

# Моделирование пространственно-временной динамики двухволнового кольцевого волоконного нелинейного микрорезонатора

**В.А. Разуков\***, Л.А. Мельников

*Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина*

*\*E-mail: [razukov.vad@gmail.com](mailto:razukov.vad@gmail.com)*

DOI: 10.31868/RFL2020.166-167

Очевидно, что возможность предсказать поведение электромагнитного поля в микрорезонаторах имеет огромное практическое значение. Так как режим работы таких резонаторов сильно нелинейный, то исследование их динамики возможно лишь с применением методов численного моделирования, причем с привлечением моделей, адекватных в описании происходящих процессов, но и не требующих длительных расчетов. Основным [1] является модовый подход, при котором поле внутри микрорезонатора разбивается по продольным модам, и записываются уравнения для комплексных амплитуд этих мод, зависящих от времени. Результатом будет система десятков или даже сотен обычных граничных нелинейных уравнений, решение которых на компьютере является нетривиальной задачей. Например, из-за нелинейности, в уравнениях появляются суммы всех возможных произведений мод, и расчеты потребуют значительных временных и машинных ресурсов. Кроме того, чтобы рассчитать профиль поля во времени, требуется сложить поля мод, что тоже занимает много времени, если таких мод очень много. Это все примеры методов разложения в спектр. Альтернативным подходом к задаче динамики поля в микрорезонаторе является разностная схема, основанная на уравнениях переноса. [2], успешно примененная для моделирования рамановских и ВРМБ лазеров. Данная работа посвящена дальнейшему улучшению численной модели [2], и анализу результатов, полученных с помощью данной методики.

Уравнения, описывающие распространение импульса в внутри микрорезонатора, задаются следующим образом:

$$2i \left( \frac{\partial F}{\partial t} + v \frac{\partial F}{\partial z} \right) + D \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + 2\chi(|F|^2 + 2|B|^2)F = 0,$$

$$2i \left( \frac{\partial B}{\partial t} - v \frac{\partial B}{\partial z} \right) + D \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + 2\chi(2|F|^2 + |B|^2)B = 0.$$

Граничные условия имеют вид:  $F(0) = \sqrt{1-R}\sqrt{1-r}F(L) + \sqrt{R}\sqrt{A}\sqrt{1-r} + \sqrt{r}B(0)$ ;  $B(L) = \sqrt{1-R}\sqrt{1-r}B(0) - \sqrt{r}(1-r)F(L) + \sqrt{Rr}\sqrt{1-R}\sqrt{A}$ .

Здесь  $F$  и  $B$  – поля волн, распространяющихся по и против часовой стрелок,  $D < 0$  – коэффициент ДГС,  $v$  – групповая скорость,  $\chi$  – коэффициент фазовой кросс и самомодуляции,  $R$  – коэффициент отражения ответвителя,  $r$  – коэффициент отражения зеркала внутри резонатора,  $A$  – интенсивность внешней накачки,  $L$  – длина резонатора.

Мы учитываем дисперсию и нелинейность микрорезонатора, ответвитель, и зеркало, расположенное в случайном месте волокна. Кроме упомянутых эффектов, так же может присутствовать модуляционная неустойчивость. Для решения задачи применяется эффективная разностная схема второго порядка «Кабаре» [3]. На рисунке приведен пример учета не взаимного сдвига по фазе в

волокне, вызванного, например, вращением, и рэлеевского рассеяния на неоднородностях в среде резонатора [4].

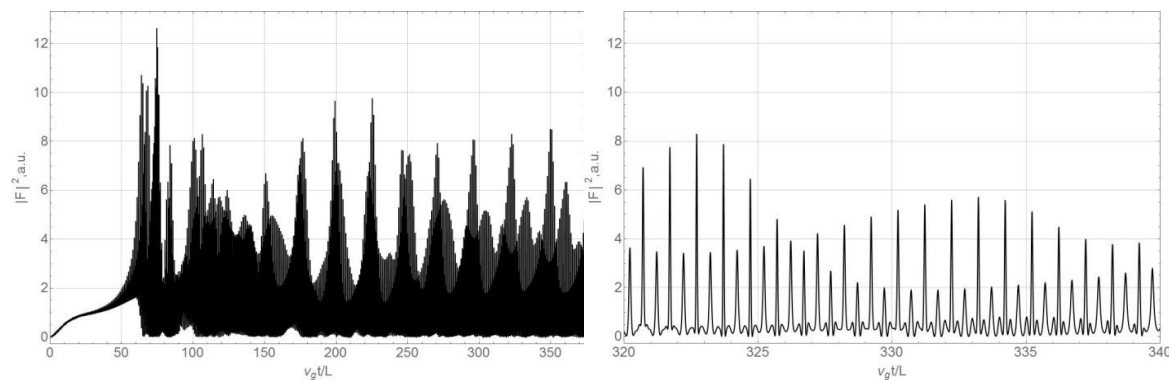


Рис. 1. Формирование оптической гребенки. Заметен сильный фоновый фазовый шум. Коэффициент модуляции  $\chi = 0,25$ . Коэффициент линейной связи волн  $r = 0,001$ . Коэффициент потерь  $0,0001$ .

Таким образом, использование явно-неявной схемы «Кабаре» позволяет с легкостью учитывать необходимые нелинейные эффекты в наблюдаемой системе. Это практически невозможно с модовым подходом, так как количество уравнений увеличивается в несколько раз при вводе каждого нового эффекта, с соответствующим ростом необходимого расчетного времени.

## Литература

- [1] T. Herr, V. Brasch et al, *Nature Photonics*, **8**, 145–152 (2014).
- [2] V.A. Razukov and L. A. Melnikov, in *Saratov Fall Meeting 2015: Third International Symposium on Optics and Biophotonics and Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS)*, **9917**, 788 – 792 (2016)
- [3] В.М. Головизнин, А.А. Самарский, *Математическое моделирование*. **10**, 86–100 (1998).
- [4] Разуков В.А., Мельников Л.А., *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика*. **20(1)**. 64-71 (2020).