

УДК 621.378.325

ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ВРМБ УСИЛИТЕЛЯ*Е. А. Кузин, М. П. Петров, А. А. Фотиади*

Проведено экспериментальное исследование волоконно-оптического ВРМБ усилителя. Получены зависимости, характеризующие усиление входного стоксового сигнала, истощение накачки. Усиление стоксового сигнала в условиях эксперимента достигало ~ 35 , а накачка истощалась до 90 %. Рассмотрены особенности работы усилителя и получены данные о пространственном распределении усиленного стоксового сигнала при некоторых специальных пространственных распределениях стока и накачки. Показано, что степень ОВФ накачки в усилителе существенным образом зависит от пространственных распределений входных сигналов стока и накачки. В условиях эксперимента степень ОВФ составляла 0, 40, 80 и 100 %. Имеет место корреляция между степенью ОВФ и усилением.

ВРМБ в оптическом волокне привлекает внимание прежде всего вследствие малых пороговых мощностей накачки, которые могут быть достигнуты благодаря высокой концентрации излучения в световедущей жиле и большой длине взаимодействия излучения со средой. Это может позволить перейти к работе с непрерывными лазерами и существенно расширить область применения ВРМБ и связанного с ним ОВФ, в частности, для целей коммутации оптических каналов связи и построения оптических логических элементов [1, 2].

Принципиальная возможность использования механизма ВРМБ для создания новых оптических систем стимулирует дальнейшее исследование процесса ВРМБ в многомодовом оптическом волокне. При этом большой интерес может представлять не только процесс генерации стоксовой волны из шума, который в настоящее время довольно хорошо изучен (см., например, [3-6]), но и процесс усиления внешней стоксовой волны, введенной в оптическое волокно навстречу накачке. Рабочие мощности накачки такого ВРМБ усилителя лежат ниже порога генерации стоксовой волны из шума. Поэтому эффективное рассеяние накачки в данном случае возможно только при наличии входного стоксового сигнала и зависит от его мощности и условий ввода в волокно. В отличие от ВРМБ генератора, где спонтанно рассеянная на гиперзвуке накачка (шум) всегда возбуждает практически все моды волокна, затравочная волна в ВРМБ усилителе не является обязательно многомодовой. Входной стоксов сигнал может быть введен в небольшое число мод, и тогда его пространственное распределение по отношению к пространственному распределению накачки внутри волокна может оказаться существенным как для усиления стоксовой волны, так и для ее пространственного распределения на выходе из волокна, в частности для ОВФ накачки. Таким образом, процесс ВРМБ в усилителе может обладать рядом специфических особенностей и требует специального изучения.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование волоконно-оптического ВРМБ усилителя. Получены зависимости, характеризующие усиление внешнего стоксового сигнала, истощение накачки в усилителе. Рассмотрены особенности работы усилителя и получены данные о пространственном распределении выходного стоксового сигнала при некоторых специальных пространственных распределениях входного стоксового сигнала и накачки. На их основе сделаны выводы о возможности ОВФ накачки в усилителе.

1. Схема и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Рубиновый лазер 1 с пассивной модуляцией добротности на красителе (криптоцианине) вырабатывает одиночные импульсы длительностью 200—400 нс, мощностью в максимуме 200—4000 Вт. Часть такого импульса отражается от полупрозрачного зеркала 2 и после ослабления фильтром 3 до мощности $P_{L\text{вх}}(t)$ вводится в отрезок волокна 4 длиной ~ 2 м (ВРМБ усилитель) в качестве накачки. Свет лазера, прошедший через зеркало 2 и фильтр 5, попадает в волокно 6 длиной ~ 12 м (ВРМБ генератор) и вызывает в нем эффективную генерацию назад стоксового сигнала. Часть этого сигнала отражается от стеклянной пластины 7, ослабляется фильтром 8 и в качестве входного стоксового сигнала мощностью $P_{L\text{вх}}(t)$ вводится в усилитель 4 со второго конца навстречу накачке. Фильтры 3, 5, 8 подбираются таким образом, чтобы обеспечить (по максимуму в импульсе) мощность входного сигнала накачки усилителя и мощность лазерного им-

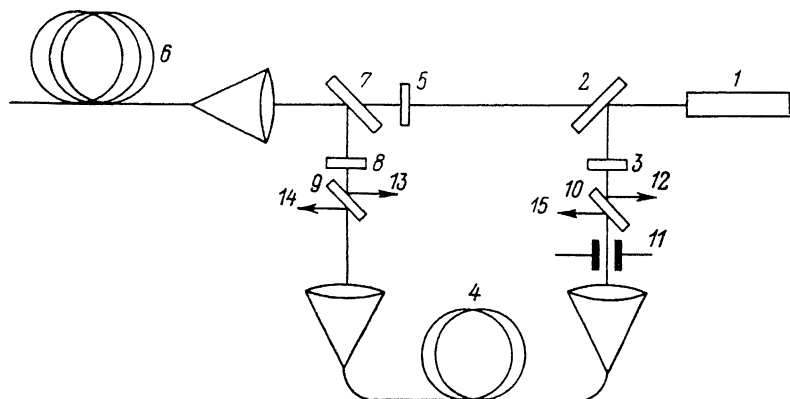


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — рубиновый лазер; 2 — полупрозрачное зеркало; 3, 5, 8 — светофильтры; 4 — ВРМБ усилитель; 6 — ВРМБ генератор; 7, 9, 10 — стеклянные пластины; 11 — ирисовая диафрагма; 12—15 — регистрации сигналов $P_{L\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вх}}(t)$, $P_{L\text{вых}}(t)$, $P_{S\text{вых}}(t)$.

пульса, вводимого в ВРМБ генератор в диапазоне 10—400 Вт, а мощность входного стоксового сигнала от 0.1 до 20 Вт. Мощность импульса, подаваемая в ВРМБ генератор, всегда выше его порога генерации (~ 10 Вт), а входная мощность накачки усилителя ниже его пороговой мощности, при которой ВРМБ в волокне возникает в отсутствие входного стоксового сигнала. (Пороговая мощность ВРМБ усилителя зависит от условий эксперимента). Стеклянные пластинки 9, 10 ответвляют части входных и выходных (прошедших через усилитель) световых потоков в фотоэлементы типа ФЭК для измерения. Абсолютные значения мощностей сигналов в усилителе $P_{L\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вых}}(t)$, $P_{L\text{вых}}(t)$ пересчитываются из измеренных фотоэлементами с учетом как коэффициентов отражения пластинок 9, 10, так и коэффициентов ввода света в волокно ($\sim 60\%$), причем последние измеряются специально после каждой юстировки установки. Ирисовая диафрагма 11 может перекрывать часть измеряемого потока выходного стоксового сигнала и позволяет исследовать его пространственное распределение. В дальнейшем изложении мы будем считать ирисовую диафрагму 11 полностью открытой, кроме тех случаев, когда ее положение специально оговаривается.

Регистрация сигналов производилась с помощью двух запоминающих двухлучевых осциллографов С8-14, которые фиксировали одновременно временные развертки входных сигналов накачки и стока $P_{L\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вх}}(t)$, выходных сигналов стока и накачки $P_{S\text{вых}}(t)$, $P_{L\text{вых}}(t)$. На рис. 2 представлены осциллограммы сигналов, полученные в результате одного измерения. Рассмотрим на их основе особенности работы ВРМБ усилителя в рамках данной экспериментальной схемы.

В усилитель поступают одновременно гладкий лазерный импульс накачки (рис. 2, а) и полученный из ВРМБ генератора импульс входного стоксового

сигнала (рис. 2, б), который, как и следовало ожидать [7], оказывается промодулированным по интенсивности с периодом модуляции, приблизительно равным двойному времени пробега света по волокну генератора. Выходной стоксов сигнал (рис. 2, в) достаточно хорошо воспроизводит изрезанную форму входного сигнала. Легко установить соответствие между ними по числу и расположению точек экстремумов на соответствующих временных развертках. В среднем мощность выходного стоксового сигнала примерно на порядок выше мощности входного, но из сравнения осциллограмм видно, что наибольшее усиление получает центральная часть импульса $P_{S\text{вх}}(t)$, т. е. та, которая соответ-

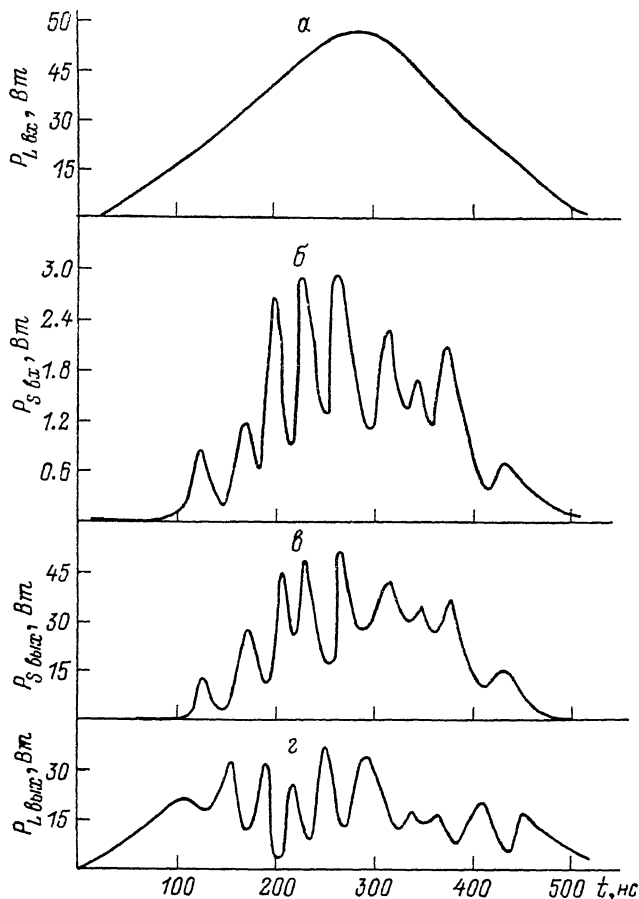


Рис. 2. Осциллограммы сигналов в усилителе.

а — входной сигнал накачки $P_{L\text{вх}}(t)$, б — входной стоксов сигнал $P_{S\text{вх}}(t)$, в — выходной (усиленный) стоксовый сигнал $P_{S\text{вых}}(t)$, з — выходной (истощенный) сигнал накачки $P_{L\text{вых}}(t)$.

ствует большим мгновенным значениям $P_{L\text{вх}}(t)$. В том же временном интервале больше всего истощен импульс накачки, прошедший через волокно (рис. 2, з). Он также сильно изрезан, причем его минимальные мгновенные значения по времени соответствуют максимальным мгновенным значениям стоксовых сигналов (и наоборот). Расчеты, проведенные на основе этого (рис. 2) и других аналогичных измерений, показали, что изрезанные выходные сигналы накачки и стока практически всегда (при $P_{S\text{вх}} \ll P_{L\text{вх}}$) дополняют друг друга до гладкого сигнала накачки $P_{L\text{вх}}(t)$, т. е. тождество

$$P_{L\text{вх}}(t) + P_{S\text{вх}}(t) = P_{L\text{вых}}(t) + P_{S\text{вых}}(t) \quad (1)$$

довольно хорошо выполняется в условиях эксперимента.

Модуляция интенсивности входного стоксового сигнала приводит к тому, что ВРМБ усилитель в данной установке работает в общем случае не в стационарном режиме. Характерное время нарастания сигналов (рис. 2, б—з)

10—15 нс, что всего в несколько раз превышает время релаксации гиперзвуковой волны в стекле (для $\lambda_L=693$ нм $\tau_{zv} \sim 5$ нс [8]). Однако хорошо видно, что в окрестностях экстремальных точек кривых $P_{S\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вых}}(t)$, $P_{L\text{вых}}(t)$ мгновенные значения сигналов можно считать постоянными за времена 20—30 нс и режим работы усилителя здесь наиболее близок к стационарному. Выбирая усредненные значения $P_{S\text{вх}}(t)$, $P_{S\text{вых}}(t)$, $P_{L\text{вых}}(t)$ из этих окрестностей и соответствующие им мгновенные значения $P_{L\text{вх}}(t)$ (они слабо меняются за 30 нс), можно получить из одного измерения 3—4 экспериментальных точки ($P_{L\text{вх}}$, $P_{S\text{вх}}$, $P_{S\text{вых}}$, $P_{L\text{вых}}$), описывающих работу усилителя в указанном выше режиме. Совокупность подобных измерений дает набор экспериментальных данных, на основе которого можно построить амплитудные характеристики усилителя, раскрывающие связь между значениями мощностей входных и выходных сигналов.

2. Исследование усиления стоксового сигнала и истощение накачки в усилителе

В разделе 1 исследовались амплитудные характеристики ВРМБ усилителя при условии, когда свет накачки и свет входного стоксового сигнала практически полностью заполняют всю апертуру волокна. В этом эксперименте в качестве усилителя использовалось кварцевое волокно длиной $L=180$ см, пло-

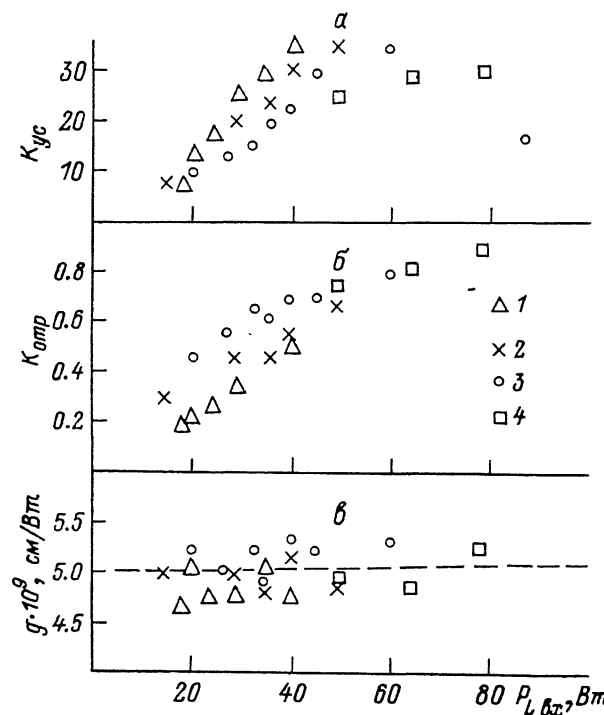


Рис. 3. Зависимости коэффициентов усиления K_{yc} (а), отражения $K_{отр}$ (б) и параметра g (в) от мощности входного сигнала накачки.

1 — $P_{S\text{вх}} = 0.3 \div 0.5$, 2 — $0.5 \div 1$, 3 — $1 \div 1.8$, 4 — $1.8 \div 2.2$ Вт.

щадь сечения сердцевины $S = \frac{\pi}{4} 26 \times 28$ мкм² и апертурой ~ 0.1 . Ввод света в волокно осуществлялся короткофокусными объективами таким образом, чтобы обеспечить возбуждение всех волоконных мод. Порог мощности накачки, при котором ВРМБ в волокне возникало при отсутствии входного стоксового сигнала (при $P_{S\text{вх}}=0$), равнялся 80 Вт.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3, а, б в виде зависимостей коэффициентов усиления $K_{yc} = P_{S\text{вых}}/P_{S\text{вх}}$ и отражения $K_{отр} = P_{S\text{вых}}/P_{L\text{вх}}$

от мощности накачки $P_{L \text{ вх}}$ в диапазоне мощностей накачки 10—80 Вт и при мощностях входного стоксового сигнала от 0.3 до 2.3 Вт. Из этого рисунка видно, что экспериментальные точки, соответствующие разным мощностям входного стоксового сигнала, разделяются между собой и образуют семейства функциональных кривых. Максимально достигнутый в условиях эксперимента коэффициент усиления ~ 35 , а коэффициент отражения при наибольшей мощности входного стоксового сигнала достигает 90%, т. е. только 10% от входного сигнала накачки проходит через волокно. Истощение накачки приводит к существенному насыщению усиления. Только при малых мощностях входного стоксового сигнала и накачки, когда истощение незначительно, коэффициент усиления быстро растет с накачкой, причем определяется здесь только одной накачкой. Напротив, при сильном истощении накачки коэффициент усиления практически не зависит от накачки, а определяется только мощностью входного стоксового сигнала. В общем случае коэффициент усиления определяется как накачкой, так и входным стоксовым сигналом.

Полученные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с известной формулой, описывающей ВРМБ в условиях истощения накачки [9]

$$K_{yc} = \frac{\exp \left\{ [1 - K_{отр}] P_{L \text{ вх}} \times g \frac{L}{S} \right\} - K_{отр}}{1 - K_{отр}}, \quad (2)$$

где S , L — площадь сечения и длина области нелинейного рассеяния; g — коэффициент усиления, определяемый нелинейными свойствами среды. Необходимо отметить, что формула (2) предполагает взаимодействие двух монохроматичных и одинаково поляризованных волн стока и накачки, распространяющихся в среде строго навстречу друг другу. Расчеты показали, что данные эксперимента с усилителем хорошо описываются формулой (2) с параметром g , численно равным значению коэффициента усиления для кварцевого стекла $g_0 = 5 \cdot 10^{-9}$ см/Вт. Из рис. 3, в хорошо видно, что отдельные реализации параметра g , полученные из формулы (2) в результате подстановки в нее экспериментальных данных (рис. 3, а, б), оказываются хаотически разбросанными вокруг g_0 в пределах погрешности измерений $\pm 10\%$.

Таким образом, ВРМБ в многомодовом волоконном световоде при возбуждении всех мод достаточно хорошо описывается теорией взаимодействия плоских монохроматических волн.

3. Исследование пространственных характеристик усиленной стоксовой волны

В разделе 2 были измерены амплитудные характеристики усилителя и получены данные о пространственном распределении выходного стоксового сигнала при некоторых специальных пространственных распределениях входных сигналов стока и накачки. Для характеристики качества ОВФ накачки в эксперименте определялась величина степени обращения

$$H = \frac{P_{S \text{ вых}}^L}{P_{S \text{ вых}}} \cdot 100 \%,$$

$P_{S \text{ вых}}^L$ — мощность той части выходного стоксового сигнала, которая пространственно совпадает с накачкой.

Исследования проводились с отрезком волокна длиной $L = 220$ см, площадью сечения сердцевинки $S = \pi/4 \cdot 50 \times 50$ мкм² и апертурой 0.25. Пучки накачки и входного стоксового сигнала с поперечным диаметром ~ 1 мм фокусировались на торец волокна линзами с фокусным расстоянием 35 мм и могли вводиться в волокно под различными углами φ , заполняя при этом только небольшую часть его апертуры, таким образом селективно возбуждая в волокне моды либо низших (при $\varphi \sim 0$ рад), либо высших (при $\varphi \sim 0.15$ рад) порядков. Ирисовая диафрагма II (рис. 1) в условиях эксперимента принимала два фиксированных положения: а) полностью открыта и пропускает весь выходной стоксов сигнал; б) прикрыта

настолько, что пропускает только ту часть выходного стоксового сигнала, которая пространственно совпадает с накачкой.

Исследовались следующие варианты пространственных распределений входных сигналов стокса и накачки: 1) входной стоксов сигнал и накачка возбуждают в волокне только моды низших порядков, 2) накачка возбуждает в волокне моды только низших, а входной стоксов сигнал только высших порядков, 3) входной стоксов сигнал и накачка возбуждают в волокне только моды высших порядков, 4) накачка возбуждает в волокне моды только высших, а входной стоксов сигнал только низших порядков.

Результаты экспериментального исследования усилителя при вариантах пространственного распределения входных сигналов стокса и накачки «1»—«4» представлены соответственно на рис. 4, *a—г*. При открытом положении диафрагмы получены экспериментальные зависимости $K_{yc}^L(P_{L\text{вх}}) = P_{S\text{вых}}^L/P_{S\text{вх}}$, $K_{отр}^L(P_{L\text{вх}}) = P_{S\text{вых}}^L/P_{L\text{вх}}$ (светлые точки), характеризующие усиление вход-

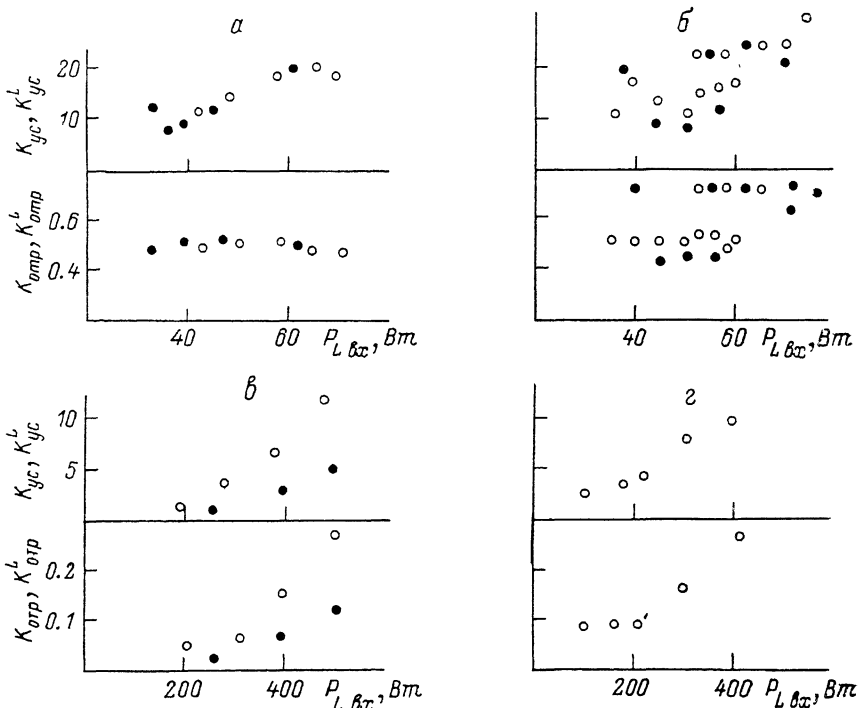


Рис. 4.

ного стоксового сигнала и истощение накачки в усилителе; при прикрытом положении диафрагмы построены аналогичные зависимости $K_{yc}^L(P_{L\text{вх}}) = P_{S\text{вых}}^L/P_{S\text{вх}}$, $K_{отр}^L(P_{L\text{вх}}) = P_{S\text{вых}}^L/P_{L\text{вх}}$ (темные точки) для той части выходного стоксового сигнала, которая пространственно совпадает с накачкой; $P_{S\text{вх}} = 1.5 \div 2.0$ (*a, б*) и $3.0 \div 20$ Вт (*в, г*). Сравнение характеристик, полученных при открытом и прикрытом положениях диафрагмы, позволяет проследить зависимость степени ОВФ в усилителе H от мощности накачки и сделать вывод о пространственном распределении выходного стоксового сигнала при данном способе ввода света в волокно.

Рассмотрим сначала работу усилителя при условии, когда накачка возбуждает в волокне только моды низших порядков (варианты «1», «2»). Из рис. 4, *a, б* видно, что характер полученных зависимостей в обоих случаях в основном совпадает с характером зависимостей, полученных ранее (рис. 3, *a, б*), однако каждая из них имеет свои особенности, определяемые спецификой ввода света в волокно. В том случае, когда входной стоксов сигнал вводится в те же моды волокна, что и накачка (вариант «1»), экспериментальные точки (рис. 4, *a*) имеют малый разброс значений и образуют четкую зависимость. Она хорошо описывается формулой (2) с параметром $g = 8 \cdot 10^{-9}$ см/Вт. Зависимости, полу-

ленные при открытом и прикрытом положениях диафрагмы, совпадают во всем экспериментальном диапазоне мощностей входных сигналов и, таким образом, совпадают пространственные распределения выходного стоксового сигнала и накачки, т. е. имеет место близкое к 100% ОВФ в усилителе.

В том случае, когда входной стоксов сигнал вводится в моды волокна высших порядков (вариант «2»), экспериментальные точки (светлые; рис. 4, б). соответствующие открытому положению диафрагмы, имеют существенно больший разброс значений по сравнению с экспериментальными точками в предыдущем случае. Расчеты показали, что этот разброс выходит за рамки экспериментальной погрешности измерений и связан с неоднозначностью полученных характеристик. Светлые экспериментальные точки хорошо укладываются на две функциональные зависимости, описываемые формулой (2) с двумя разными значениями параметра: $g_1=7 \cdot 10^{-9}$, $g_2=9 \cdot 10^{-9}$ см/Вт и, таким образом, формально разделяются на два класса. Определить причину такого раздвоения характеристик в рамках проведенного эксперимента не удается. Экспериментальные данные, полученные при прикрытом положении диафрагмы (темные точки), также образуют два семейства точек. Одни точки укладываются строго на зависимость (2) с параметром $g=g_2$, другие лежат несколько ниже точек зависимости (2) с параметром $g=g_1$.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующий вывод.

В том случае, когда амплитудные характеристики усилителя описываются формулой (2) с большим значением $g=g_2$, весь выходной стоксов сигнал полностью совпадает с накачкой и имеет место 100% ОВФ. В другом случае (при $g=g_1$) степень ОВФ в усилителе составляет 80%.

Причины появления двух групп результатов неясны. Скорее всего они связаны со случайными флуктуациями условий ввода света в волокно.

Исследование усилителя при условии, когда накачка возбуждает в волокне только моды высших порядков (варианты «3», «4»), было осложнено тем обстоятельством, что порог мощности накачки, при котором ВРМБ в волокне возникает при $P_{S\text{ вх}}=0$, увеличился в несколько раз, а коэффициент усиления сильно упал.

Зависимости (рис. 4, в, г) снимались в диапазоне мощностей входного стоксового сигнала от 3 до 20 Вт. Расчеты показали, что они довольно хорошо описываются формулой (2) с параметром $g=5 \cdot 10^{-10}$ см/Вт. При этом в случае совпадения пространственного распределения входного стоксового сигнала с накачкой (вариант «3») степень ОВФ в усилителе составляла 40% (рис. 4, в). Когда входной стоксов сигнал вводился в низшие моды волокна (вариант «4»), никакого перераспределения выходного стоксового сигнала не наблюдалось (рис. 4, г).

Таким образом, мы наблюдали, что процесс усиления в волокне зависит от того, в какие моды вводится накачка и стоксова волна. При этом при вводе и накачки, и стоксовой волны в низшие моды наблюдается совпадение пространственного распределения накачки и усиленной стоксовой волны и коэффициент усиления $g=8 \cdot 10^{-9}$ см/Вт. При вводе накачки в низшие моды, а стока в высшие имеет место раздвоение результатов на две группы. Одна группа соответствует случаю лучшего ОВФ и большего коэффициента усиления ($g=9 \cdot 10^{-9}$ см/Вт), вторая группа — худшего ОВФ и меньшего коэффициента усиления ($g=7 \cdot 10^{-9}$ см/Вт). Полученные результаты, несомненно, расширяют область практических применений ВРМБ в оптических волокнах. В частности, они могут оказаться полезными для создания оптических пространственных корреляторов.

Литература

- [1] Кузин Е. А., Петров М. П. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 7, с. 389—393.
- [2] Кузин Е. А., Петров М. П. Автометрия, 1986, № 2, с. 87—92.
- [3] Петров М. П., Кузин Е. А. Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, № 12, с. 729—732.
- [4] Петров М. П., Кузин Е. А. ФТТ, 1983 т. 25, № 2, с. 334—338.
- [5] Басиев Т. Т., Дианов Е. М., Карасик А. Я. и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 36, № 3, с. 85—87.
- [6] Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985, с. 30—60.
- [7] Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Киселев А. М. и др. Квант. электр., 1976, т. 3, № 10, с. 2248—2252.
- [8] Ippen E. P., Stolen R. H. Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, N 11, p. 539—540.
- [9] Tang C. L. J. Appl. Phys., 1966, v. 37, N 8, p. 2945—2955.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
18 ноября 1986 г.