

# Пространственная когерентность стоксовой компоненты вынужденного комбинационного рассеяния, возбуждаемого в протяженном многомодовом волоконном световоде

М.А.Кицак, А.И.Кицак

*Проведен теоретический анализ модовой структуры стоксовой компоненты излучения вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в многомодовом волоконном световоде, возбуждаемого полем накачки, статистика которого соответствует модели узкополосного гауссова шума. Получено соотношение, связывающее число пространственно-когерентных мод излучения стоксовой волны с параметрами световода и условиями возбуждения ВКР. Из этого соотношения следует, что степень пространственной когерентности стоксова излучения на выходе волоконного световода определяется числом пространственных мод излучения накачки и усредненным коэффициентом усиления стоксова излучения на длине взаимодействия. Установлено, что существует пороговое значение коэффициента усиления, при котором число пространственно-когерентных мод излучения стоксовой компоненты возрастает неограниченно, и, следовательно, ее пространственная когерентность стремится к нулю. Проведенные оценки числа пространственно-когерентных мод излучения стоксовой компоненты показали, что уже при пороговой мощности возбуждения комбинационного рассеяния значение их таково, что степень пространственной когерентности излучения компоненты соответствует степени когерентности излучения теплового источника. Экспериментально измеренная дисперсия пространственных флуктуаций интенсивности излучения стоксовой компоненты, выделенной с помощью интерференционного фильтра (спектральная ширина пропускания  $\sim 1$  нм при  $\lambda = 620$  нм), оказалась примерно в три раза выше дисперсии флуктуаций интенсивности излучения люминесцентной лампы. Большие значения дисперсии пространственных флуктуаций интенсивности излучения стоксовой компоненты обусловлены, скорее всего, отдельными выбросами интенсивности в мелкомасштабной (неразрешаемой приемником с пространственным разрешением  $\sim 14$  мкм) спекл-структуре, формирующейся в плоскости регистрации вследствие достаточно высокой монохроматичности стоксова излучения.*

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, пространственная когерентность, многомодовый волоконный световод.

## 1. Введение

В процессе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) происходит эффективное нелинейное преобразование в активной среде энергии возбуждающего ее излучения в энергию световых волн на частотах, являющихся комбинациями частоты исходного излучения и характерных частот возбуждений микрочастиц среды, либо их ансамблей [1–3]. Созданные на основе явления ВКР преобразователи формируют излучения с частотами, охватывающими протяженный спектральный диапазон – от УФ до ИК области [4], что открывает перспективы широкого применения таких преобразователей в различных прикладных и научных целях.

Одной из перспективных сред для осуществления ВКР-преобразования излучения является волоконный световод [5]. Отличительные особенности процесса ВКР в световоде состоят в большом диапазоне преобразования частот, высокой эффективности преобразования и достаточно низком пороге его возбуждения. ВКР-преобразо-

ватели на основе волоконного световода могут найти применение в таких областях, как медицина (в качестве источников излучения для получения высококачественных цветных изображений внутриполостных структур) и оптическая связь. ВКР-излучение, применяемое для этих целей, должно удовлетворять особым требованиям к спектральному, энергетическому, а также пространственному характеристикам. Для получения изображений с высоким разрешением в эндоскопии и высокого отношения сигнал/шум в длинных линиях оптической связи с ВКР-усилителями преобразованное излучение должно обладать низкой пространственной когерентностью. В связи с этим актуальным является исследование пространственных корреляционных свойств ВКР-излучения в многомодовом световоде. Изучению закономерностей преобразования пространственно-угловой структуры излучений вынужденных рассеяний, в том числе ВКР, посвящено большое число работ [6–8]. Значительная часть их направлена на анализ условий воспроизведения и обращения волновых фронтов пучков, формируемых при ВКР, и только в сравнительно небольшом числе работ рассматривается пространственная динамика амплитудно-фазовых характеристик волн ВКР [9–13]. Наиболее полно как теоретически, так и экспериментально когерентные характеристики стоксовых волн проанализированы в сжатых газах при небольших длинах взаимодействия [11–13]. ВКР в протяженном многомодовом световолокне имеет свои особенности. Одна из них заключается в воз-

М.А.Кицак. Department of Physics, Boston University, 590 Commonwealth ave, B60, Boston, MA, 02215, USA;  
e-mail: mkitsak@physics.bu.edu

А.И.Кицак. Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68;  
e-mail: a.kitsak@dragon.bas-net.by

Поступила в редакцию 20 апреля 2007 г., после доработки – 5 марта 2008 г.

буждения его излучением накачки, пространственная когерентность которой претерпевает существенные изменения в результате фазовой самомодуляции [14]. Этот факт, несомненно, должен оказывать влияние на спектр угловых частот ВКР-излучения.

Целью данного исследования является разработка статистической модели ВКР в протяженном многомодовом волоконном световоде, оценка степени пространственной когерентности преобразованного излучения, реализуемой в модельных условиях, и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

## 2. Теоретическая модель

Рассмотрим случай стационарного ВКР в многомодовом волоконном световоде в отсутствие истощения волны накачки. Как известно, амплитуда стоксовой компоненты в данных условиях может быть представлена в виде [3]

$$A_s = A_{s0}(r, z=0) \exp \frac{g|A_{p0}(r, z=0)|^2 z}{2}, \quad (1)$$

где  $A_{s0}$  – амплитуда пробной стоксовой волны при  $z=0$ ;  $r$  – радиус-вектор в плоскости, перпендикулярной оси световода;  $g$  – инкремент усиления;  $|A_{p0}|^2$  – интенсивность волны накачки;  $z$  – длина взаимодействия излучения накачки со средой.

Определим корреляционную функцию стоксова излучения

$$B_s(r_1, r_2, z) = \langle A_s(r_1, z) A_s^*(r_2, z) \rangle$$

$$= \left\langle A_{s0} A_{s0}^* \exp \frac{g|A_{p0}(r_1, z=0)|^2 z}{2} \exp \frac{g|A_{p0}(r_2, z=0)|^2 z}{2} \right\rangle \quad (2)$$

и проведем статистическое усреднение в (2), считая, что пространственные амплитудно-фазовые флуктуации пробной стоксовой волны и накачки независимы и подчиняются гауссовой статистике [15]. При этом предположим, что статистика пробного стоксова излучения обусловлена флуктуациями только фазы, а статистика накачки определяется также флуктуациями амплитуды, возникающими вследствие нестационарной самомодуляции фаз отдельных мод оптоволоконна и их взаимодействия. Пользуясь формулой двумерной плотности вероятности распределения амплитуд и фаз входного излучения, соответствующего модели узкополосного нормального шума [16], после необходимых преобразований получим

$$B_s(r) = \frac{B_{s0}(r)}{2\{1 - \varphi[1 + (b_{p0}^2(r) - 1)\varphi]\}}, \quad (3)$$

где  $r = r_1 - r_2$ ;  $B_{s0}(r)$  – функция взаимной когерентности пробного стоксова излучения;  $b_{p0}(r)$  – модуль степени пространственной когерентности излучения накачки;  $\varphi = g\langle I_{p0} \rangle z$  – параметр, характеризующий усредненное усиление стоксова излучения на длине взаимодействия;  $\langle I_{p0} \rangle$  – средняя интенсивность излучения накачки.

Анализ когерентных свойств излучения стоксовых компонент будем осуществлять на основе оценки числа составляющих его пространственно-когерентных мод [17]:

$$N \simeq (\Delta v_s)^2 s. \quad (4)$$

Здесь

$$\Delta v_s = \left( - \frac{\{d^2|b_s(r)|/dr^2\}_{r=0}}{\{|b_s(r)|\}_{r=0}} \right)^{1/2}$$

– ширина углового спектра волн стоксова излучения;  $|b_s(r)| = |B_s(r)/B_s(r=0)|$  – модуль степени пространственной когерентности стоксова излучения;  $s$  – площадь сечения светового пучка на выходе световода.

На практике параметр  $N$  можно определить, измеряя контраст  $C$  спекл-структуры, которая формируется излучением стоксовой компоненты, прошедшей через случайный фазовый экран,

$$C = \frac{\sigma}{\langle I \rangle} = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (5)$$

где  $\langle I \rangle$  – среднее значение интенсивности спекл-картины, а  $\sigma$  – ее среднеквадратичное отклонение.

В связи с малостью числа Френеля активного волновода оптоволоконна можно предположить, что эффективно усиливается только одна мода пробной стоксовой волны [13]. Тогда, используя (3) согласно формуле (4), получим для  $N$  в случае первоначально полностью пространственно-когерентной пробной стоксовой волны следующее выражение:

$$N = \frac{2N_{p0}\varphi^2}{1 - \varphi}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что степень пространственной когерентности излучения стоксовой компоненты на выходе световода определяется числом мод излучения накачки  $N_{p0}$  и величиной усредненного усиления стоксова излучения на длине световода. При  $\varphi = 1$  параметр  $N$  возрастает неограниченно, а пространственная когерентность ВКР-излучения стремится к нулю.

## 3. Эксперимент

Для сравнения результатов теоретических оценок степени пространственной когерентности излучения стоксовой компоненты со значениями, реализуемыми на практике, была собрана экспериментальная установка. Вид оптической схемы установки представлен на рис.1. Излучение второй гармоники ( $\lambda = 532$  нм) импульсного твердотельного лазера 1 с активной средой на основе YAG:Nd, прошедшее набор калиброванных нейтральных фильтров 2, вводилось с помощью микрообъектива 3 в короткий отрезок ( $\sim 1$  м) многомодового световода 4, а затем в основной световод 5 длиной  $\sim 100$  м со ступенчатым профилем распределения показателя преломления и с диаметром сердцевины 60 – 100 мкм. Часть выходящего из световода излучения направлялась с помощью полупрозрачного зеркала 6 через зеркало 7 ( $R = 90\%$  на  $\lambda = 532$  нм) на спектроанализатор 8. Прошедшее через светоделитель излучение попадало на матовую пластинку 9, рассеивалось на ней и затем регистрировалось, пройдя фильтр 10 с максимумом пропускания на  $\lambda = 620$  нм и с шириной полосы пропускания спектра  $\sim 1$  нм, CCD-линейкой 11 с 2048 элементами (пространственное разрешение элементарного приемника  $\sim 14$  мкм).

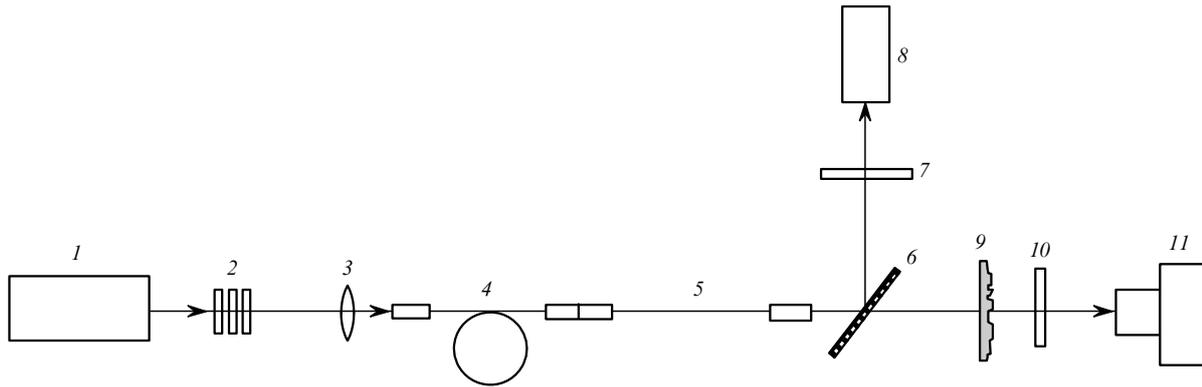


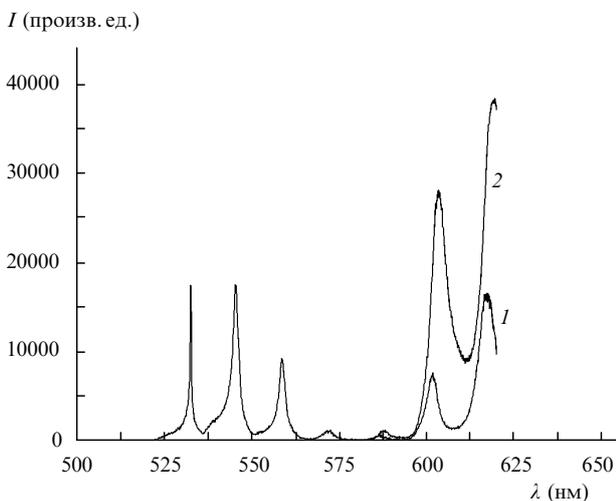
Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки:

1 – импульсный твердотельный лазер; 2 – набор калиброванных нейтральных фильтров; 3 – микробъектив; 4 – отрезок многомодового волоконного световода; 5 – основной световод; 6 – полупрозрачное зеркало; 7 – зеркало с  $R = 90\%$ ; 8 – спектроанализатор; 9 – матовая пластинка; 10 – фильтр; 11 – CCD-линейка.

Короткий отрезок световода, намотанный на катушку, используется в данной схеме для формирования направляемых мод световода и проведения измерений энергии излучения, вводимого в основной световод.

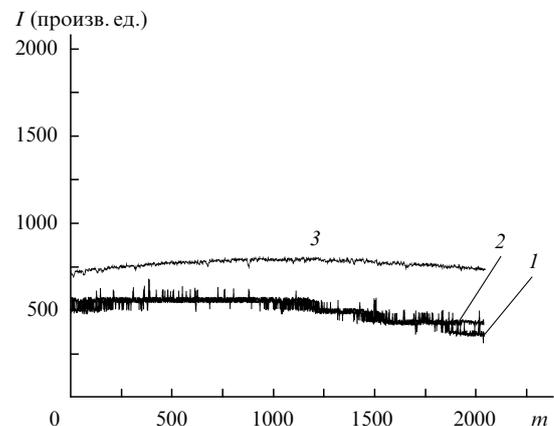
В ходе экспериментов регистрировались энергетические спектры излучения ВКР и распределения интенсивности за матовой пластинкой стоксова излучения на длине волны  $\lambda = 620$  нм при различных значениях мощности излучения накачки и неизменной степени его пространственной когерентности. По данным распределений определялся контраст сформированных спекл-структур и связанное с ним число пространственно-когерентных мод  $N$ .

На рис.2 представлены типичные для кварцевого оптоволокна спектры излучения стоксовых компонент [18], зарегистрированные для двух значений параметра  $M$ , равного отношению мощности излучения накачки к ее пороговому значению (оно равно в эксперименте  $\sim 200$  Вт). Видно, что с ростом мощности накачки реализуется случай каскадного ВКР, когда энергия первых компонент ВКР практически полностью преобразуется в стоксовы компоненты высших порядков. При этом спектральный сдвиг относительно длины волны излучения накачки может достигать  $\sim 100$  нм. Соответствующие данным значениям накачки пространственные распределения интенсивности излучения стоксовой компоненты, зарегистри-


 Рис.2. Спектры ВКР в многомодовом световоде с  $M = 1.9$  (1) и 3.4 (2).

рованные за светофильтром 10, показаны на рис.3 кривыми 1 ( $M = 1.9$ ) и 2 ( $M = 3.9$ ). Регистрация проводилась в плоскости пространства, отдаленной от матовой пластинки на расстояние, которое обеспечивало большое число спеклов при освещении ее подававшимся на вход световода излучением. Кривая 3 относится к распределению интенсивности люминесцентной лампы, зафиксированному CCD-линейкой через диффузно рассеивающую пластинку. Усредненная по нескольким реализациям относительная глубина случайных флуктуаций интенсивности зарегистрированных распределений интенсивности, или так называемый контраст спекл-шумов (5), составляет 0.12, 0.1 и 0.03 соответственно. Наблюдаемые флуктуации интенсивности излучения люминесцентной лампы связаны в основном с неоднородностью энергетической чувствительности отдельных приемников CCD-камеры. Поэтому амплитуду данных флуктуаций можно считать относительной погрешностью измерения используемой линейкой приемников контраста спекл-структур излучения стоксовой компоненты.

Оценки значений параметра  $\rho$  (6), наиболее существенно влияющего на степень пространственной когерентности излучения стоксовых компонент, показывают, что уже при пороговой мощности возбуждения ВКР величина его более чем на порядок превышает значение  $\rho$ , при котором число мод излучения стоксовой компо-


 Рис.3. Пространственные распределения интенсивности стоксовой компоненты излучения ВКР при различных энергиях излучения накачки (1, 2), а также люминесцентной лампы (3);  $m$  – номер пикселя CCD-линейки.

ненты неограниченно возрастает. Отсюда следует, что стоксовы волны, возбуждаемые в многомодовом волоконном световоде шумоподобным полем накачки, мощность которой превышает пороговое значение их генерации, должны заведомо быть пространственно-некогерентными. На практике, как видно из рис.3, пространственные распределения интенсивности излучения стоксовых компонент (кривые 1, 2) несколько отличаются от аналогичного распределения для полихроматического источника света (кривая 3). Достаточно большой вклад в значение дисперсии пространственных флуктуаций интенсивности излучения стоксовой компоненты ВКР вносят отдельные всплески интенсивности, появление которых связано с дифракционно-интерференционными эффектами, проявляющимися при высокой монохроматичности излучения.

#### 4. Выводы

Разработана статистическая модель явления ВКР в многомодовом протяженном световоде. Для случая, когда излучение накачки является узкополосным гауссовым шумом, получено соотношение, связывающее число пространственно-когерентных мод излучения стоксовой компоненты ВКР с параметрами световода и условиями возбуждения ВКР. Проведены экспериментальные исследования энергетических, спектральных и пространственных характеристик излучения ВКР в зависимости от свойств излучения накачки. Сопоставление результатов теоретических оценок степени пространственной когерентности стоксовой волны ВКР и экспериментальных

данных свидетельствует о наличии качественной корреляции между ними.

1. Бломберген Н. *УФН*, **97**, 307 (1969).
2. Гинзбург В.Л. *УФН*, **106**, 151 (1972).
3. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
4. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Михайлов В.Н., Парфенов В.А., Стаселько Д.И. *Оптика и спектроскопия*, **70**, 332 (1991).
5. Stolen R.H., Ippen E.P., Tynes A.R. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 62 (1974).
6. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
7. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
8. Герасимов В.Б., Герасимова С.А., Орлов В.К. *Квантовая электроника*, **4**, 930 (1977).
9. Бетин А.А., Пасманик Г.А. *Квантовая электроника*, №4, 60 (1973).
10. Бетин А.А., Пасманик Г.А., Пискунов Л.В. *Квантовая электроника*, **2**, 2403 (1975).
11. Беспалов В.Г., Духовный А.М., Стаселько Д.И. *Оптика и спектроскопия*, **58**, 1038 (1985).
12. Беспалов В.Г., Стаселько Д.И. *Оптика и спектроскопия*, **61**, 153 (1986).
13. Беспалов В.Г., Лобанов С.А. *Оптика и спектроскопия*, **97**, 99 (2004).
14. Кицак А.И., Кицак М.А. *Квантовая электроника*, **36**, 27 (2006).
15. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин Ф.С. *Введение в статистическую радиофизику и оптику* (М.: Наука, 1981).
16. Мидлтон Д. *Введение в статистическую теорию связи* (М.: Советское радио, 1961).
17. Карелин Н.В., Лазарук А.М. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **40**, 903 (1997).
18. Нестерова З.В., Александров И.В., Мельник И.В., Непорент Б.С., Сатаров Д.К., Сафиуллина С.С. *Письма в ЖТФ*, **6**, 661 (1980).