

# Взаимосвязь порога ВРМБ и ВРМБ-усиления

М.О.Жулидова, О.Е.Наний, И.И.Шихалиев, В.Н.Трещиков

*Проанализирована применимость широко используемой формулы для пороговой мощности вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) из работы [1]. На основе проведенных экспериментальных исследований, численного моделирования и анализа литературы показано, что при использовании определения порога ВРМБ по критерию 1% отраженной мощности необходимо использовать числовой коэффициент 17, а не 21. Также показано, что округленному значению 20 в наибольшей степени удовлетворяет определение порога ВРМБ, в котором доля мощности, отраженной в процессе вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, равна 7%.*

**Ключевые слова:** порог ВРМБ, волоконно-оптическая связь.

## 1. Введение

Наиболее широко используемой характеристикой вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) является пороговая мощность светового излучения, или кратко порог ВРМБ [1]. Однако в действительности у ВРМБ физически определенного порога не существует, стоксова компонента рассеянного излучения фактически является усиленным спонтанным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ). При увеличении мощности светового излучения коэффициент усиления плавно увеличивается.

Тем не менее оказалось практически удобно ввести понятие пороговой мощности излучения  $P_{th}$ , при которой выходная мощность стоксова компонента рассеяния является некоторой измеримой долей  $\mu$  от  $P_{th}$  [2]. Пороговую мощность  $P_{th}$  можно связать с логарифмом порогового усиления  $\ln(G_{th}) = g_{SBS} P_{th} L_{eff} / A_{eff}$  [3], где  $g_{SBS}$  – коэффициент усиления ВРМБ среды (SBS – Stimulated Brillouin Scattering);  $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$  – ее эффективная длина;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $L$  – длина волокна;  $A_{eff}$  – эффективная площадь поперечного сечения области взаимодействия. Физически  $\ln(G_{th})$  равен коэффициенту усиления, обеспечивающего усиление стоксовой компоненты спонтанно рассеянного излучения до выходной мощности, равной  $P_{st} = \mu P_{th}$  [2].

Однако, по сложившейся практике при вычислении порога ВРМБ  $P_{th}$  в волокне, логарифм порогового усиления считается постоянной величиной  $\ln(G_{th}) \approx 21$ , не зависящей от характеристик волокна и излучения накачки.

Более того, это значение  $\ln(G_{th}) = 21$  используется для анализа экспериментальных результатов, несмотря на то, что фактическое значение параметра  $\mu$  варьируется от  $\sim 10^{-4}$  до  $\sim 10^{-2}$  [4–6], а в теории оно получено при  $\mu = 1$  [1]. В некоторых случаях при вычислении  $P_{th}$  в волокне с использованием  $\ln(G_{th}) = 21$  вообще не оговаривается, для какого значения параметра  $\mu$  проводятся расчеты.

## 2. Определения порога ВРМБ

Пороговую мощность ВРМБ  $P_{th}$  обычно определяют, задавая критическое (пороговое) значение коэффициента  $\mu$  преобразования мощности входящего в волокно излучения накачки  $P_p$  в мощность рассеянного стоксова излучения  $P_{st}$  [7] как

$$P_{st} = \mu P_{p,th}. \quad (1)$$

Мощность рассеянного стоксова излучения  $P_{st}$  нелинейно, но монотонно зависит от  $P_p$ , и условие (1) для заданного  $\mu$  выполняется только при одном значении  $P_p \equiv P_{p,th}$ . Очевидно, что значение пороговой мощности ВРМБ зависит от выбранного значения  $\mu$ , причем отношение значений  $P_{th}$ , полученных для  $\mu = 0.01$  и  $0.1$  в работе [8], равно примерно 1 дБ. Наиболее часто при определении порога ВРМБ используют два значения  $\mu$ : 0.01 [9, 10] и 1 [1, 11].

## 3. О неточности общепринятой формулы для порога ВРМБ

Широко используемая простая формула для определения порога ВРМБ была получена в работе 1972 г. [1] при  $\alpha L \gg 1$  (в работе [1]  $\alpha = 20$  дБ/км):

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff} \alpha}{g_{SBS}}.$$

В настоящее время данную формулу часто используют в следующем виде:

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff}}{g_{SBS} L_{eff}}. \quad (2)$$

**М.О.Жулидова.** Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1; e-mail: zhulidova@t8.ru

**О.Е.Наний.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2; ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1

**И.И.Шихалиев, В.Н.Трещиков.** ООО «Т8 НТЦ», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1

Поступила в редакцию 28 октября 2022 г., после доработки – 15 февраля 2023 г.

Числовой коэффициент приблизительно равен натуральному логарифму усиления  $\ln(G_{th})$ , необходимого для увеличения мощности спонтанного рассеяния до уровня входной мощности накачки (в приближении неистощимой накачки). Его конкретное значение  $\ln(G_{th}) = 21$  получено в работе [1] для определенного типа волокна, которое сильно отличается от современных телекоммуникационных волокон и волокон, используемых в волоконных лазерах и усилителях.

Фактически же предположение об отсутствии истощения накачки нарушается при значительно меньших значениях  $\mu$ . Поэтому определение пороговой мощности через значение  $\mu = 1$  имеет существенные недостатки: оно экспериментально не реализуемо и противоречит закону сохранения энергии. Тем не менее значение числового коэффициента  $\ln(G_{th}) = 21$  используется для анализа экспериментальных результатов, несмотря на то, что фактическое значение параметра  $\mu$  варьируется в широких пределах [4–6].

Большинством экспериментаторов при измерении порога ВРМБ используется значение  $\mu = 0.01$ , т. н. критерий 1% [9, 10]. Он физически вполне обоснован, т. к. характеризует переход от режима заданного поля накачки (в отсутствие истощения накачки) к режиму истощения накачки при ВРМБ. Несомненно, что целесообразно утвердить этот критерий в качестве экспериментального условия фиксации порога ВРМБ. При этом нужно скорректировать числовой коэффициент, входящий в формулу (2), в соответствии с результатами экспериментов и численного моделирования.

#### 4. Об уточнении формулы для порога ВРМБ (экспериментальный критерий 1%)

С целью уточнения формулы для порога ВРМБ нами было проведено экспериментальное исследование и численное моделирование характеристик ВРМБ в нескольких типах современных телекоммуникационных волокон.

На рис.1 изображена схема эксперимента по исследованию влияния ВРМБ на выходную мощность линии. Источник накачки – лазер (ITLA) с рабочей длиной волны 1530 нм и шириной полосы излучения 300 кГц. При помощи переменного аттенюатора (VOA) и эрбиевого усилителя (EDFA) мощность накачки варьировалась в широком диапазоне от 1 до 400 мВт (от 0 до 26 дБм). Выход усилителя (EDFA) через разъем (LC/APC) соединялся с делителем (SPLITTER-2/2), с помощью которого 1% мощности направлялся на измеритель мощности (PM1) для контроля вводимой в тестируемое волокно (FIBER UNDER TEST) мощности. Мощность, выходящая из тестируемого волокна, измерялась вторым измерителем мощности (PM2). Часть мощности излучения

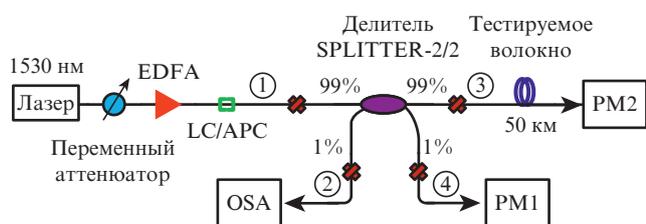


Рис.1. Схема установки для экспериментального исследования порога ВРМБ в разных волокнах.

(1%), рассеянного во встречном направлении, отводилась делителем на оптический анализатор спектра (OSA). Перед началом измерений проводилась калибровка делителя с учетом потерь на разьеме LC/APC. Измерения проводились с четырьмя типами телекоммуникационных оптических волокон: волокно, регламентируемое стандартом G.652 международного телекоммуникационного союза (ITU-T); волокно с ультранизкими потерями стандарта G.654; волокно с малой положительной дисперсией стандарта G.655(+) и волокно с малой отрицательной дисперсией стандарта G.655(-). Длина всех тестируемых волокон – 50 км.

Экспериментальные зависимости мощности, рассеянной в обратном направлении, от мощности, вводимой в тестируемые волокна, приведены на рис.2. На каждой кривой отмечено значение пороговой мощности ВРМБ по критерию 1% ( $\mu = 0.01$ ). Для волокон ITU-T G.652, G.654, G.655(+) и G.655(-) экспериментальные пороги ВРМБ равны 9.5, 7.0, 6 и 6.2 дБм соответственно.

Для оценки порога ВРМБ использовалась измененная формула (2), в которую введен коэффициент  $\gamma = 1/2$ , учитывающий деполяризацию света в волокне из-за случайного двулучепреломления [12, 13], и значения  $\ln(G_{th})$ , равные не только 21, но и 17, и 16:

$$P_{th} = \ln(G_{th}) \frac{A_{eff}}{\gamma g_{SBS} L_{eff}} \quad (3)$$

С учетом конечной ширины спектра накачки  $\Delta\nu_p$  коэффициент усиления ВРМБ среды  $g_{SBS}$  определяется следующим выражением [11]:

$$g_{SBS} = \frac{2\pi n_{eff}^7 p_{12}^2}{c \lambda_p^2 \rho_0 V_{ac} \Delta\nu_{SBS}} \frac{\Delta\nu_{SBS}}{\Delta\nu_{SBS} \otimes \Delta\nu_p} \quad (4)$$

где  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления;  $\lambda_p$  – длина волны накачки;  $p_{12}$  – упругооптический коэффициент Поккельса ( $\sim 0.25$ ) [14, 15];  $c$  – скорость света;  $\rho_0$  – плотность кварцевого стекла (2.200–2.206 г/см<sup>3</sup>);  $\Delta\nu_{SBS}$  – ширина спектра на полувьсоте. Символ  $\otimes$  в формуле (4) означает операцию свертки спектров ВРМБ и накачки. Для гауссовых профилей результат свертки  $\Delta\nu_{SBS} \otimes \Delta\nu_p = \sqrt{\Delta\nu_{SBS}^2 + \Delta\nu_p^2}$ , а для лоренцевских профилей  $\Delta\nu_{SBS} \otimes \Delta\nu_p = \Delta\nu_{SBS} + \Delta\nu_p$ . Скорость звука  $V_{ac} = \sqrt{E/\rho_0}$  [16] зависит от модуля Юнга ( $E = 7\text{--}7.2$  ГПа) и плотности кварцевого стекла.

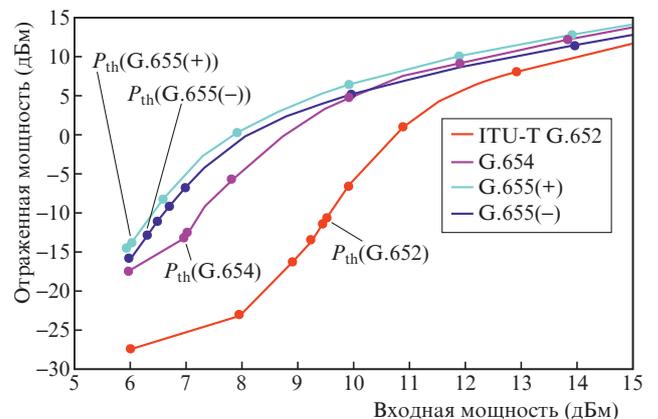


Рис.2. Зависимости рассеянной назад мощности от мощности, вводимой в тестируемые волокна.

В пределе узкополосной накачки  $\Delta\nu_p \ll \Delta\nu_{\text{SBS}}$  и в приближении плоских волн формула (4) упрощается и принимает следующий вид [7]:

$$g_{\text{SBS}} \approx \frac{2\pi n_{\text{eff}}^2 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho_0 V_{\text{ac}}} \frac{1}{\Delta\nu_{\text{SBS}}} = \frac{\zeta_{\text{SBS}}}{\Delta\nu_{\text{SBS}}}, \quad (5)$$

где

$$\zeta_{\text{SBS}} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}^2 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho_0 V_{\text{ac}}}.$$

Это приближение справедливо, поскольку  $\Delta\nu_{\text{SBS}}$  для современных телекоммуникационных волокон имеет величину от 30 до 50 МГц [7].

Точные значения  $\Delta\nu_{\text{SBS}}$  для каждого типа волокна определялись из условия наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических зависимостей мощностей излучения, выходящего из тестируемого волокна, от вводимой в волокно мощности накачки. Экспериментальные зависимости были получены на установке, приведенной на рис.1 и описанной выше. Теоретические зависимости получены путем численного решения следующей системы связанных уравнений для нормированных интенсивностей накачки  $P = I_p/I_{p,0}$  и стоксовой компоненты рассеянного излучения  $S = I_{st}/I_{p,0}$  [8]:

$$\begin{cases} \frac{dP}{d\xi} = -\sigma SP - \beta P, \\ -\frac{dS}{d\xi} = \sigma SP - \beta S, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\sigma = LI_{p,0}g_{\text{SBS}}\gamma$ ;  $I_{p,0}$  – интенсивность накачки в начале волокна;  $\beta = \alpha L$ ; т.к.  $\omega_p \simeq \omega_{st}$ , то можно принять  $\alpha_p \simeq \alpha_{st} = \alpha$ ;  $\xi = z/L$ ;  $z$  – координата вдоль волокна. Краевые условия были заданы следующим образом:  $P(0) = 1$ ,  $S(1) = f(\beta, \sigma)$ , где  $f(\beta, \sigma)$  определяется с помощью метода эквивалентного входного шума с использованием решения уравнения для числа фотонов [7]. В результате решения системы уравнений (6) было получено распределение мощностей накачки и стоксовой компоненты вдоль волокна и рассчитана зависимость выходной мощности накачки от входной. На рис.3 представлены теоретические зависимости выходной мощности узкополосной накачки от входной мощности для четырех типов волокон (ITU-T G.652, G.654, G.655(+) и G.655(-)) (сплошные кривые) и соответствующие им экспериментальные зависимости (точки с погрешностью измерения).

С использованием вычисленного значения ширины полосы усиления и значений других параметров для расчета  $\zeta_{\text{SBS}}$ , взятых из спецификаций на соответствующие волокна, были рассчитаны теоретические значения пороговых мощностей ВРМБ по формуле (3). В табл.1 приве-

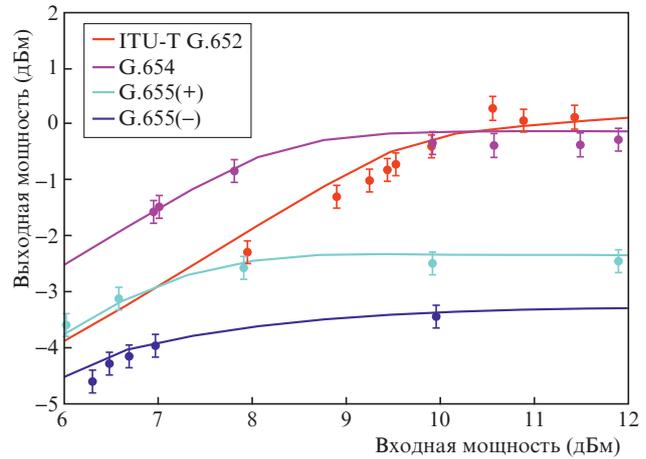


Рис.3. Теоретические (сплошные кривые) и экспериментальные (точки с погрешностью измерения) зависимости выходной мощности узкополосной накачки от входной мощности для четырех типов волокон.

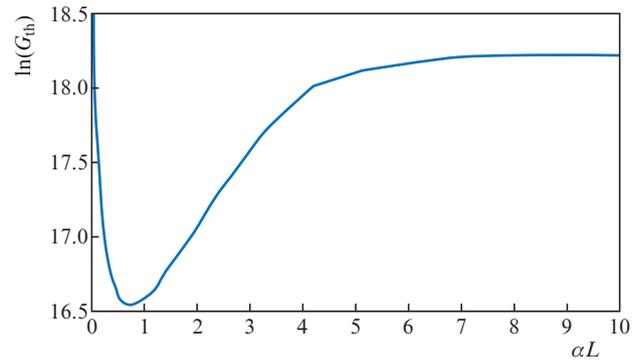


Рис.4. Теоретическая зависимость логарифма порогового усиления  $\ln(G_{\text{th}})$  от  $\alpha L$  по порогу 1%.

дены теоретические и экспериментальные значения пороговых мощностей ВРМБ для каждого из четырех типов волокон. В последних двух столбцах табл.1 приведены теоретические пороги ВРМБ, рассчитанные с уменьшенным значением логарифма порогового усиления  $\ln(G_{\text{th}}) = 17$  и 16.

Таким образом, проведенные нами экспериментальные и теоретические исследования показали, что формулу (3) можно использовать с численным коэффициентом 17, а не 21, и только для приближенной оценки порога ВРМБ, определенного по 1%-ному критерию ( $\mu = 0.01$ ). Отметим, что значение логарифма порогового усиления также зависит от величины  $\alpha L$  [7]. На рис.4 приведена теоретическая зависимость  $\ln(G_{\text{th}})$  от  $\alpha L$ , полученная с помощью решения системы (6) для рассматриваемого волокна ITU-T G.655(-).

Табл.1. Теоретические и экспериментальные значения порога ВРМБ.

Тип волокна	Параметры								
	$\alpha$ (дБ/км)	$\alpha$ (км <sup>-1</sup> )	$A_{\text{eff}}$ (мкм <sup>2</sup> )	$\zeta_{\text{SBS}}$ (см/Дж)	$\Delta\nu_{\text{SBS}}$ (МГц)	$P_{\text{th}}^{\text{exp}}$ (дБм)	$P_{\text{th}}^{\text{theor}}$ ( $\ln(G_{\text{th}}) = 21$ ) (дБм)	$P_{\text{th}}^{\text{theor}}$ ( $\ln(G_{\text{th}}) = 17$ ) (дБм)	$P_{\text{th}}^{\text{theor}}$ ( $\ln(G_{\text{th}}) = 16$ ) (дБм)
ITU-T G.652	0.18	0.04	93	0.083	46	9.5	10.3	9.3	9.1
ITU-T G.654	0.16	0.04	90	0.080	33	7.0	8.4	7.5	7.2
ITU-T G.655(+)	0.19	0.04	68	0.084	33	6.0	7.3	6.4	6.2
ITU-T G.655(-)	0.20	0.05	58	0.084	35	6.2	7.2	6.3	6.0

Табл.2. Экспериментальные значения коэффициента усиления ВРМБ среды  $g_{SBS}$  из работы [17] и рассчитанные по формуле (7) с варьируемым значением  $\ln(G_{th})$  значения  $g_{SBS}$  из пороговых мощностей ВРМБ ( $\mu = 0.01$ ).

№ волокна	$g_{SBS}^{theor}$ по формуле (7) (пм/Вт)					$g_{SBS}^{exp}$ (пм/Вт)
	$\ln(G_{th}) = 21$	$\ln(G_{th}) = 20$	$\ln(G_{th}) = 18$	$\ln(G_{th}) = 17$	$\ln(G_{th}) = 16$	
1	16	15.3	13.7	13.0	12.2	13.6
2	9.4	9.0	8.1	7.6	7.2	9.6
3	9.4	9.0	8.1	7.6	7.2	7.8
4	15.9	15.2	13.6	12.9	12.1	13.8
5	7.5	7.2	6.4	6.1	5.7	5.6
6	8.8	8.4	7.5	7.1	6.7	7.3
7	5.8	5.5	5.0	4.7	4.4	4.4

Проанализируем также результаты недавних экспериментов [17] по определению порога ВРМБ в волокнах другого класса. В этой работе приведены результаты прямого измерения коэффициента усиления ВРМБ среды  $g_{SBS}$  и экспериментально измеренный порог ВРМБ. Авторы также использовали следующую формулу с численным коэффициентом  $\ln(G_{th}) = 21$  для расчета пороговой мощности ВРМБ:

$$g_{SBS} = \frac{\ln(G_{th})A_{eff}}{LP_{th}}. \quad (7)$$

В табл.2 приведены экспериментальные результаты измерения коэффициента усиления ВРМБ среды  $g_{SBS}$  из работы [17] для семи типов волокон. Также в табл. 2 представлены значения  $g_{SBS}$ , рассчитанные по формуле (7) с варьируемым значением  $\ln(G_{th})$  и с использованием экспериментальных значений пороговых мощностей ВРМБ по критерию 1% [17].

Если отбросить значения, полученные для волокна № 2, то в среднем наиболее близкие результаты для прямого измерения  $g_{SBS}$  и пересчета из измеренного значения порога ВРМБ по формуле (7) получаются для численного коэффициента  $\ln(G_{th})$ , лежащего между значениями 18 и 17. Из целочисленных значений наибольшую среднюю точность формула (7) дает при значении логарифма порогового усиления  $\ln(G_{th}) = 17$ .

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования и численное моделирование, а также анализ литературы показывают, что при использовании «экспериментального» определения порога ВРМБ по критерию 1% отраженной мощности необходимо использовать числовой коэффициент  $\ln(G_{th}) = 17$ , а не 21!

Отметим, что ранее в ряде работ предложение об использовании численного коэффициента  $\ln(G_{th})$ , меньшего устоявшегося значения 21, а именно 17 или 18, уже высказывалось [8, 9, 18]. Однако до сих пор используется коэффициент, равный 21.

## 5. Приближенная формула для оценки порога ВРМБ и критерий порога

Приведенное выше рассмотрение показывает, что для повышения точности формулы (3), являющейся обобщением формулы (2) из [1], должен быть однозначно дан экспериментально реализуемый критерий порога ВРМБ, например, по доле  $\mu$  рассеянной назад мощности, и выбрано для такого определения наиболее точное значение численного коэффициента  $\ln(G_{th})$ . Без указания критерия

пороговой мощности ВРМБ определение численного коэффициента  $\ln(G_{th})$  невозможно, а использование устоявшегося коэффициента 21 не целесообразно.

Существует множество различных определений порога ВРМБ в оптических волокнах, не только через коэффициент преобразования  $\mu = P_{st}/P_{p,th}$  [19, 20]. Можно, например, определить порог ВРМБ на основе изменения наклона выходной мощности из-за истощения накачки или максимального изменения наклона (второй производной) кривой отраженной мощности [21]. Однако в эксперименте наиболее удобно определять порог мощности ВРМБ как входную мощность накачки  $P_p$ , при которой рассеянная назад мощность (мощность рассеянного стоксового излучения  $P_{st}$ ) равна некоторой доле  $\mu$  накачки.

Для согласования формулы (3) и экспериментальной пороговой мощности ВРМБ необходимо, во-первых, дать определение порога ВРМБ, во-вторых, определить значение числового коэффициента  $\ln(G_{th})$ . Выше было показано, что значение  $\ln(G_{th}) = 17$  дает наиболее точный результат при  $\mu = 0.01$  (критерий 1%). Однако, если использовать формулу (3) как оценку для нахождения границы между условиями, при которых можно пренебречь процессами ВРМБ, и условиями, при которых процессами ВРМБ пренебрегать нельзя, то целесообразно использовать округленное до 20 значение числового коэффициента  $\ln(G_{th})$ . Именно такой коэффициент был предложен во введении самим автором основополагающей работы [1].

В результате предлагается следующая формула, оценивающая величину порога ВРМБ по порядку величины:

$$P_{th} = 20 \frac{A_{eff}}{g_{SBS} L_{eff}}. \quad (8)$$

Формуле (8) с коэффициентом  $\ln(G_{th}) = 20$  целесообразно поставить в соответствие экспериментальный критерий пороговой мощности ВРМБ  $\mu$  (долю преобразования мощности накачки в мощность рассеянного стоксова излучения). На рис.5 приведены экспериментальные зависимости  $\mu$  от входной мощности в линию для разных волокон (закрашенными точками отмечены экспериментальные значения  $\mu$  для порогов ВРМБ, рассчитанных по формуле (8), незакрашенными точками – значения  $\mu$ , полученные из численного моделирования). Если отбросить сильно отклоненную точку (экспериментальное значение  $\mu$  для волокна ITU-T G.652), то с помощью метода наименьших квадратов можно найти значение  $\mu$ , при котором наблюдается наилучшее совпадение результатов численного моделирования и экспериментальных измерений с формулой (8). Проведенные нами

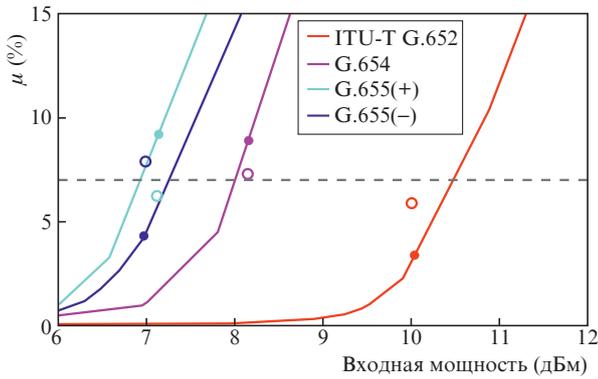


Рис.5. Экспериментальная зависимость  $\mu$  от входной мощности в линию для разных волокон (закрашенными точками отмечены экспериментальные  $\mu$  для пороговых мощностей ВРМБ, рассчитанных по формуле (8), незакрашенными точками –  $\mu$ , полученные из численного моделирования. Штриховой кривой соответствует значение  $\mu = 7\%$ , найденное методом наименьших квадратов).

численное моделирование и эксперимент показали, что наилучшее совпадение формулы с экспериментом дает значение  $\mu = 0.07$  (значение отмечено на рис.5 штриховой кривой).

## 6. Заключение

Формула (2) из работы [1] с коэффициентом  $\ln(G_{th}) = 21$  теоретически получена при использовании двух условий: первое – отсутствует истощение накачки, второе – мощность рассеянного стока излучения равна мощности входящего в волокно излучения накачки. Эти два условия принципиально не выполняются одновременно, а второе условие нарушает закон сохранения энергии. Иными словами, прямое экспериментальное подтверждение данной формулы невозможно.

В нашей работе показано, что для сравнения с экспериментом формулу (2) необходимо модифицировать (см. формулу (3)), а значение числового коэффициента  $\ln(G_{th})$  согласовать с определением порога ВРМБ. Для наиболее широко применяемого экспериментаторами определения порога ВРМБ как значения входной мощности накачки, при которой 1% ее мощности преобразуется в мощность рассеянного стока излучения, эмпириче-

ски получено и предлагается к использованию значение  $\ln(G_{th}) = 17$ .

В то же время, округленному значению  $\ln(G_{th}) = 20$  в наибольшей степени удовлетворяет определение порога ВРМБ, в котором доля мощности, отраженной в процессе вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, равна 7% ( $\mu = 0.07$ ).

1. Smith R.G. *Appl. Opt.*, **11**, 2489 (1972).
2. Boyd R.W., Rzaewski K., Narum P. *Phys. Rev. A*, **42**, 5514 (1990).
3. Zel'dovich B.Y., Pilipetsky N.F., Shkunov V.V. *Principles of Phase Conjugation* (Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1985).
4. Mao X.P., Tkach R.W., Chraplyvy A.R., Jopson R.M., Derosier R.M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4**, 66 (1992).
5. Yeniay A., Delavaux J.-M., Toulouse J. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 1425 (2002).
6. Jenkins R.B., Sova R.M., Joseph R.I. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 763 (2007).
7. Kobyakov A., Sauer M., Chowdhur D. *Advances Opt. Photonics*, **2**, 1 (2010).
8. Bayvel P., Radmore P.M. *Electron. Lett.*, **26**, 434 (1990).
9. Esman R.D., Williams K.J., in *Optical Fiber Communication Conf.* (Optica Publishing Group, 1996, Vol. 2 of 1996 OSA Technical Digest Series, paper ThF5).
10. Beugnot J.C., Sylvestre T., Alasia D., Maillotte H., Laude V., Monteville A., Provino L., Traynor N., Mafang S.F., Thévenaz L. *Opt. Express*, **15**, 15517 (2007).
11. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics, 3rd ed* (San Diego: Academic Press, 2001).
12. Cotter D. *J. Opt. Commun.*, **4**, 10 (1983).
13. Ma L., Tsujikawa K., Hanzawa N., Yamamoto F., in *Optical Fiber Communication Conf./National Fiber Optic Engineers Conf. 2013* (Optica Publishing Group, 2013, OSA Technical Digest (online), paper JTh2A.09).
14. Lagakos N., Bucaro J.A., Hughes R. *Appl. Opt.*, **19**, 3668 (1980).
15. Bertholds A., Dandliker R. *J. Lightwave Technol.*, **6**, 17 (1988).
16. Листвин А.В., Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон* (М.: ЛЕСАРпт, 2005).
17. Худяков М.М., Лихачев М.Е., Бубнов М.М., Липатов Д.С., Гурьянов А.Н., Темяно В., Нагел Дж., Пейгамбарян Н. *Квантовая электроника*, **46**, 468 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 468 (2016)].
18. Narum P., Skeldon M., Boyd R.W. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 2161 (1986).
19. Cotter D. *J. Opt. Commun.*, **4**, 10 (1983).
20. Gardner W.B. *Appendix on nonlinearities for G.650* (ITU Document COM 15-273-E, ITU, 1996).
21. Ruffin A.B., in *Techn. Dig. Symp. Optical Fiber Measurements 2004* (NIST, 2004, p. 23).