Модуляционная неустойчивость и параметрическое усиление в световодах с изменяющейся по длине дисперсией

Ю.А. Мажирина[1], Л.А. Мельников[1], А.А. Сысолятин[2,*]

[1]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
[2]Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова
[*]E-mail: alex@fo.gpi.ru

DOI: 10.31868/RFL2020.101-102

Параметрическое усиление тесно связано с модуляционной неустойчивостью — генерацией боковых спектральных компонент при распространении в оптическом волокне с керровской нелинейностью излучения с постоянной интенсивностью. Для модуляционной неустойчивости необходимы определенные соотношения между дисперсией групповой скорости в волокне, частотой отстройки модуляционной компоненты от частоты поля накачки и коэффициентом нелинейности волокна[1]. Если волокно, вследствие модуляции диаметра, имеет дисперсию, зависящую от продольной координаты, то условия усиления боковых компонент будут различны в различных точках волокна, и условия генерации боковых компонент могут измениться. Однако, было показано, что модуляционная неустойчивость существует и в волокнах с переменным диаметром [2,3]. В докладе представлены результаты расчета спектра параметрического усиления в волокне с переменной дисперсией. Решается НУШ: $2i\frac{\partial A(z,t)}{\partial z}-D(z)\frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2}+2\alpha A^2(z,t)A^*(z,t)=0$, где $D=-\frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2 n_{эфф}}{\partial\lambda^2}$ - параметр, ответственный за дисперсию групповой скорости (ДГС), $n_{эфф}$. – эффективный показатель преломления волокна. Малые отклонения амплитуды поля имеют вид

$$A(z,t)=A_0(z,t)\left\{1+\left[x(z)\exp\left[iy(z)\right]\right]\cos(\Omega t)\right\}. \qquad (1)$$

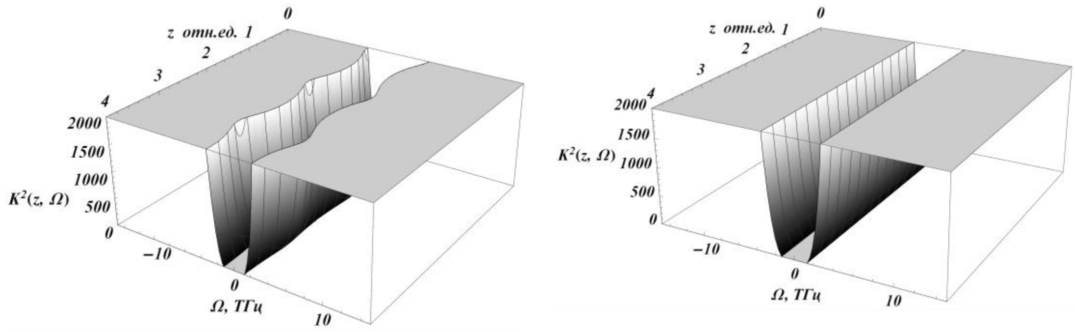
Здесь $A_0(z,t)=\sqrt{P}\exp\left[i\alpha Pz\right]$ – решение НУШ для пучка накачки с постоянной интенсивностью. Здесь α - коэффициент нелинейности волокна, P - интенсивность накачки, Ω - отстройка частоты боковой компоненты от частоты накачки. Уравнения для x и y получаются в виде[2]:

$$x''+K^2(z)x-Q(z)x=0. \qquad (2)$$

$$y'=\left[\Omega^2 D(z)+P\alpha\right]x(z), K^2=1/4\Omega^4 D^2(z)+P\alpha\Omega^2 D(z), Q(z)=D'(z)/D(z).$$

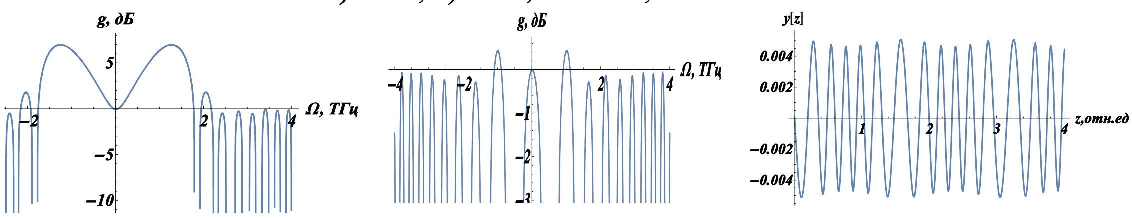
Если учесть $D(z)=D_0+d\cos(\kappa z)$, где κ - частота модуляции дисперсии, d - амплитуда модуляции, D_0 - средняя дисперсия, то уравнение для x является уравнением с периодическими коэффициентами и может быть сведено к уравнению Матье[3,4]: $a-2q\cos(2z)=K^2(z)-Q(z)$. В нём a и q - параметры в уравнении Матье. Определим инкремент нарастания возмущений $g=2/z_0\log\left[x(z_0)/x(0)\right]$, где z_0 - достаточно большая длина (можно положить z_0=4, которая измеряется в дисперсионных длинах).

На Рис.1 показана зависимость $K^2(z,\Omega)$. Видно, что в среднем $K^2>0$, что соответствует осциллирующим возмущениям. Если $K^2<0$, то это приводит к нарастанию возмущений. На Рис.2 а показан инкремент нарастания возмущений в зависимости от частоты. Видно, что в отсутствие дисперсионных изменений существует область усиления (модуляционной неустойчивости) шириной в несколько ТГц, которая также соответствует параметрическому усилению. При этом даже при положительной дисперсии существует область модуляционной неустойчивости (Рис.2 б). Эта область отсутствует при $d=0$.



а) б)

Рис.1. Зависимость $K^2(z,\Omega)$ построена для параметров $D_0=-10пс/(нм*км)$;
$а)d=4, б)d=0; \kappa=2/\pi; \alpha P=8.$



а) б) в)

Рис.2. а) Зависимость инкремента нарастания боковых компонент $g(\Omega)$ для параметров как на Рис.1; б) то же, кроме $D_0=10пс/(нм*км)$; в) Фаза возмущения y(z), параметры, как на Рис. 1.

В данной работе показано, что модуляционная неустойчивость, а следовательно, и параметрическое усиление существуют и в волокнах с положительной ДГС. Для этого необходима модуляция дисперсии по длине волокна. Параметрическое усиление сигнала сопровождается незначительным, порядка 10^{-3} рад, фазовым шумом (члены с y(z) в (2)).

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-52-45012 .

Литература

[1] G.P. Agraval. *Nonlinear Fiber Optics*. Waltham: Academic Press, 648с (2013).

[2] Л.А.Мельников, Ю.А.Мажирина. *Квантовая электроника* **47**, 1083-1090 (2017)

[3] C.Finot, A. Sysolyatin et al. *Optics Communs* **348**, 24-30 (2015).

[4] M. Abramowitz, I. Stigun. *Special Functions handbook*. Applied Mathematics Series, **55**, National Bureau of Standards, (1964).