

## Теоретическое исследование эволюции энергии в диссипативных волоконных лазерах с кольцевым и линейным резонатором.

Яруткина Ирина Александровна, к.ф.-м.н., инженер ЛМУФ ММФ НГУ,  
Штырина Ольга Владимировна, к.ф.-м.н., научный сотрудник ЛМУФ ММФ НГУ,  
Скидин Антон Сергеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник ЛМУФ ММФ НГУ,  
Федорук Михаил Петрович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., ректор НГУ.

В настоящий момент волоконные лазеры используются во многих промышленных и исследовательских приложениях. Для полноценного аналитического описания эволюции импульса в современных волоконных лазерах необходимо принимать во внимание наличие ряда физических эффектов. В частности, к ним относятся насыщенное усиление, ненасыщенные потери, дисперсионные и нелинейные эффекты. Баланс между усилением и потерями в лазерном резонаторе определяет энергию оптического солитона; с другой стороны, дисперсия и нелинейность определяют наличие генерации импульса и его форму. Ввиду этого при анализе динамики энергии в резонаторе можно пренебречь керровской нелинейностью показателя преломления волокна и дисперсией, несмотря на то, что в целом данные эффекты необходимо учитывать при комплексном изучении таких лазерных систем.

В данной работе проводится теоретический анализ волоконных лазеров с линейным и кольцевым резонаторами, основанный на теоретических закономерностях эволюции энергии внутри резонатора и на математическом моделировании данных лазерных систем.

Пусть  $E_0$  – энергия на входе в активное волокно, а  $E(L_A) = \varphi_0 E_0$  – энергия на выходе из активного волокна, где  $L_A$  – длина активного волокна. Введем следующие обозначения:  $R$  – отношение энергии, остающейся в резонаторе, к выводимой из резонатора энергии,  $R_{PF}$  – и  $R_{SA}$  – отношение выходной энергии ко входной энергии для пассивного волокна и насыщающегося поглотителя соответственно,  $L_P$  – длина пассивного волокна,  $R_{dB}$  – потери на выходе из резонатора в дБ,  $R_{SA,dB}$  – потери на насыщающемся поглотителе, выраженные в дБ,  $\alpha_A$ ,  $\alpha_P$  – потери в активном и пассивном волокнах соответственно, измеряемые в дБ/м,  $g_A$  – коэффициент усиления, измеряемый в дБ/м. Введём также  $s = \alpha_A / g_A$  – отношение потерь в активном волокне к коэффициенту усиления,  $S = (\alpha_A L_A + \alpha_P L_P + R_{SA,dB} + R_{dB}) / g_A L_A$  – отношение полных потерь к полному усилению,  $E_{sat}$  – энергия насыщения,  $G = g_A L_A * 0.1 * \ln(10)$ .

После некоторых преобразований получаем выражение для  $E_0$  и  $E_{out}$ :

$$E_0 = \frac{1-s}{s} E_{sat} \exp[0.5G(s-S)] \frac{\sinh[0.5G(1-S)s]}{\sinh[0.5G(1-s)S]}, E_{out} = E_0 \frac{1-R}{R}$$

Для подтверждения корректности теоретических положений были проведены численные эксперименты. Был рассмотрен волоконный лазер с кольцевым резонатором и всюду нормальной дисперсией, состоящий из активного и пассивного волокна, насыщающегося поглотителя и ответвителя. Математическое моделирование прохождения импульса в активном и пассивном волокнах основано на нелинейном уравнении Шредингера, которое было решено с использованием симметричного варианта метода Фурье расщепления по физическим процессам. При моделировании активного волокна были учтены насыщение усиления и спектральную фильтрацию.

На рисунке 1 показано сравнение результатов применения формул с результатами математического моделирования; на графике представлена зависимость энергии на выходе из резонатора от потерь на ответвителе для различных значений коэффициента усиления. Точками показаны результаты вычислений, сплошными линиями – результаты, полученные теоретически. При этом, поскольку реальные потери на насыщающемся поглотителе ограничены глубиной модуляции абсорбера  $q_0 = 0.1$ , но точная их величина

неизвестна, теоретические результаты были получены в предположении, что потери на абсорбере равны 5%. Как видно из графика, удалось достигнуть хорошего соответствия теоретических и численных результатов, при этом видимое отклонение можно объяснить отклонением реальных потерь на насыщающемся поглотителе от теоретических допущений.

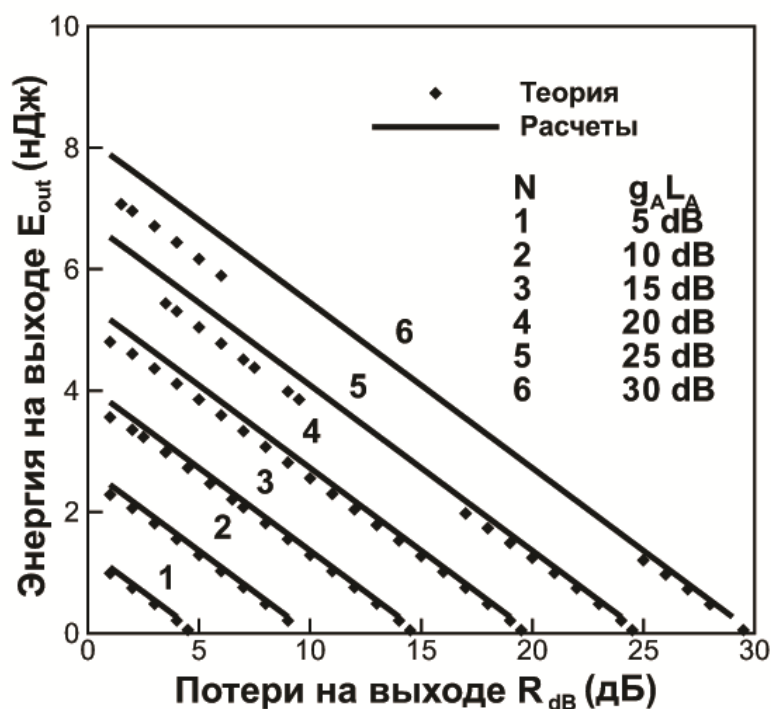


Рис. 1. Зависимость энергии на выходе из резонатора от потерь на ответвителе при различных значениях коэффициента усиления в кольцевом резонаторе. Сплошными линиями показаны теоретические результаты, точками – численные результаты.

Описанный подход может быть адаптирован к другим типам резонаторов, в частности, к резонаторам линейной структуры.

Рассмотрим применение теории для линейных резонаторов на примере тулий-гольмиевого волоконного лазера с дисперсионным управлением. Лазер состоял из компенсатора дисперсии, активного и пассивного волокон, а также насыщающегося поглотителя.

Для проверки данной формулы было проведено сравнение результатов, полученных путем применения описанных выше формул, с результатами математического моделирования описанного выше тулий-гольмиевого волоконного лазера. Рисунок 2 иллюстрирует сравнение теоретических результатов с результатами математического моделирования. На графике показана зависимость энергии на выходе из резонатора от длины резонатора, менявшейся за счёт увеличения длины пассивного волокна. Сплошной линией показаны результаты численных экспериментов, пунктирные линии иллюстрируют теоретически предсказанные значения энергии. При этом верхняя пунктирная линия соответствует случаю без потерь на насыщающемся поглотителе, а нижняя – потерям, равным глубине модуляции  $q_0$ .

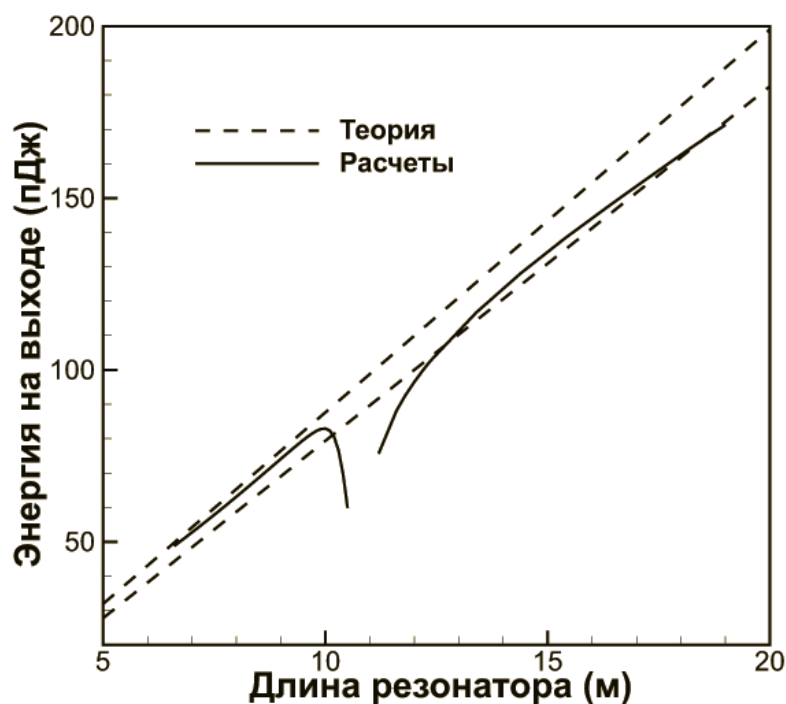


Рис. 2. Зависимость энергии на выходе из резонатора от длины резонатора в тулий-гольмиевом волоконном лазере. Сплошные линии иллюстрируют результаты математического моделирования, пунктирные – теоретически предсказанные результаты при нулевых и десятипроцентных потерях на насыщающемся поглотителе.

При этом стоит отметить, что, как и в случае кольцевого резонатора, не во всех случаях теоретические формулы могут быть альтернативой численному эксперименту, поскольку вблизи нулевой дисперсии наблюдается отсутствие устойчивой генерации, а также выход значений энергии из теоретически предсказанного диапазона ввиду нарушения применимости модели равномерного усиления, используемой для получения теоретических результатов.

Таким образом, в ходе исследований был проведён анализ теоретических результатов для эволюции энергии в кольцевом и линейном резонаторах диссипативных солитонных волоконных лазеров. Было установлено хорошее согласие между результатами математического моделирования и теоретически предсказанными результатами.

Список публикаций по теме работы:

1. I.A. Yarutkina, O.V. Shtyrina, A. Skidin, and M.P. Fedoruk. Theoretical Study of Energy Evolution in Ring Cavity Fiber Lasers // Optics Communications.- 2015.- V. 342.- P. 26-29.
2. O.V. Shtyrina, I.A. Yarutkina, A. Skidin, M.P. Fedoruk, and S.K. Turitsyn. Impact of the Order of Cavity Elements in All-Normal Dispersion Ring Fiber Lasers // IEEE Photonics Journal.- 2015. - V. 7. – No. 2.- P. 1501207.
3. А.С. Скидин, И.А. Яруткина, О.В. Штырина, М.П. Федорук. Теоретический анализ эволюции энергии в диссипативных волоконных лазерах // Автометрия, Т. 51(6), С. 52-57, 2015.