

## Теоретическая оптимизация свойств импульса в длинных волоконных лазерах.

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

**Аннотация:** В ходе исследования было изучено сильночирпованное аналитическое решение уравнение Гинзбурга-Ландау с учетом насыщения усиления. На основе данного анализа был предложен аналитический метод оценки области устойчивой одноимпульсной генерации в длинном волоконном лазере.

Волоконные лазеры с длинным резонатором и полностью нормальной дисперсией способны генерировать диссипативные солитоны, обладающие гораздо большей энергией по сравнению с энергией классических солитонов. В данной работе авторами была проведена теоретическая оптимизация длинного диссипативного солитонного волоконного лазера с целью нахождения оптимальных параметров резонатора, при которых возможно максимизировать энергию выходного импульса. Оптимизация была основана на аналитическом методе, предложенном в данном исследовании и позволяющем определить область устойчивой одноимпульсной генерации в многомерном пространстве параметров лазерного резонатора.

Обозначим за  $z$  ( $0 < z < l$ ) пространственную переменную, нормированную на длину резонатора  $L$ . С целью описания внутрирезонаторной динамики импульса рассмотрим распределенную модель, основанную на уравнении типа Гинзбурга-Ландау с учетом насыщения усиления и пассивной синхронизации мод:

$$\frac{\partial}{\partial z} A(z, t) = i \left( \frac{\beta_2 L}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \gamma L |A|^2 \right) A + \left( \frac{g}{2(1 + E/E_{sat})} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\kappa}{1 + |A|^2 / P_{SAM}} \right) A \quad (1)$$

Здесь  $\beta_2$  – дисперсия второго порядка;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности;  $E = \int |A|^2 dt$  – энергия импульса;  $E_{sat}$  – энергия насыщения;  $g$  – коэффициент усиления малого сигнала;  $\alpha$  – полные внутрирезонаторные потери, включающие в себя потери внутри пассивного ( $\alpha_P$ ) и активного волокна ( $\alpha_A$ ), потери на соединениях устройств резонатора ( $l$ ), а также потери на выходе из резонатора ( $\ln R$ ) ( $\alpha = \alpha_A + \alpha_P l + \ln R$ );  $\kappa$  – глубина модуляции;  $P_{SAM}$  – мощность насыщения. Последний член уравнения описывает действие быстрого насыщающегося поглотителя, выступающего в роли устройства пассивной синхронизации мод.

В ходе проведения данного исследования нами разработан новый аналитический метод изучения области стабильной генерации диссипативного солитона в волоконном лазере с длинным резонатором. Метод основан на анализе аналитического сильночирпованного решения нелинейного уравнения типа Гинзбурга-Ландау (1) с учетом насыщения усиления и пассивной синхронизации мод. Аналитическое решение было получено с использованием метода, предложенного в работе [Podivilov E., Kalashnikov V.L., JETP. Lett., v. 82, p. 467-471, 2005]. В результате теоретического анализа сильночирпованного решения можно получить следующее выражение для энергии импульса:

$$E = 3LP_{SAM} \sqrt{3\beta_2\gamma P_{SAM} \left( \frac{\kappa}{\sigma(E)} - 1 \right) \frac{\kappa}{\sigma^2(E)}}, \quad \sigma(E) = \frac{g}{1 + E/E_{sat}} - \alpha \quad (2)$$

С целью анализа устойчивости аналитического решения уравнение (1) было решено численно. В качестве примера для моделирования использовался диссипативный солитонный волоконный лазер с кольцевым резонатором с параметрами из работы [Yarutkina I.A., et al, Opt. Express, v. 21, pp. 12942-12950, 2013]. Полученные в ходе математического моделирования результаты были сравнены с аналитическим решением. В качестве начального распределения был использован гауссов импульс. Рис.1 показывает сравнение результатов математического моделирования с аналитическим решением для случая без спектральной фильтрации. Математическое моделирование показало устойчивость отрицательной ветки аналитического решения в случае насыщенного усиления. В ходе исследований показано, что даже при отсутствии спектральной фильтрации можно получить устойчивые одноимпульсные режимы генерации.

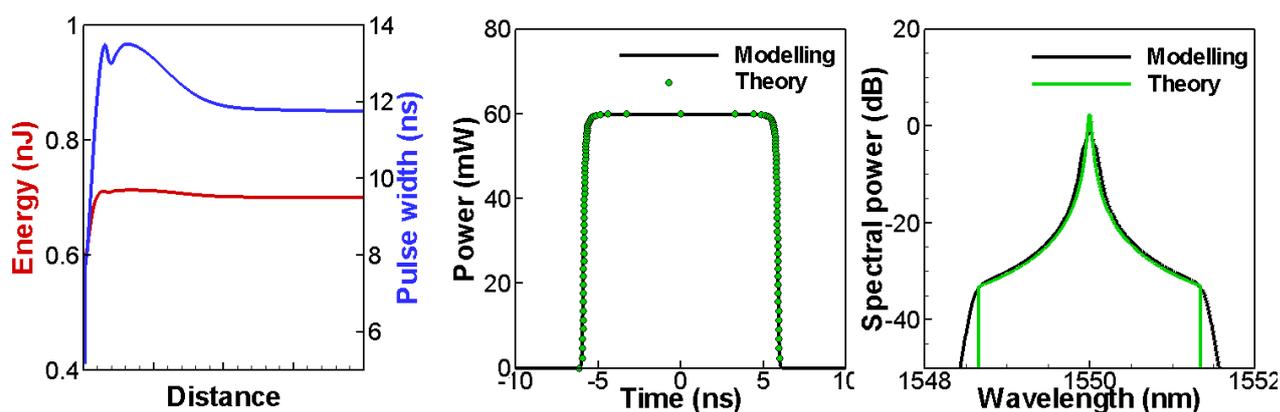


Рис. 1. а) Динамика установления выходной энергии и ширины импульса; б) и с) иллюстрируют форму импульса и его спектра для устойчивого режима генерации. Черные линии соответствуют результатам математического моделирования, зеленые – аналитическому решению.

Проанализировав выражение (2), можно показать, что данное уравнение имеет единственное решение в области стабильной одноимпульсной генерации. Данная модель применима в случае, когда энергия импульса имеет ограничение  $E \leq 20$  нДж, что соответствует порогу возникновения рамановского диссипативного солитона. Использование этого ограничения, а также условия самостарта позволило определить область устойчивой одноимпульсной генерации.

Рис. 2 демонстрирует области устойчивой одноимпульсной генерации диссипативного солитона для различных длин пассивного волокна в плоскости (потери на ответвителе  $R_{in}$ , мощность насыщения  $P_{pump}$ ), ограниченной интервалом  $0 < R_{in} < 1$ , а также ограничениями, накладываемыми на энергию импульса. Точки А, В и С показывают максимум энергии для длин резонатора 1, 2 и 3 км. Очевидно, что максимум энергии соответствует максимуму мощности насыщения. При длинах резонатора, больших 1 км, оптимальная энергия соответствует максимуму величины  $R_{in}$  и находится на границе области генерации (см. точки В и С). При этом для меньших длин область генерации расширяется и значения оптимальной энергии соответствуют  $R_{in} \approx 0.5$ .

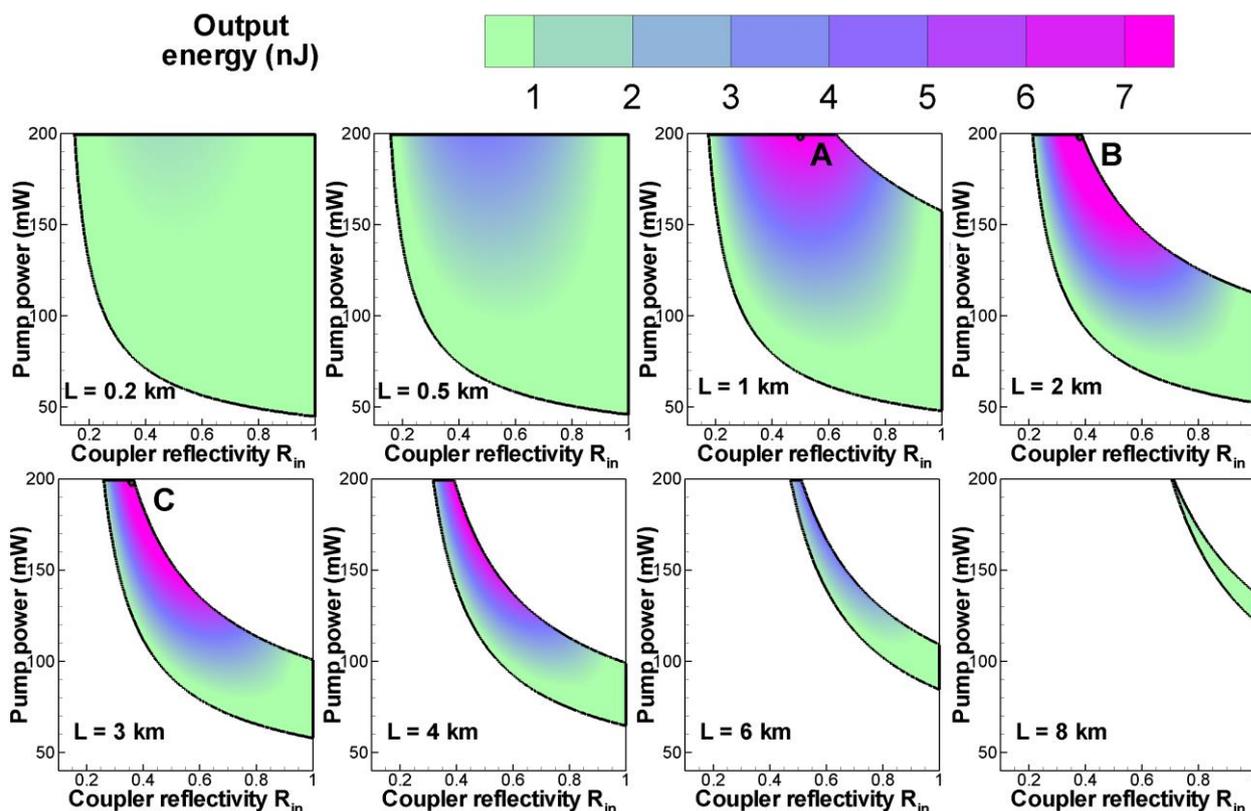


Рис. 2. Области устойчивой одноимпульсной генерации диссипативного солитона для различных длин пассивного волокна в плоскости (потери на ответвителе  $R_{in}$ , мощность насыщения  $P_{pump}$ ). Оптимальное значение выходной энергии достигается для резонатора длиной 2 км и равняется приблизительно 9.2 нДж.

Таким образом, предложенный метод позволяет определять область устойчивой одноимпульсной генерации длинного волоконного лазера, а также аналитически предсказать параметры резонатора, обеспечивающие генерацию импульсов с максимальной возможной энергией.

Список публикаций по теме работы:

1. O. V. Shtyrina, I. A. Yarutkina, A. S. Skidin, E.V. Podivilov, and M. P. Fedoruk. Theoretical Analysis of Solution of Cubic-Quintic Ginzburg-Landau Equation with Gain Saturation // Optics Express, Vol. 27 (5), P. 6711-6718, 2019.
2. Штырина О.В., Подивиллов Е.В., Яруткина И.А., Скидин А.С., Федорук М.П. Теоретическая оптимизация свойств импульса в длинном волоконном лазере // Фотон-экспресс (Спецвыпуск: 6 Всероссийская конференция по волоконной оптике, г. Пермь, 3-6 октября 2017 г.), Т. 6(142), С. 284-285, 2017.
3. Е.В. Подивиллов, О.В. Штырина, Д.А. Машарова, А.С. Скидин, И.А. Яруткина, М.П. Федорук. Теоретический анализ свойств излучения длинного волоконного лазера // Материалы Российского семинара по волоконным лазерам 2016, С. 136-137, Новосибирск, 2016.
4. O.V. Shtyrina, E.V. Podivilov, I.A. Yarutkina, A.S. Skidin, and M.P. Fedoruk. Theoretical Optimization of Pulse Properties in Ultra-Long Fiber Laser // 2018 Advanced Photonics Congress (BGPP, IPR, NP, Networks, NOMA, Sensors, SOF, SPPCom), Technical Digest, paper JTU5A.44, Zurich, Switzerland, July 2-5, 2018.