

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ж.И. Алфёрова за постоянное внимание и поддержку работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алфёров Ж.И., Портной Е.Л., Стельмах Н.М., Журавлев А.Б. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 18. С. 1097-1098.
- [2] Vander Ziel J.P., Tsang W.T., London R.A., Mikulyak R.M., Augustinyak W.M. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39(7). P. 525.
- [3] Sturge T.D. // Phys. Rev. 1962. V. 127. N 4. P. 768-773.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
24 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 11 12 июня 1989 г.
06.3; 07

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ВРМБ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ СИЛЬНОМ ИСТОЩЕНИИ НАКАЧКИ

А.А. Фотиади, Е.А. Кузин,
М.П. Петров, А.А. Ганичев

При изучении ВРМБ в оптическом волокне от достаточно длинных лазерных импульсов вдоль волокна можно выделить три характерных области, в которых происходит формирование стокового сигнала [1]. Сначала в области распространения передней части импульса накачки — „предвестника” происходит зарождение из шума стоковой волны сравнительно небольшой интенсивности („бегущий” режим ВРМБ [2, 3]). Затем образовавшаяся стоковая волна свободно проходит через вторую область волокна, где накачка сильно истощена, и попадает в область интенсивной накачки вблизи входного торца волокна, где усиливается окончательно. Последняя область фактически представляет собой ВРМБ усилитель [4], работающий в нестационарном режиме при сильном истощении накачки. Передаточные характеристики такого усилителя в большой степени определяют динамические параметры выходного стокового сигнала при ВРМБ.

В настоящей работе путем линеаризации исходных уравнений относительно стационарных распределений интенсивностей по длине

волокна получено решение нестационарной пространственно-временной задачи ВРМБ усиления при сильном истощении накачки. Рассмотрен процесс передачи через ВРМБ усилитель стоксового сигнала, промодулированного по гармоническому закону. Показано, что амплитудно-частотная характеристика ВРМБ усилителя при сильном истощении накачки имеет максимум вблизи частоты $\sim 1/\tau_{3B}$, где τ_{3B} - время релаксации гиперзвука в среде.

Полученные результаты также могут представлять интерес при использовании ВРМБ для усиления слабых сигналов в ВОЛС [5, 6].

1. Нестационарная пространственно-временная задача ВОЛС в одномодовом волокне описывается системой трех связанных волновых уравнений для комплексных амплитуд волн накачки $\varepsilon_1(\tau; z)$, стоксового излучения $\varepsilon_2(\tau; z)$ и гиперзвука $\varepsilon_S(\tau; z)$. В приближении медленно меняющихся амплитуд, при условии, что амплитуда гиперзвуковой волны мало меняется за период звуковых колебаний [7] и с учетом фазовых соотношений при ВРМБ [8], исходные уравнения можно записать в виде

$$\begin{aligned} (\partial_t + \partial_x) P_1 &= -2\sqrt{P_1 P_2} E_S, \\ (\partial_t - \partial_x) P_2 &= 2\sqrt{P_1 P_2} E_S, \\ (\partial_t + \gamma) E_S &= \gamma \sqrt{P_1 P_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $P_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_1^* / P_{10}$, $P_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_2^*}{P_{10}}$, P_{10} - пиковая мощность излучения накачки; $E_S \sim \frac{|\varepsilon_S|}{P_{10}}$ (точное выражение для E_S имеется в [7]); $x = \frac{z}{l_0}$, $l_0 = \frac{1}{G P_{10}}$, $t = \frac{\tau}{\tau_0}$, $\tau_0 = \frac{l_0 n}{c}$, $\gamma = \Gamma \tau_0$, $G = \frac{g}{S}$, z - текущая координата вдоль волокна, τ - реальное время, $\Gamma = \frac{1}{\tau_{3B}}$ - полуширина линии СРМБ, g - коэффициент усиления ВРМБ, S - эффективная площадь сечения волокна, τ_{3B} - время релаксации гиперзвука в среде.

Стационарное распределение интенсивностей накачки $P_1^0(x)$ и стоксового излучения $P_2^0(x)$ по длине волокна при сильном истощении накачки может быть получено как стационарное решение системы (1) с граничными условиями $P_1^0(0) = P_2^0(l_0) = 1$ и имеет вид:

$$P_1^0(x) = P_2^0(x) = E_S^0(x) = \frac{1}{2x+1}. \quad (2)$$

Представим общее решение системы (1) как сумму стационарного решения (2) и малой нестационарной добавки:

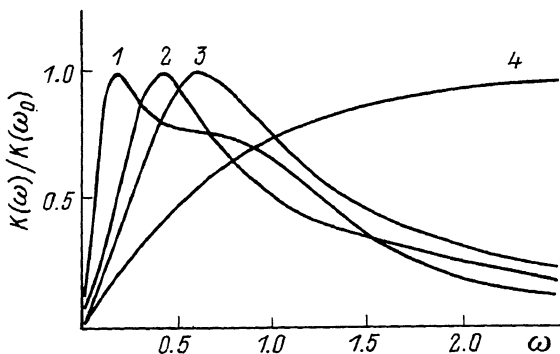


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика ВРМБ усилителя при сильном истощении накачки. 1 - $\gamma = 0.1$, $\mathcal{K}(\omega_0) = 12$; 2 - 0.5, 30; 3 - 1.0, 40; 4 - ∞ , 80. ω в относительных единицах (1).

$$\rho_1(x, t) = \rho_1^0(x) + \rho_1(x, t),$$

$$\rho_2(x, t) = \rho_2^0(x) + \rho_2(x, t),$$

(3)

$$E_s(x, t) = E_s^0(x) + e_s(x, t).$$

Линеаризация (1) по малым добавкам и применение метода Лапласа для решения систем линейных дифференциальных уравнений позволяет написать выражения для $\rho_1(x, t)$, $\rho_2(x, t)$ в виде:

$$\rho_1(x, t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{Z}^{-\alpha}}{2} \left[\alpha(s) (K_{\alpha+1}(\mathcal{Z}) + K_{\alpha}(\mathcal{Z})) + b(s) (I_{\alpha+1}(\mathcal{Z}) - I_{\alpha}(\mathcal{Z})) \right] \right\},$$

$$\rho_2(x, t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{Z}^{-\alpha}}{2} \left[\alpha(s) (K_{\alpha+1}(\mathcal{Z}) - K_{\alpha}(\mathcal{Z})) + b(s) (I_{\alpha+1}(\mathcal{Z}) + I_{\alpha}(\mathcal{Z})) \right] \right\},$$

где \mathcal{L}^{-1} - обратное преобразование Лапласа по параметру s , $\alpha = \frac{1}{2} \frac{\gamma'}{\gamma + s}$; $\mathcal{Z} = s(x + \frac{1}{2})$, $K_{\nu}(\mathcal{Z})$, $I_{\nu}(\mathcal{Z})$ - модифицированные функции Бесселя.

Коэффициенты $\alpha(s)$, $b(s)$ в (4) определяются из граничных условий для $\rho_1(x, t)$, $\rho_2(x, t)$:

$$\rho_1(0, t) = f_1(t),$$

$$\rho_2(L, t) = f_2(t),$$

(5)

где L — длина оптического волокна в относительных единицах (1); $f_1(t)$, $f_2(t)$ — заданные функции, модулирующие стационарные значения входных сигналов накачки и стока в волоконно-оптическом ВРМБ усилителе.

2. Пусть входными сигналами волоконно-оптического ВРМБ усилителя являются постоянный сигнал накачки и стоков сигнал средней интенсивности $P_2^0(L)$, промодулированный по гармоническому закону.

$$\begin{aligned} P_1(0, t) &= 1, \\ P_2(L, t) &= \frac{1}{2L+1} + \alpha \sin \omega t, \quad t > 0, \\ \alpha &\ll \frac{1}{2L+1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Процесс передачи по волокну гармонической составляющей стокового сигнала в этом случае описывается формулами (4) с граничными условиями (5) в виде:

$$\begin{aligned} P_1(0, t) &= 0, \\ P_2(L, t) &= \alpha \sin \omega t, \quad t > 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Считая длину оптического волокна достаточно большой ($L \gg 1$), получим из (4), (7) выражение для нестационарной добавки к постоянному стоковому сигналу на выходе из усилителя:

$$P_2(0, t) = \mathcal{K} \alpha \sin(\omega t + \varphi) + \mathcal{F}(t), \quad t > L. \quad (8)$$

Здесь $\mathcal{K} = |G(i\omega)|$; $\varphi = \arg G(i\omega)$; $\mathcal{F}(t) = \frac{1}{\pi} \text{Im} \int_{-\sigma_0 + i0}^{-\sigma_0 + i\infty} G(s) \frac{\omega e^{st}}{\omega^2 + s^2} ds \sim e^{-\sigma_0 t}$ ($\sigma_0 \approx \gamma$, при $\gamma < 1$, $\sigma_0 \approx 1$, при $\gamma > 1$); $G(s)$ — комплексная передаточная функция усилителя

$$G(s) = (2L+1)^{\alpha+1/2} \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{s} e^{s/2} (K_{\alpha+1}(s/2) + k_{\alpha}(s/2))} \quad \text{при } |s| > L^{-1}, \quad (9)$$

$$G(s) \rightarrow 2 \quad \text{при } |s| \rightarrow 0, \quad \alpha = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\gamma + s}.$$

При $t \rightarrow \infty$ второе слагаемое в (8) затухает и остается только первое слагаемое, которое описывает установившееся поведение системы. Коэффициент \mathcal{K} при этом определяет усиление гармонической составляющей стокового сигнала, а зависимость $\mathcal{K}(\omega)$ представляет собой амплитудно-частотную характеристику ВРМБ усилителя, работающего в режиме сильного истощения накачки.

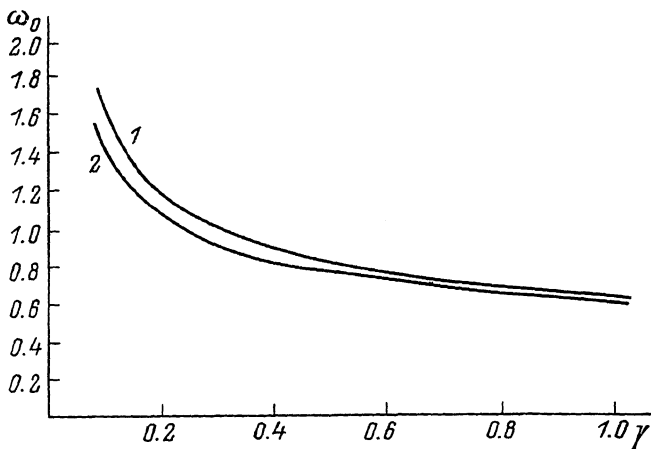


Рис. 2. Зависимость центральной частоты АЧХ усилителя (в единицах $\frac{1}{\tau_{3B}}$) от параметра γ . 1 - $L = 40$, 2 - 80.

На рис. 1 представлен ряд амплитудно-частотных характеристик ВРМБ усилителя $\mathcal{K}(\omega)$, полученных из (9) при $L = 40$ и различных значениях параметра γ . Хорошо видно, что при конечных значениях γ зависимость $\mathcal{K}(\omega)$ имеет ярко выраженный максимум на частоте $\omega_0 \sim \gamma$. При $\gamma \rightarrow 0$ или $\gamma \rightarrow \infty$ максимум на АЧХ усилителя постепенно размывается и исчезает.

На рис. 2 представлены зависимости центральной частоты АЧХ усилителя, приведенной к $\frac{1}{\tau_{3B}}$ от значения параметра γ , при $L = 40$ и $L = 80$. Из них, в частности, следует, что изменение длины усилителя в два раза не приводит к существенному сдвигу центральной частоты АЧХ. При $\gamma \geq 0.4$ центральная частота также слабо зависит от мощности накачки и определяется в основном временем релаксации гиперзвука в среде τ_{3B} .

Таким образом, нами показано, что волоконно-оптический ВРМБ усилитель в режиме сильного истощения накачки имеет наибольший динамический коэффициент усиления в области частот $\sim 1/\tau_{3B}$.

Это означает, что при ВРМБ в оптическом волокне истощение накачки приводит к сужению и смещению в область больших частот спектра выходного стоксового сигнала в сравнении со спектром, полученным в [3] для ВРМБ в „бегущем” режиме.

В заключение отметим, что АЧХ усилителя, полученные путем численного решения системы (1), и АЧХ, полученные из решения линеаризованной задачи (9), полностью совпадают в том случае, когда амплитуда гармонической добавки к входному стоксовому сигналу не превышает 80% от его постоянной составляющей.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кузин Е.А., Петров М.П., Ситников А.Э., Фотиади А.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 12. С. 2330-2335.
- [2] Бененсон З.М., Бункин Ф.В., Власов Д.В., Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В., Щебнев Е.Л., Яковлева Т.В. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42. В. 4. С. 164-167.
- [3] Дианов Е.М., Карасик А.Я., Лучников А.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 8. С. 1556-1561.
- [4] Кузин Е.А., Петров М.П., Фотиади А.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 2. С. 335-341.
- [5] Atkins C.C., Cotter D., Smith D.W., Wyatt R. // Electr. Lett. 1986. V. 22. N 10. P. 556-557.
- [6] Olsson N.A., Van Rev-Ziel J.P. // Electr. Lett. 1986. V. 22. N 10. P. 486-487.
- [7] Дианов Е.М., Пилипецкий А.Н., Серкин В.Н. // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 2. С. 397-404.
- [8] Coste J., Montes C. // Phys. Rev. A. 1986. V. 34. N 5. P. 3940-3949.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
4 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 11

12 июня 1989 г.

04; 11

КАТОДНЫЙ СЛОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ
С ДИФFUЗНОЙ ПРИВЯЗКОЙ ТОКА

А.В. Болотов, А.В. Козырев,
Ю.Д. Королев

Один из режимов горения катодного пятна в дуговых разрядах — режим диффузной привязки. Он реализуется при типичных плотностях тока на катоде $j = (10-10^3) \text{ A/cm}^2$ и высоких температурах поверхности T_k , обеспечивающих ток термоэмиссии по всей площади катодного пятна. Известно, что все металлы в отношении их способности работать в качестве термоэмиссионных катодов можно разделить на две группы [1]. К первой группе относятся тугоплавкие металлы W, Mo, Ta и т.п., у которых равновесный поток электронов термоэмиссии превышает поток испаряющихся атомов. Во вторую