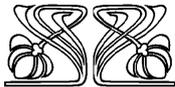
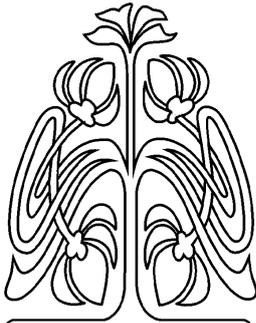




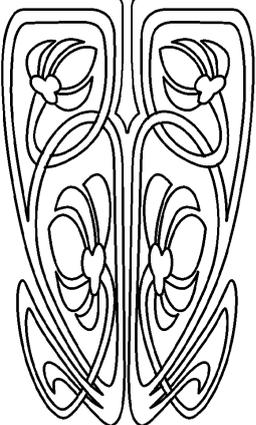
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 112–119
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 112–119
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-112-119>, EDN: RGNNHF

Научная статья
УДК 535.2:621.391



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Фазочувствительное усиление оптического сигнала в боковых полосах модуляционной неустойчивости при одночастотной накачке

А. И. Конюхов¹✉, Л. А. Мельников²

¹Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Конюхов Андрей Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей, теоретической и компьютерной физики, KonukhovAI@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6502-7405>, Author ID: 42239

Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение», lam.pels@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0423-3982>, Author ID: 20924

Аннотация. Модуляционная неустойчивость является распространенным явлением в физике нелинейных волн. Данный эффект проявляется в виде экспоненциального роста малых гармонических возмущений вокруг несущей частоты волнового пакета. Для возникновения модуляционной неустойчивости необходимо наличие кубической нелинейности и аномальной дисперсии групповой скорости. В оптических волокнах с периодическим изменением дисперсии модуляционная неустойчивость может возникать как в режиме аномальной, так и нормальной дисперсии. В статье рассмотрен процесс модуляционной неустойчивости при взаимодействии сигнальной волны, холостой волны и мощной волны накачки. Модуляция дисперсии приводит к возникновению резонансных полос усиления. Их положение определяется периодом модуляции дисперсии. На основе численного решения укороченных волновых уравнений авторами статьи показано, что фазочувствительное усиление может наблюдаться в боковых полосах модуляционной неустойчивости. Параметрический коэффициент усиления зависит как от фаз взаимодействующих волн, так и от фазы модуляции дисперсии. В зависимости от соотношения между фазами реализуется либо режим усиления, либо режим ослабления сигнальной волны. Такой эффект позволяет управлять положением частотных полос ослабления сигнала в пределах одной полосы модуляционной неустойчивости. Показано, что использование оптических волокон со сложным профилем модуляции дисперсии позволяет формировать широкую полосу усиления. В качестве примера рассмотрено волокно с модуляцией диаметра, определяемой суперпозицией трех синусоид с различной амплитудой, фазой и периодом модуляции. Показано, что в пределах одной полосы усиления возможно возникновение нескольких узких полос ослабления сигнала. Положение полос ослабления сигнала определяется фазами взаимодействующих волн.

Ключевые слова: фазочувствительное усиление, оптическое волокно с модуляцией дисперсии, параметрический усилитель

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-00396, <https://rscf.ru/project/22-12-00396/>). Авторы благодарны Ю. Г. Конюховой за помощь в подготовке публикации.



Для цитирования: Конюхов А. И., Мельников Л. А. Фазочувствительное усиление оптического сигнала в боковых полосах модуляционной неустойчивости при одночастотной накачке // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 112–119. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-112-119>, EDN: RGNHNF

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Phase-sensitive amplification of an optical signal in the modulation instability sidebands with single-frequency pump

A. I. Konyukhov¹✉, L. A. Melnikov²

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

Andrey I. Konyukhov, KonukhovAI@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6502-7405>, Author ID: 42239

Leonid A. Melnikov, lam.pels@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0423-3982>, Author ID: 20924

Abstract. Background and Objectives: The use of optical amplifiers in optical communications systems is currently of great interest. An optical signal can be amplified using semiconductor amplifiers, erbium or Raman amplifiers. Unfortunately, a linear laser amplifier adds spontaneous emission noise to the signal, degrading the signal-to-noise ratio. The use of phase-sensitive parametric amplifiers allows increasing the signal-to-noise ratio. Phase-sensitive amplifiers provide phase and amplitude squeezing that gives additional opportunities for signal regeneration and coding. Phase-sensitive amplification can be realized using four-wave mixing in highly nonlinear fibers. The resonant frequency for the parametric gain depends on the phase matching conditions for interacting waves. In real fibers, the resonant frequency is randomly shifted by fluctuations of the fiber dispersion. Dispersion fluctuation leads to the degradation of the gain and narrowing of the gain bandwidth. Resonant frequencies for the parametric gain can be extended using diameter modulation along the fiber length. Modulation of the fiber diameter gives rise to the modulation of the fiber dispersion. Periodic variation of the fiber dispersion leads to the excitation of the multipeak modulation instability spectrum. The signal wave can be amplified in modulation instability sidebands. Previous studies of the parametric gain in dispersion oscillating fibers are focused on the phase-insensitive amplification. In the present work, the phase-sensitive amplification in modulation instability sidebands is considered. **Materials and Methods:** We consider a truncated three-wave model for the parametric amplification of a continuous signal in the presence of strong single-frequency pump wave and weak idler wave. The dispersion and nonlinearity coefficients are calculated for the highly-nonlinear optical fiber with the W-shaped refractive index cross-section. Using numerical simulation, the gain coefficient for the signal wave was calculated in the terahertz frequency detuning range. Both the sine-wave modulation and the multi-frequency modulation of the fiber dispersion are considered. **Results:** We have found that the phase-sensitive amplification can be realized in high-order modulation instability sidebands. Single-frequency pump is sufficient to excite quasi-phase-matching sidebands. The amplification or depletion of the signal wave depends both on the individual phases of the interacting waves and on the phase of the dispersion oscillation. This effect makes it possible to manipulate the position of the depletion bands within the modulation instability sidebands. Resonant frequencies of the modulation instability sidebands depend on the modulation period. But the gain bandwidth depends on the type of modulation. Multifrequency modulation allows extending the gain bandwidth. We have found that high-order modulation instability sidebands can contain several narrow depletion bands, which frequency depends on the phases of the interacting waves and the phase of the dispersion oscillation. **Conclusion:** Modification of the phase-matching conditions in optical fibers with a variable dispersion allows improving the performance of parametric amplifiers. We have proposed the use of dispersion oscillating fiber for the generation of a comb of multiple spectral sidebands with phase-sensitive gain. When compared with the other possible schemes such as phase matching induced by the fourth-order dispersion coefficient, we expect that our proposed technique is more tolerant with respect to the longitudinal stochastic fluctuations of the fiber properties.

Keywords: phase-sensitive amplification, dispersion oscillating optical fiber, parametric amplifier

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-12-00396, <https://rscf.ru/project/22-12-00396/>). The authors are grateful to Julia G. Konyukhova for the help in the preparation of the article.

For citation: Konyukhov A. I., Melnikov L. A. Phase-sensitive amplification of an optical signal in the modulation instability sidebands with single-frequency pump. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 112–119 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-2-112-119>, EDN: RGNHNF

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Оптоволоконные параметрические усилители обладают высоким коэффициентом усиления, низким уровнем шума и могут работать в фазочувствительном режиме [1–3]. Использование фазочувствительных усилителей (ФЧУ) в квантовых системах передачи информации позволяет повысить эффективность детектирования отдель-

ных фотонов [4], поскольку собственные шумы у такого усилителя отсутствуют. Одним из важных применений ФЧУ является регенерация фазомодулированных сигналов в телекоммуникационных системах [5].

Недостатком оптоволоконных усилителей является сложность согласования фаз взаимодействующих волн [6]. Условия фазового синхро-



низма зависят от флуктуаций диаметра волокна [7]. Из-за флуктуаций диаметра волокна дисперсия групповой скорости (ДГС) и эффективная нелинейность изменяются по длине волокна. Флуктуация дисперсии ограничивает полосу усиления. Преодолеть это ограничение возможно с использованием периодической модуляции диаметра волокна. На резонансных частотах, определяемых условиями четырехволнового квазисинхронизма, возникают полосы модуляционной неустойчивости (МН) [8]. Возбуждение боковых полос МН при усилении спонтанного шума продемонстрировано в [9]. Усиление сигнальной волны в поле мощной волны накачки продемонстрировано в работе [10]. Параметрическое усиление поля сигнала в боковой полосе МН не ограничивается обычным случаем параметрического усиления в волокне с аномальной дисперсией. Возможно также усиление сигнальной волны накачкой, находящейся в режиме нормальной дисперсии [11].

Процесс МН является примером вырожденного четырехволнового смещения (ЧВС). Во взаимодействии участвуют как минимум три световые волны: волна накачки, сигнальная и холостая волны [1,5]. При наличии на входе в волокно только двух волн (волны накачки и сигнальной волны) реализуется режим фазонезависимого усиления (ФНУ), поскольку холостая волна, возникающая в процессе распространения излучения, является комплексно сопряженной к сигнальной [7]. Предыдущие исследования МН в волокнах с периодическим изменением дисперсии [8–12] относятся к ФНУ.

Для реализации ФЧУ необходимо обеспечить на входе в волокно наличие сигнальной и холостой волн, а также мощной волны накачки. В этом случае коэффициент усиления будет зависеть от начальной фазы взаимодействующих волн. Существуют другие схемы реализации ФЧУ, например с двухчастотной накачкой либо с использованием различной поляризации волн [5]. Однако эти схемы сложны в экспериментальной реализации.

В данной работе рассмотрены ФЧУ в боковых полосах МН. Для моделирования использовались укороченные волновые уравнения [13]. Рассмотрены ФЧУ в волокнах двух типов: i) с синусоидальной модуляцией, ii) с модуляцией, определяемой суперпозицией трех синусоид с различными периодом, амплитудой и фазой.

1. Параметрическое усиление в волокне с периодическим изменением дисперсии

Вырожденное параметрическое усиление в среде $\chi_{(3)}$ связано с взаимодействием трех стационарных монохроматических волн на частотах ω_0 , $\omega_1 = \omega_0 - \Omega$ и $\omega_2 = \omega_0 + \Omega$ [7]. Все волны имеют коллинеарную поляризацию и распространяются в прямом направлении. Полное поперечное электрическое поле $E(x, y, z)$, распространяющееся в волокне переменного диаметра, можно записать следующим образом:

$$E(x, y, z) = U(x, y, z) \sum_{m=0}^2 A_m \exp(i\zeta_m(z) - i\omega_m t), \quad (1)$$

где $m = 0, 1, 2$; A_0 – медленно меняющаяся амплитуда волны накачки; A_1 и A_2 – амплитуды холостой и сигнальной волн. Частоты волн равны ω_0 , ω_1 и ω_2 соответственно. Фазовый набег определяется интегралом $\zeta_m(z) = \int_0^z \beta(z', \omega)$, где z – длина распространения. Постоянная распространения $\beta(z, \omega)$ и поперечный профиль моды волокна $U(x, y, z)$ определяются для заданного профиля показателя преломления $n(r)$. Предполагаем, что профиль волокна изменяется медленно ($|\partial\beta(z, \omega)/\partial z| \ll 1$). В этом случае вырожденное скалярное ЧВС можно описать системой трех связанных уравнений [7, 13]:

$$\frac{dA_0}{dz} = i\gamma(z)(|A_0|^2 + 2|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_0 + 2i\gamma(z)A_0^*A_1A_2 \exp(i\Delta\zeta(z)) - \frac{\alpha}{2}A_0, \quad (2)$$

$$\frac{dA_1}{dz} = i\gamma(z)(2|A_0|^2 + 2|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1 + 2i\gamma(z)A_0^2A_2^* \exp(i\Delta\zeta(z)) - \frac{\alpha}{2}A_1, \quad (3)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = i\gamma(z)(2|A_0|^2 + 2|A_1|^2 + |A_2|^2)A_2 + 2i\gamma(z)A_0^2A_1^* \exp(i\Delta\zeta(z)) - \frac{\alpha}{2}A_2, \quad (4)$$

где $\Delta\zeta(z) = \int_0^z \{\beta(\omega_1, z') + \beta(\omega_2, z') - 2\beta(\omega_0, z')\} dz'$ – фазовая расстройка, α – коэффициент потерь.

Разложим постоянную распространения в ряд Тейлора вблизи центральной частоты ω_0 :

$$\begin{aligned} \beta(\omega_0 \pm \Omega) &= \\ &= \beta(\omega_0) \pm \beta_1\Omega + \beta_2\Omega^2/2 \pm \beta_3\Omega^3/6 + \beta_4\Omega^4/24, \end{aligned} \quad (5)$$

где производные $\beta_j = \partial^j\beta/\partial\omega^j$, $j = 1, 2, 3, 4$, вычисляются для центральной частоты ω_0 . Используя (5) и $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$, $\omega_2 = \omega_0 - \Omega$, линейное рассогласование волновых чисел можно выразить следующим образом:

$$\Delta\zeta(z) = \Omega^2 \int_0^z \beta_2(z') dz' + \Omega^4 12^{-1} \int_0^z \beta_4(z') dz'. \quad (6)$$



Усиление сигнальной волны рассчитывалось по формуле

$$G_S = 10 \lg (|A_2(L)|^2 |A_2(0)|^{-2}), \quad (7)$$

где L – длина волокна, \lg – десятичный логарифм.

В расчетах мы предполагаем, что начальная мощность волны накачки $P_0 = |A_0(0)|^2 = 0.5$ Вт. Начальные мощности сигнальной и холостой волн равны $|A_1(0)|^2 = |A_2(0)|^2 = 10^{-6}$ Вт. Холостая волна является комплексно сопряженной к сигнальной, поэтому использовалось начальное условие $\varphi_1(0) = -\varphi_2(0)$. Такое равенство возникает при генерации начальных полей методом копирования [1–3]. Коэффициент потерь $\alpha = 0.092$ км⁻¹, что соответствует 0.4 дБ/км.

Отметим, что для непрерывного излучения система укороченных волновых уравнений (2)–(4) достаточно точно описывает процесс параметрического усиления. Для ФНУ результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментами [9, 11]. Поэтому для анализа ФЧУ мы также использовали укороченные волновые уравнения.

2. Синусоидальная модуляция

Модуляция диаметра волокна приводит к модуляции нелинейности и дисперсии групповой скорости [14, 15]. Изменение диаметра волокна не должно приводить к нарушению одномодового режима распространения волн. В расчетах мы использовали параметры волокна [12], у которого амплитуда модуляции диаметра составляет величину, равную 10% от его среднего значения. Волокно остаётся одномодовым на частотах сигнальной волны, холостой волны и волны накачки.

Модуляция диаметра волокна должна приводить к увеличению потерь. Для точной оценки этих потерь необходимо решить задачу о распространении излучения в волокне с переменным диаметром. Такой анализ выходит за рамки данной работы, и мы ограничились использованием данных из литературы. Для высоконелинейных волокон с W-профилем показателя преломления и периодом модуляции от десятков до сотен метров потери не превышают величину 0.7 дБ/км [9–12, 14, 15].

При синусоидальной модуляции диаметра волокна для коэффициентов дисперсии и нелинейности можно использовать аппроксимацию синусом. Для волокна с W-профилем показателя

преломления [12]

$$\langle \beta_2 \rangle(z) = \beta_2 [11.38 \sin(2\pi z/z_m + \varphi_m)], \quad (8)$$

$$\langle \beta_4 \rangle(z) = \beta_4 [1 + 225 \sin(2\pi z/z_m + \varphi_m)], \quad (9)$$

$$\gamma(z) = \gamma [10.017 \sin(2\pi z/z_m + \varphi_m)], \quad (10)$$

где z_m – период модуляции, φ_m – фаза модуляции, среднее значение ДГС $\langle \beta_2 \rangle = 2.16$ пс²·км⁻¹, среднее значение коэффициента дисперсии четвертого порядка $\langle \beta_4 \rangle = 3.77 \times 10^{-4}$ пс⁴·км⁻¹, среднее значение эффективного коэффициента нелинейности волокна $\langle \gamma \rangle = 9.44$ Вт·км⁻¹. Величины (9)–(10) были рассчитаны для центральной длины волны 1550 нм.

Резонансная частота ν_q задается условием фазового квазисинхронизма [11]

$$\nu_q = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2}{\langle \beta_2 \rangle} q \frac{\pi}{z_m} + \langle \gamma \rangle 2P_0 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Фундаментальный спектр усиления МН образуется при $q = 0$. Если мы рассматриваем распространение сигнальной и холостой волн в присутствии интенсивной волны накачки, то условия синхронизма требуют наличия аномальной дисперсии [13] ($\langle \beta_2 \rangle < 0$). Однако величина q может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Соответственно, нелинейный синхронизм может реализовываться как при нормальной дисперсии ($\langle \beta_2 \rangle > 0$), так и при аномальной дисперсии ($\langle \beta_2 \rangle < 0$).

Мы рассчитали коэффициент усиления сигнальной волны (7) вблизи двух резонансных частот, определяемых для $q = 1$ и $q = 2$ (рис. 1). Вблизи нуля дисперсии ($\langle \beta_2 \rangle \sim 0$) формула (11) является приближенной, поскольку она не учитывает насыщение усиления и дисперсию четвертого порядка. Резонансные частоты, рассчитанные при помощи формулы (11), равны $\nu_1 = 1.44$ ТГц и $\nu_2 = 1.98$ ТГц. Тогда как численное решение уравнений (2)–(4) показывает пиковое усиление на частотах 1.32 ТГц и 1.9 ТГц соответственно (см. рис. 1, $\varphi_P = -0.6$) Для ФНУ известен аналогичный эффект. Смещение резонансных частот было обнаружено в экспериментах [12].

При $\varphi_P = -0.6$ рад формируются широкие полосы усиления сигнальной волны. Изменение фазы волны накачки вызывает появление узкого провала ($G_S < 0$, см. рис. 1), связанного с ослаблением сигнальной волны. При изменении фазы от $\varphi_P = -0.6$ рад до $\varphi_P = 1.2$ рад провал

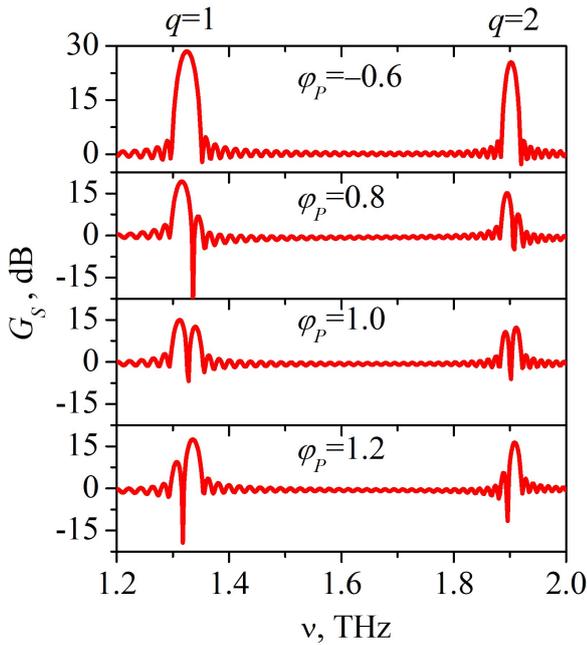


Рис. 1. Коэффициент усиления сигнальной волны для различных значений начальной фазы волны накачки $\varphi_p = \arg(A_0(0))$, фаза указана в радианах. Частотная отстройка $\nu = \Omega(2\pi)^{-1}$. Длина волокна $L = 1.4$ км, фаза модуляции $\varphi_m = 0$, период модуляции $z_m = 0.04$ км

Fig. 1. Signal wave gain for different values of the initial phase of the pump wave $\varphi_p = \arg(A_0(0))$, the phase is in radians. Frequency detuning is $\nu = \Omega(2\pi)^{-1}$. Fiber length is $L = 1.4$ km, modulation phase is $\varphi_m = 0$, modulation period is $z_m = 0.04$ km

в усилении перемещается из высокочастотной области в низкочастотную. Перемещение провала происходит синхронно как для первой полосы ($q = 1$), так и для второй ($q = 2$). Однако частота, соответствующая ослаблению сигнала, определяется не только фазой волны накачки, но и фазой модуляции дисперсии. Так, например, при $\varphi_m = -1.2$ рад и $\varphi_p = 0.05$ рад первая полоса ($q = 1$) не содержит провала ослабления сигнала, тогда как для второй полосы ($q = 2$) провал расположен в её центре (рис. 2).

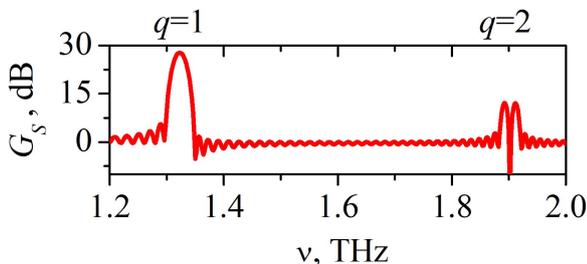


Рис. 2. Коэффициент усиления сигнальной волны при $\varphi_p = 0.05$ рад и $\varphi_m = -1.2$ рад. Остальные параметры см. рис. 1

Fig. 2. Signal wave gain for $\varphi_p = 0.05$ rad and $\varphi_m = -1.2$ rad. Other parameters are shown in Fig. 1

3. Многочастотная модуляция

Одним из недостатков параметрического усиления в полосах модуляционной неустойчивости являются узкие полосы усиления. В работе [16] было показано, что использование сложного профиля модуляции диаметра волокна позволяет расширить полосу ФНУ. Рассмотрим аналогичную задачу для ФЧУ.

Изменение диаметра вдоль волокна было задано суперпозицией трех синусоид с периодом модуляции 40, 40.5 и 41.5 м. Фаза и амплитуда для каждой из синусоид подбирались так, чтобы обеспечить равномерное усиление в полосе от 1.28 до 1.32 ТГц. Изменение дисперсии и нелинейности, соответствующее оптимальным условиям, показано на рис. 3. Оптимизация параметров модуляции позволила получить полосу усиления $q = 1$ с шириной 40 ГГц при неравномерности коэффициента усиления 1 дБ (рис. 4). Величина 40 ГГц почти в два раза превышает ширину полосы усиления (22 ГГц) для волокна с синусоидальной модуляцией дисперсии (см. рис. 1, $q = 1$, $\varphi_p = -0.6$ рад).

Увеличение полосы пропускания сопровождается снижением пикового значения коэффициента усиления. Если для синусоидальной модуляции максимальное значение коэффициента усиления равно 28 дБ (см. рис. 1), то для модуляции, показанной на рис. 3, максимальный коэффициент усиления равен 13 дБ (рис. 4).

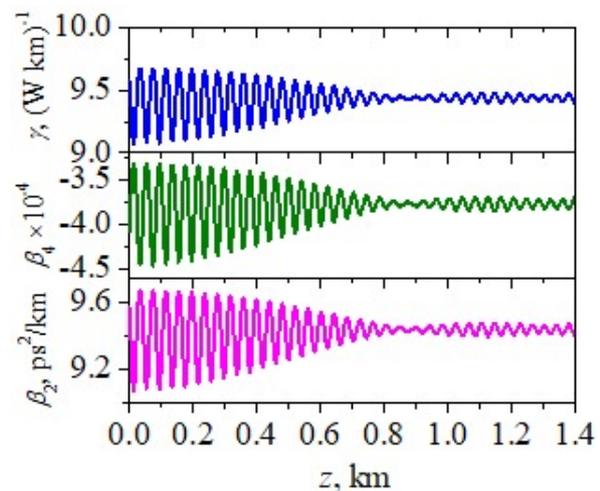


Рис. 3. Дисперсия и нелинейность волокна, оптимизированные для широкополосного усиления сигнала в полосе частот от 1.28 до 1.32 ТГц (цвет онлайн)

Fig. 3. Fiber dispersion and nonlinearity coefficient optimized for broadband amplification in the frequency range from 1.28 to 1.32 THz (color online)



Изменение фазы волны накачки φ_P по-разному влияет на частотное распределение коэффициента усиления в первой ($q = 1$) и во второй ($q = 2$) полосе модуляционной неустойчивости (см. рис. 4). При $\varphi_P = 2.8$ рад провал, связанный с ослаблением сигнала ($G_S < 0$), появляется на краю первой полосы ($q = 1$), тогда как вторая полоса ($q = 2$) содержит провал в своей центральной части.

Для ($q = 2$) увеличение фазы до величины $\varphi_P = 3.6$ рад приводит к появлению двух провалов ослабления сигнала. При этом первая полоса ($q = 1$) содержит только один провал. Его ширина почти в два раза больше (см. рис. 4, $\varphi_P = 3.6$ рад), чем ширина аналогичного провала при синусоидальной модуляции (см. рис. 1, $\varphi_P = 1.0$ рад).

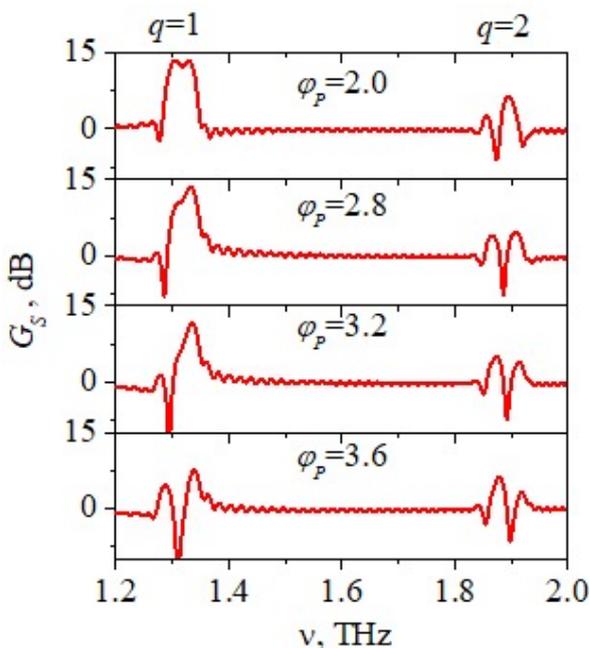


Рис. 4. Коэффициент усиления G_S , рассчитанный для волокна с модуляцией, показанной на рис. 3. Фаза φ_P указана в радианах. Мощность накачки $P_0 = 0.5$ Вт

Fig. 4. The gain G_S calculated for the fiber with the modulation shown in Fig. 3. Phase φ_P is in radians. Pump power is $P_0 = 0.5$ W

На рис. 5 показано фазово-спектральное распределение усиления, рассчитанное для волокна со сложным профилем изменения дисперсии (см. рис. 3). Коэффициент усиления G_S является периодической функцией начальной фазы φ_P . Период равен π . Для $q = 1$ центр полосы усиления соответствует $\varphi_P = -1 \pm \pi, -1 \pm 2\pi, \dots$. Для $q = 2$ центр соответствует другому значению $\varphi_P = -1.87 \pm \pi, -1.87 \pm 2\pi, \dots$. Такая особенность связана с зависимостью коэффициента усиления от фазы модуляции дисперсии.

Как видно из рис. 5, для $q = 1$ линия $\varphi_P = \text{const}$ может пересечь область ослабления сигнала ($G_S < 0$) только один раз. Тогда как для $q = 2$ такая линия может пересечь область $G_S < 0$ два раза, например при $\varphi_P = -2$ рад. Такая особенность приводит к появлению нескольких узких полос ослабления сигнала на фоне широкой полосы усиления, соответствующей $q = 2$.

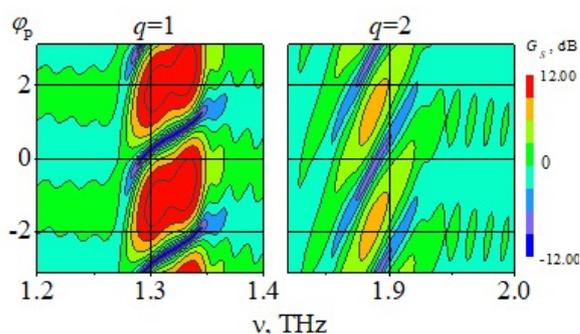


Рис. 5. Фазово-спектральное распределение коэффициента усиления G_S . Параметры указаны на рис. 4 (цвет онлайн)

Fig. 5. Phase-spectral distribution of the gain G_S . The parameters are shown in Fig. 4 (color online)

Заключение

Рассмотрена генерация боковых полос модуляционной неустойчивости в процессе фазочувствительного параметрического усиления в волокнах с периодическим изменением дисперсии. Показано, что фазочувствительный режим усиления может быть реализован при использовании классической схемы, когда сигнальная и холостая волны распространяются совместно с мощной одночастотной накачкой. Показано также, что для фазочувствительного усиления могут использоваться боковые полосы МН высокого порядка. Параметрический коэффициент усиления волокна зависит как от отдельных фаз взаимодействующих волн, так и от фазы модуляции дисперсии. Изменяя фазу, можно управлять положением узких полос ослабления сигнала в пределах широкой полосы МН.

Модуляция дисперсии обеспечивает фазочувствительное усиление при отстройках до нескольких терагерц. Резонансная частота определяется периодом модуляции. Возможность настройки резонансной частоты в широком диапазоне частот является преимуществом такого усилителя. Однако при больших отстройках различие в групповых скоростях взаимодействующих волн приводит к уменьшению эффективности передачи энергии от волны



накачки к сигнальной волне [7]. Для наносекундных импульсов уменьшение эффективности преобразования волн может быть компенсировано использованием непрерывной накачки [7] либо повышением её мощности до нескольких ватт [12]. Однако для пикосекундных сигналов падение усиления за счет рассогласования групповых скоростей представляет серьёзную проблему.

Ширина полосы пропускания определяется законом изменения дисперсии вдоль волокна. Чтобы показать возможность расширения полосы усиления за счет многочастотной модуляции, было рассмотрено волокно, диаметр которого определяется суперпозицией трех синусоид с различным периодом, фазой и амплитудой. Решая задачу оптимизации, авторы статьи получили увеличение ширины полосы пропускания с 22 до 40 ГГц. При этом в пределах одной полосы усиления возможно возникновение нескольких узких полос, соответствующих ослаблению сигнальной волны. Положение полос ослабления сигнала определяется соотношением между фазами волны накачки, сигнальной и холостой волн.

Список литературы

1. Huang J. Parametric amplifiers in optical communication systems: From fundamentals to applications // *Optical amplifiers – a few different dimensions* / ed. P. K. Choudhury. Rijeka : Intech Open, 2018. P. 39–65. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73696>
2. Tong Z., Lundstrom C., Andrekson P. A., Karlsson M., Bogris A. Ultralow noise, broadband phase-sensitive optical amplifiers, and their applications // *IEEE J. of Selec. Top. in Quant. Electron.* 2012. Vol. 18, iss. 2. P. 1016–1032. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2011.2136330>
3. Lundstrom C., Corcoran B., Karlsson M., Andrekson P. A. Phase and amplitude characteristics of a phase-sensitive amplifier operating in gain saturation // *Opt. Express*. 2012. Vol. 20, iss. 19. P. 21400–21412. <https://doi.org/10.1364/OE.20.021400>
4. Takanashi N., Inoue A., Kashiwazaki T., Kazama T., Enbutsu K., Kasahara R., Umeki T., Furusawa A. All-optical phase-sensitive detection for ultra-fast quantum computation // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28, iss. 23. P. 34916–34926. <https://doi.org/10.1364/OE.405832>
5. Marhic M. E., Andrekson P. A., Petropoulos P., Radic S., Peucheret C., Jazayerifar M. Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems // *Laser & Photonics Reviews*. 2014. Vol. 9. P. 50–74. <https://doi.org/10.1002/lpor.201400087>
6. McKinstrie C. J., Radic S. Phase-sensitive amplification in a fiber // *Opt. Express*. 2004. Vol. 12, iss. 20. P. 4973–4979. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.004973>
7. Agrawal G. P. *Nonlinear fiber optics*. 5th ed. Oxford : Academic Press, 2013. 648 p.
8. Smith N. J., Doran N. J. Modulational instabilities in fibers with periodic dispersion management // *Opt. Lett.* 1996. Vol. 21, iss. 8. P. 570–572. <https://doi.org/10.1364/OL.21.000570>
9. Droques M., Kudlinski A., Bouwmans G., Martinelli G., Mussot A. Dynamics of the modulation instability spectrum in optical fibers with oscillating dispersion // *Phys. Rev. A*. 2013. Vol. 87, iss. 1. P. 013813-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.87.013813>
10. Feng F., Sysoliatin A., Chembo Y. K., Fatome J., Wabnitz S., Finot C. Wavelength conversion and temporal compression of pulse train using dispersion oscillating fibre // *Electronics Letters*. 2014. Vol. 50, iss. 10. P. 768–770. <https://doi.org/10.1049/el.2014.0627>
11. Mussot A., Conforti M., Trillo S., Copie F., Kudlinski A. Modulation instability in dispersion oscillating fibers // *Adv. Opt. Photon.* 2018. Vol. 10, iss. 1. P. 1–42. <https://doi.org/10.1364/AOP.10.000001>
12. Finot C., Fatome J., Sysoliatin A., Kosolapov A., Wabnitz S. Competing four-wave mixing processes in dispersion oscillating telecom fiber // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, iss. 24. P. 5361–5364. <https://doi.org/10.1364/OL.38.005361>
13. Cappellini G., Trillo S. Third-order three-wave mixing in single-mode fibers: Exact solutions and spatial instability effects // *J. Opt. Soc. Am. B*. 1991. Vol. 8, iss. 4. P. 824–838. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.8.000824>
14. Sysoliatin A. A., Gochelashvili K. S., Konyukhov A. I., Melnikov L. A., Stasyuk V. A. All-optical fiber soliton processing using dispersion oscillating fiber // *Laser Phys. Lett.* 2020. Vol. 17. Article number 065105. P. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab8472>
15. Sysoliatin A., Senatorov A., Konyukhov A., Melnikov L., Stasyuk V. Soliton fission management by dispersion oscillating fiber // *Opt. Express*. 2008. Vol. 15, iss. 25. P. 16302–16307. <https://doi.org/10.1364/OE.15.016302>
16. Fourcade-Dutin C., Bassery Q., Bigourd D., Bendahmane A., Kudlinski A., Douay M., Mussot A. 12 THz flat gain fiber optical parametric amplifiers with dispersion varying fibers // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23, iss. 8. P. 10103–10110. <https://doi.org/10.1364/OE.23.010103>

References

1. Huang J. Parametric amplifiers in optical communication systems: From fundamentals to applications. In: Choudhury P. K., ed. *Optical amplifiers – a few different dimensions*. Rijeka, Intech Open, 2018, pp. 39–65. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73696>
2. Tong Z., Lundstrom C., Andrekson P. A., Karlsson M., Bogris A. Ultralow noise, broadband phase-sensitive optical amplifiers, and their applications. *IEEE J. of Selec. Top. in Quant. Electron.*, 2012, vol. 18, iss. 2, pp. 1016–1032. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2011.2136330>
3. Lundstrom C., Corcoran B., Karlsson M., Andrekson P. A. Phase and amplitude characteristics of a phase-



- sensitive amplifier operating in gain saturation. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, iss. 19, pp. 21400–21412. <https://doi.org/10.1364/OE.20.021400>
4. Takanashi N., Inoue A., Kashiwazaki T., Kazama T., Enbutsu K., Kasahara R., Umeki T., Furusawa A. All-optical phase-sensitive detection for ultra-fast quantum computation. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, iss. 23, pp. 34916–34926. <https://doi.org/10.1364/OE.405832>
 5. Marhic M. E., Andrekson P. A., Petropoulos P., Radic S., Peucheret C., Jazayerifar M. Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, vol. 9, pp. 50–74. <https://doi.org/10.1002/lpor.201400087>
 6. McKinstrie C. J., Radic S. Phase-sensitive amplification in a fiber. *Opt. Express*, 2004, vol. 12, iss. 20, pp. 4973–4979. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.004973>
 7. Agrawal G. P. *Nonlinear Fiber Optics*. 5th ed. Oxford, Academic Press, 2013. 648 p.
 8. Smith N. J., Doran N. J. Modulational instabilities in fibers with periodic dispersion management. *Opt. Lett.*, 1996, vol. 21, iss. 8, pp. 570–572. <https://doi.org/10.1364/OL.21.000570>
 9. Droques M., Kudlinski A., Bouwmans G., Martinelli G., Mussot A. Dynamics of the modulation instability spectrum in optical fibers with oscillating dispersion. *Phys. Rev. A*, 2013, vol. 87, iss. 1, pp. 013813-7. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1212.5080>
 10. Feng F., Sysoliatin A., Chembo Y. K., Fatome J., Wabnitz S., Finot C. Wavelength conversion and temporal compression of pulse train using dispersion oscillating fibre. *Electronics Letters*, 2014, vol. 50, iss. 10, pp. 768–770. <https://doi.org/10.1049/el.2014.0627>
 11. Mussot A., Conforti M., Trillo S., Copie F., Kudlinski A. Modulation instability in dispersion oscillating fibers. *Adv. Opt. Photon.*, 2018, vol. 10, iss. 1, pp. 1–42. <https://doi.org/10.1364/AOP.10.000001>
 12. Finot C., Fatome J., Sysoliatin A., Kosolapov A., Wabnitz S. Competing four-wave mixing processes in dispersion oscillating telecom fiber. *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, iss. 24, pp. 5361–5364. <https://doi.org/10.1364/OL.38.005361>
 13. Cappellini G., Trillo S. Third-order three-wave mixing in single-mode fibers: Exact solutions and spatial instability effects. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, vol. 8, iss. 4, pp. 824–838. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.8.000824>
 14. Sysoliatin A. A., Gochelashvili K. S., Konyukhov A. I., Melnikov L. A., Stasyuk V. A. All-optical fiber soliton processing using dispersion oscillating fiber. *Laser Phys. Lett.*, 2020, vol. 17, article no. 065105, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab8472>
 15. Sysoliatin A., Senatorov A., Konyukhov A., Melnikov L., Stasyuk V. Soliton fission management by dispersion oscillating fiber. *Opt. Express*, 2008, vol. 15, iss. 25, pp. 16302–16307. <https://doi.org/10.1364/OE.15.016302>
 16. Fourcade-Dutin C., Bassery Q., Bigourd D., Bendahmane A., Kudlinski A., Douay M., Mussot A. 12 THz flat gain fiber optical parametric amplifiers with dispersion varying fibers. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, iss. 8, pp. 10103–10110. <https://doi.org/10.1364/OE.23.010103>

Поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена после рецензирования 09.01.2023; принята к публикации 15.01.2023
 The article was submitted 23.12.2022; approved after reviewing 09.01.2023; accepted for publication 15.01.2023