ОГРАНИЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ОВФ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАССЕЯНИИ ВСЛЕДСТВИЕ НАСЫЩЕНИЯ

П.Б. Лернер

УДК 535.375.55

В работе представлена теория ограничения качества обращения волнового фронта при ВР из-за нарушения экспоненциального качества дискриминации нескоррелированных с накачкой мод.

Исследование качества обращения волнового фронта (ОВФ) при истощении накачки уже проводилось рядом авторов /1,2/. В этих работах рассматривалось формирование коэффициента усиления для мод, скоррелированных с накачкой, увеличенного по сравнению с коэффициентом усиления для невоспроизводящих мод. В данной работе представлена простая теория, позволяющая выделить эффект ухудшения качества обращения волнового фронта из-за падения качества дискриминации коррелированного с накачкой сигнала. Из-за истощения накачки область, в которой происходит интенсивное взаимодействие волн, сужается, а закон возрастания теряет экспоненциальную форму, известную из /3,4/:

$$I_c(0) = I_{corr}(0) \propto \exp(g_c I_L^0 L)$$

$$I_a(0) = I_{anticorr}(0) \propto \exp(g_a I_L^0 L) \tag{1}$$

$$g_c I_L^0 L \approx 25, \ g_c/g_a = 2, \ H = I_c/I_a \approx 10^5 .$$

Здесь I_c и I_a – соответственно интенсивность воспроизводящих и невоспроизводящих мод, I_L^0 – интенсивность накачки, g_c и g_a – коэффициенты усиления соответствующих мод. Возможны два механизма падения эффективности дискриминации невоспроизводящих мод. Один из них связан с тем, что эффективная длина области взаимодействия становится близкой к "длине спеклона" $\lambda(\Delta\vartheta_c)^{-2}$. Другой связан с нарушением закона роста сигнала (1) в условиях насыщения. Основная система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial I_a}{\partial z} = - g_a I_a I_L$$

$$\frac{\partial I_c}{\partial z} = - g_c I_c I_L \qquad (2)$$

$$\frac{\partial I_L}{\partial z} = - (g_a I_a + g_c I_c) I_L.$$

Как в обычной теории ВР назад граничные условия для I_c, I_a задаются при $z = L$, а для I_L при $z = 0$. Система (1) имеет два первых интеграла /5/:

$$I_L - I_c - I_a = \mathrm{const} = I_o \qquad (3а)$$

$$I_c^{-g_c/g_a} I_a = \mathrm{const} = I_R. \qquad (3б)$$

Величина $I_R = (I_a^0)^{g_c/g_a} I_o^{-1} \approx (I_a^0)^{g_c/g_a - 1} (\Delta\vartheta_a/\Delta\vartheta_c)^2$, где I_c^0, I_a^0 – граничные условия для соответствующих волн, а $\Delta\vartheta_a$, $\Delta\vartheta_c$ – их ширины угловых спектров (в случае затравки спонтанными шумами $\Delta\vartheta_a \approx 2\pi$).

Для отношения g_c/g_a мы примем значение $g_c/g_a = 2$. Условия применимости этого приближения при отсутствии насыщения подробно обсуждаются в /6/, и мы их касаться не будем, хотя они могут нарушаться при малых длинах образца или узком угловом спектре. Таким образом, мы получаем для точности обращения по крайней мере оценку сверху.

Применение двух первых интегралов (3) к системе (2) дает:

$$\int^{L} \frac{dI_a}{I_a (I_a^2/I_R + I_a + I_o)} = - gL, \; g = g_a. \qquad (4)$$

Легко видеть, что при $I_R \to \infty$ (одной из волн нет) это приводит к обычной теории ВР.

Рассмотрим обратный случай – глубокое насыщение. Знак выражения $1 - 4I_o/I_R$ определяет, действительны или комплексны корни уравнения $I_a^2/I_R + I_a + I_o = 0$. Случай действительных корней и $4I_o/I_R < 1$ практически неинтересен в случае затравки спонтанными шумами, поскольку он мог бы реализоваться только при $\Delta\vartheta_c < 10^{-5}$, что нереалистично, однако условия применимости этого приближения сильно ослабляются в случае ограниченного углового спектра затравки. Итак, в случае $4I_o/I_R \approx 1$ (когда $1 - 4I_o/I_R$ – малый параметр) имеем:

$$I_a = 0{,}5 I_R \frac{1 - gI_o z - \mu}{\mu + gI_o z},$$

где μ, I_o – неопределенные пока константы. То, что $gI_oL < 1$, не должно нас удивлять, поскольку процесс усиления в этом случае развивается неэкспоненциальным, "взрывным" образом /7/. Из граничного условия при $z = L$ следует выражение для связи μ и I_o:

$$I_o = (gL)^{-1} [((I_R/I_a^0) + I_R) - \mu].$$

Интеграл (3б) сразу дает выражение для параметра дискриминации через μ:

$$H = I_c(z = 0)/I_a(z = 0) = (1 - \mu)/2\mu.$$

Из граничного условия при $z = 0$ получается кубичное уравнение на μ:

$$I_L^0 + I_R \left[\frac{1-\mu}{2\mu} + \left(\frac{1-\mu}{2\mu} \right)^2 \right] = (gL)^{-1} \left(\frac{I_R}{2I_a^0 + I_R} - \mu \right).$$

Приближенное решение в этом случае приводит к выражению

$$H \approx \sqrt{I_L^0/I_R^0 - (gLI_R)^{-1}} \lesssim \sqrt{I_L^0/I_a^0}(\Delta\vartheta_c/\Delta\vartheta_a). \qquad (5)$$

Случай комплексных корней в знаменателе (4) рассматривается аналогично. Это приближение естественно тогда, когда $I_a/I_R \gg 1$, причем I_o и μ связаны выражением

$$I_a^0 = \frac{I_R \mu \exp(-2gI_oL)}{[1 - I_R I_o^{-1} \exp(-2gI_oL)]^{1/2}}.$$

Параметр дискриминации коррелированной волны имеет вид:

$$H = \mu/\sqrt{1 - I_R \mu/I_o}, \qquad (6)$$

а граничное условие (трансцендентное уравнение на μ) на переднем конце приближенно выглядит так:

$$I_L^0 = (gL \ln G)^{-1} + I_R \mu (1 - \mu g I_R \ln G)^{-1/2} + I_R^2 \mu^2 (1 - \mu g I_R \ln G)^{-1},$$

$$G = I_R (I_a^0)^{-1} \mu.$$

Оценка сверху на H из (6), ($H \gg 1$) приводит также к формуле (5): $H \lesssim (\Delta\vartheta_c/\Delta\vartheta_a)(I_L^0/I_a^0)^{1/2}$. Типичные значения параметров $I_L^0/I_a^0 \approx e^{25} \approx 10^{10}$, $\Delta\vartheta_c \approx 10^{-3}$ рад и $\Delta\vartheta_a \approx 2\pi$ дают $H \lesssim 10^1$, тогда как для ненасыщенного случая справедлива оценка (1).

В сделанных предположениях для отражения назад при $I_L^0 \to \infty$ приближенно справедливо условие линейного роста сигналов ОВФ, соответствующего результатам для насыщения ВР /8/.

Поступила в редакцию 11 апреля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Бельдюгин, Е.М. Земсков, Квантовая электроника, 5, 2055 (1978).
2. Г.Г. Кочемасов, В.Д. Николаев, Квантовая электроника, 6, 1960 (1979).
3. В.Г. Сидорович, ЖТФ, 46, № 10, 2168 (1976).
4. Б.Я. Зельдович, В.В. Шкунов, Квантовая электроника, 4, 1020 (1977).
5. R.L. Berger, Phys. Rev. Lett., 51, 1554 (1983).
6. Б.Я. Зельдович, Квантовая электроника, 5, 36 (1978).
7. М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков, Теория волн . "Наука" М., 1979 г.
8. C.L. Tang, J. Appl. Phys., 37, № 8, 2945 (1966).