решение, если воспользоваться условием $\alpha_I I \ll g_B PI$, которое верно при большом превышении мощностью накачки порога генерации рассеянной волны. При этом слагаемым $\alpha_I I$, отвечающим за потери для рассеянной волны, в уравнении (2) можно пренебречь. Потери волны накачки пренебречь нельзя, т.к. условие $\alpha_P P \ll g_B IP$ не выполняется. Чтобы получить приближенное аналитическое решение, учитывающее затухание излучения накачки в волокне, надо в уравнении (2) заменить малое слагаемое $+\alpha_I I$ на столь же малое слагаемое $-\alpha_P I$. При выполнении условия $\alpha_{I,P} \ll g_B P$, т.е. над порогом генерации, точность такого приближения остается той же, что и в случае полного пренебрежения потерями, а именно $\sim \alpha L / A \leq 3\%$. Стандартно вводимая безразмерная величина A характеризует мощность спонтанно рассеянного излучения и определяется формулой $A(L) = \ln[A(L)/(g_B L I_{sp})] \sim 10 - 20$ (см., напр., [12, 16]).

Аналитическое решение в принятом приближении имеет следующий вид:

$$P(z) = \frac{b \exp(-\alpha_P z)}{1 - \exp\{-g_B b(a + [1 - \exp(-\alpha_P z)]/\alpha_P)\}}, \quad (3)$$

$$I(z) = \frac{b \exp(-\alpha_P z)}{\exp\{g_B b(a + [1 - \exp(-\alpha_P z)]/\alpha_P)\} - 1},$$

где константы b и a определяются из граничных условий

$$b = \exp(\alpha_P L)[P(L) - I_{sp}] \simeq \exp(\alpha_P L)P(L),$$

$$\exp(-g_B ba) \simeq \frac{I_{sp}}{P(L)} \exp[g_B P(L)L_{\text{eff}}].$$

Здесь $L_{\text{eff}} = [\exp(\alpha_P L) - 1]/\alpha_P$ – эффективная длина.

Решение (3) позволяет нам получить соотношения между $P(0)$, $P(L)$ и $I(0)$:

$$P(0) = P(L) \exp(\alpha_P L) \times \left\{ 1 - \frac{A(L)}{g_B L P(L)} \exp[g_B L_{\text{eff}} P(L) - A(L)] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$$I(0) = P(0) - P(L) \exp(\alpha_P L). \quad (5)$$

Используя уравнения (4) и (5), можно провести аппроксимацию экспериментальных данных (зависимостей мощностей проходящей и рассеянной волн от мощности волны накачки) с помощью метода наименьших взве-

шенных квадратов и найти коэффициент ВРМБ-усиления g_B . Аппроксимация проводилась по двум параметрам – коэффициенту g_B и константе $A(L)$.

Результат аппроксимации для отрезков волокна All-Wave[®] представлен на рис.2 линиями. При аппроксимации использовалось экспериментально измеренное значение коэффициента затухания в волокне $\alpha_P = 0.69 \pm 0.02$ дБ/км. В результате были получены следующие значения коэффициента ВРМБ-усиления: $g_B = 400 \pm 180 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ в волокне длиной $L = 100$ м и $g_B = 220 \pm 10 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ для $L = 1300$ м. Различия значений и большая погрешность в определении g_B в 100-метровом волокне связаны с недостатком экспериментальных данных для мощности рассеянной волны в области насыщения мощности проходящего излучения. Для более точного определения g_B необходимы экспериментальные данные в области как линейного роста, так и насыщения. Полученное значение коэффициента ВРМБ-усиления в 1300-метровом волокне, $g_B = 220 \pm 10 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$, хорошо согласуется со стандартным значением для телекоммуникационных волокон $g_B = 250 \pm 10 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [12]. Подставляя измеренное значение g_B в условие применимости аналитического решения $\alpha_P I \ll g_B P_P I$, получаем, что уравнения (4), (5) справедливы при мощностях накачки свыше 10 мВт, т.е. во всем диапазоне наших измерений.

Таким образом, на примере стандартного телекоммуникационного волокна было показано, что разработанный метод измерения и аппроксимации экспериментальных данных позволяет с хорошей точностью определить коэффициент ВРМБ-усиления в волоконном световоде длиной в сотни метров при использовании накачки мощностью в десятки милливатт. Отсюда следует возможность его обоснованного применения для определения параметров ВРМБ в не исследованном ранее фосфоросиликатном волокне.

На рис.3 приведены экспериментальные данные и результат их аппроксимации методом наименьших квадратов с использованием формул (4), (5) для фосфоросиликатного волокна длиной 370 м. Измеренный коэффициент ВРМБ-усиления составил $610 \pm 65 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$, что примерно в три раза больше, чем в стандартном телекоммуникационном волокне.

4. Влияние ВРМБ на характеристики фосфоросиликатного волоконного ВКР-лазера

Для оценки влияния ВРМБ на спектральные характеристики волоконного ВКР-лазера был исследован одноступенчатый фосфоросиликатный ВКР-лазер, схема которого приведена на рис.4. Источником накачки служил непрерывный волоконный иттербиевый лазер с длиной волны 1.06 мкм. Высокодобротный резонатор для сток-

совой компоненты, генерируемой на длине волны 1.24 мкм, был образован двумя волоконными брэгговскими решетками с коэффициентом отражения в максимуме более 99 %.

Зная коэффициент ВРМБ-усиления в фосфоросиликатном волокне, можно оценить влияние данного эффекта на формирование спектра генерации фосфоросиликатного ВКР-лазера. В волокно вводится мощное (до 3 Вт) излучение накачки, спектральная ширина которого составляет ~ 0.1 нм, что много больше характерной ширины спектра ВРМБ-усиления ($\sim 10^{-4}$ нм на $\lambda = 1064$ нм). Следовательно, максимальная спектральная плотность мощности излучения накачки ($\sim 30 \text{ Вт/нм}$) много меньше спектральной плотности мощности, необходимой для ВРМБ-излучения накачки ($\sim 1 \text{ кВт/нм}$) в фосфоросиликатном волокне длиной 370 м (см. рис.3).

Для распространяющегося по волокну достаточно мощного (до 1.8 Вт) стоксова излучения ситуация может быть иной. Стоксова волна находится в резонаторе, поэтому при рассмотрении ее вынужденного рассеяния необходимо ввести эффективную длину волокна, т.е. длину, умноженную на число обходов резонатора. Так как резонатор для стоксовой компоненты является высокодобротным, то эффективная длина будет много больше $L = 370$ м, а порог ВРМБ, следовательно, существенно меньше. Оценим минимально возможное значение порога ВРМБ. Вынужденное рассеяние стоксовой волны возможно только в том случае, если коэффициент усиления рассеянной волны превышает коэффициент ее суммарных потерь. Следовательно, минимальная спектральная пороговая мощность P_{th} определяется из соотношения $g_B P_{th} = \alpha$, где $\alpha \simeq 1$ дБ/км – коэффициент линейных потерь для стоксовой волны. Отсюда следует, что при характерной ширине спектра ВРМБ $\sim 10^{-4}$ нм (на длине волны 1 мкм) и измеренном значении коэффициента ВРМБ-усиления $\sim 2650 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$ минимальная спектральная плотность мощности составляет $\sim 4 \text{ Вт/нм}$. Кроме линейных потерь, существуют еще и сосредоточенные потери (потери в точка сварки, а также потери на брэгговских решетках), которые в нашем случае достигают 2×0.45 дБ на один обход резонатора. Таким образом, минимальная спектральная плотность мощности стоксовой волны, необходимая для ее вынужденного рассеяния, составляет $\sim 8 \text{ Вт/нм}$. Экспериментально измеренное значение максимально достижимой спектральной плотности мощности стоксовой компоненты не превышает 2 Вт/нм , что в несколько раз меньше P_{th} .

Причина, по которой спектральная плотность мощности стоксовой компоненты не достигает порога ВРМБ, состоит в уширении спектра генерации ВКР-лазера. Прямые измерения внутрирезонаторного спектра генерации (рис.5) показывают, что даже в припороговой области мощностей спектр изначально уширен до ~ 0.1 нм. Минимальная ширина спектра генерации ВКР-лазера (основной пик на рис.5) определяется шириной спектра многомодового излучения накачки за счет переноса флуктуаций интенсивности из волны накачки в стоксову компоненту, который в частотной шкале соответствует процессу четырехволнового смешения продольных мод накачки и стоксовой волны [17]. Особо отметим, что одночастотная генерация стоксовой компоненты, которую можно было бы ожидать исходя из однородного характера насыщения ВКР-усиления [18], в эксперименте не наблюдалась.

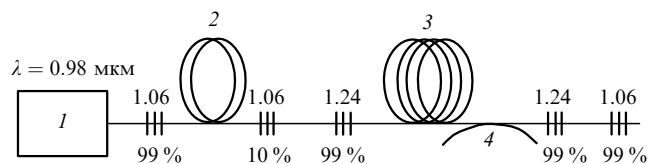


Рис.4. Одноступенчатый волоконный ВКР-лазер с накачкой волоконным иттербиевым лазером: 1 – диодный лазер; 2 – иттербиевое волокно; 3 – фосфоросиликатное волокно; 4 – ответвитель 99:1 на $\lambda = 1.24$ мкм.

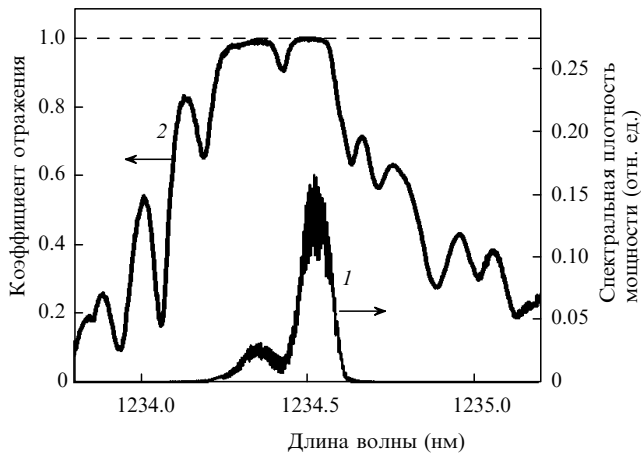


Рис.5. Внутррезонаторный спектр излучения стоксовой компоненты в припороговой области (1) и эффективный «суммарный» коэффициент отражения волоконных брэгговских решеток при полном обходе резонатора ВКР-лазера (2).

С ростом мощности накачки спектр генерации ВКР-лазера уширяется, а его форма качественно «копирует» форму спектральной зависимости коэффициента отражения резонатора (рис.5), что можно интерпретировать как независимую генерацию различных мод [19]. При этом именно уширение спектра генерации является причиной того, что спектральная плотность мощности стоксовой волны не достигает порога ВРМБ, в связи с чем влияние его на спектральные характеристики волоконного ВКР-лазера отсутствует.

5. Заключение

В данной работе представлена методика измерения параметров ВРМБ в волоконных световодах. Впервые измерены параметры ВРМБ в фосфоросиликатном волокне. Сдвиг частоты рассеянной волны составляет 14 ± 1 ГГц на длине волны 1064 нм, коэффициент ВРМБ-усиления одночастотного излучения равен $610 \pm 65 \text{ км}^{-1} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Полученное значение $g_{\text{В}}$ примерно в три раза больше такового в волокне AllWave[®], что может быть связано с меньшим диаметром моды в фосфоросиликатном волокне.

Изучена возможность влияния ВРМБ на спектральные характеристики фосфоросиликатного ВКР-лазера. Показано, что спектральная плотность мощности стоксовой компоненты в фосфоросиликатном ВКР-лазере недостаточна для ВРМБ, поскольку спектр лазера оказывается уширенным даже вблизи порога генерации. Спектр генерации лазера, несмотря на однородный характер насыщения ВКР-усиления, формируется так же, как и в случае независимой генерации различных про-

долных мод, т.е. определяется спектральной формой потерь в резонаторе. Экспериментальные данные свидетельствуют и о влиянии четырехволнового смешения на уширение спектра ВКР-лазера [20].

Авторы выражают благодарность С.Г.Игнатовичу за оказанное техническое содействие. Работа выполнена при финансовой поддержке программ Президиума и Отделения физических наук РАН, интеграционной программы СО РАН, госконтракта ФАНИ (№ 02.442.11.741), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-7214.2006.2), молодежного гранта СО РАН и фонда CRDF (RUP1-1509-NO-05).

1. Дианов Е.М., Фурса Д.Г., Абрамов А.А., Беловолов М.И., Бубнов М.М., Шипулин А.В., Прохоров А.М., Девярых Г.Г., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф. *Квантовая электроника*, **21**, 807 (1994).
2. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Машинский В.М., Неструев В.Б., Медведков О.И., Шубин А.В., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В. *Квантовая электроника*, **34**, 695 (2004).
3. Kim C.-S., Sova R.M., Kang J.U. *Opt. Commun.*, **218**, 291 (2003).
4. Mermelstein M.D., Headley C., Bouteiller J.-C., Steinvurzel P., Horn C., Feder K., Eggleton B.J. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13**, 1286 (2001).
5. Tran T.V.A., Han Y.-G., Kim S.-H., Lee S.B. *Opt. Lett.*, **30**, 1632 (2005).
6. Feng M., Li Y.G., Li J., Li J.F., Ding L., Lu K.C. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 1172 (2005).
7. Hsiung P.-L., Chen Y., Ko T.H., Fujimoto J.G., deMatos C.J.S., Popov S.V., Taylor J.R., Gapontsev V.P. *Opt. Express*, **12**, 5287 (2005).
8. Lewis S.A.E., Chernikov S.V., Taylor J.R. *Opt. Commun.*, **182**, 403 (2000).
9. Feng Y., Huang S., Shirakawa A., Ueda K.-I. *Opt. Express*, **12**, 1843 (2004).
10. Georgiev D., Gapontsev V.P., Dronov A.G., Vyatkin M.Y., Rulkov A.B., Popov S.V., Taylor J.R. *Opt. Express*, **13**, 6772 (2005).
11. Wang Q., Wang Y., Zhang W., Feng X., Liu X., Zhou B. *Opt. Lett.*, **30**, 952 (2005).
12. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems* (New York: John Wiley and Sons, 1997).
13. Liem A., Limpert J., Zellmer H., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **28**, 1537 (2003).
14. Kim N.S., Prabhu M., Li C., Song J., Ueda K.-I. *Opt. Commun.*, **176**, 219 (2000).
15. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semjonov S.L., Prokhorov A.M. *Electron. Lett.*, **33**, 1542 (1997).
16. Kobayakov A., Mehendale M., Vasilyev M., Tsuda S., Evans A.F. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 1635 (2002).
17. Babin S.A., Churkin D.V., Fotiadi A.A., Kablukov S.I., Medvedkov O.I., Podivilov E.V. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 2553 (2005).
18. Babin S.A., Churkin D.V., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Opt. Express*, **13**, 6079 (2005).
19. Бабин С.А., Курков А.С., Потапов В.В., Чуркин Д.В. *Квантовая электроника*, **33**, 1096 (2003).
20. Babin S.A., Churkin D.V., Ismagulov A.E., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Opt. Lett.*, **31**, 3007 (2006).