

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОМ СМЕШЕНИИ ВПЕРЕД

И.Н. Кожевникова

Предложен и обоснован метод компенсации нелинейных искажений, обусловленных самовоздействием опорных волн накачки в схеме обращения волнового фронта при четырехволновом смешении вперед.

Разработка и исследование новых схем обращения волнового фронта (ОВФ) представляет несомненный интерес. Сравнительно недавно была предложена /1/ и осуществлена экспериментально /2/ схема ОВФ, в которой используется нелинейное взаимодействие четырех пучков при их попутном, неколлинеарном и некомпланарном распространении (попутное четырехволновое смешение – ПЧВС). Пусть в нелинейной среде распространяются три неколлинеарных пучка (два – опорные и один – сигнальный). За счет записи в среде динамических голограмм и дифракции на них происходит возникновение четвертого пучка, амплитуда которого комплексно сопряжена к амплитуде сигнального, а направление его распространения не совпадает ни с одним из трех исходных пучков. Путем подбора соответствующих интенсивностей опорных волн и геометрии задачи можно добиться высокой эффективности преобразования энергии опорных волн в сопряженный сигнал. Одним из эффектов, ограничивающих коэффициент преобразования, является самовоздействие опорных волн. Ниже приведен теоретический расчет одного из способов компенсации нелинейных искажений в схеме с ПЧВС, вызванных самовоздействием волн накачки.

Рассмотрим схему ПЧВС (рис.1), в которой плоские опорные волны E_1 и E_3 одинаковой частоты ω попутны (k_1 и k_3 – их волновые вектора) и распространяются в нелинейной среде (L) под небольшим углом a к некоторому общему направлению: $\theta_{NL} \leq a \ll 1$, где $\theta_{NL} = (n_2 |E_1|^2 / n_0)^{1/2}$ – характерный угол взаимодействия попутных волн, $n = n_0 + n_2 |E_1|^2 / 2$ – показатель преломления для керровской среды. Допустимые направления волнового вектора k_2 сигнала E_2 , удовлетворяющие условию синхронизма, при $\omega_2 = \omega$ лежат на конусе с углом a при вершине. Получающийся при ПЧВС сопряженный сигнал $E_4 \propto \propto n_2 E_1 E_2 E_3^*$ имеет направление k_4 на том же конусе, симметричное направлению k_2 относительно оси конуса /2/.

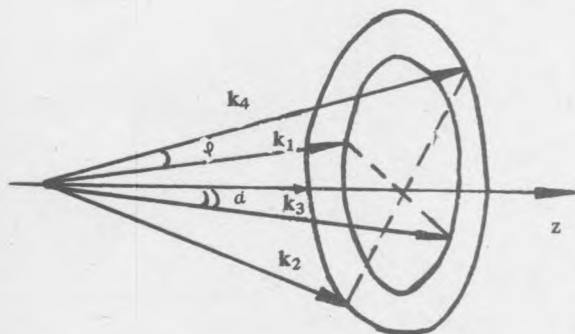


Рис. 1. Геометрия волновых векторов при попутном четырехволновом смешении.

Для среды с локальной безынерционной кубической нелинейностью в квазистационарном приближении (время релаксации нелинейности $\tau_{NL} \ll L/c \ll \tau_H$, τ_H — длительность импульсов сигнальной и опорных волн) уравнения для комплексных амплитуд имеют вид:

$$\frac{dE_1}{dz} - i\gamma_1 \left[\sum_{j=1}^4 |E_j|^2 - |E_1|^2/2 \right] E_1 + E_2 E_3^* E_4 e^{i\Delta k z} = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$E_1(0) = E_{10}; \quad E_2(0) = E_{20}; \quad E_3(0) = E_{30}; \quad E_4(0) = 0. \quad (2)$$

Здесь E_j — комплексные амплитуды попутных волн (j меняется от 1 до 4), нормированные на максимальное значение амплитуды опорной волны E_{10} , z — направление синхронизма, $\gamma_j = |k_j| n_2 E_{10}^2 / 2n_0$, $\Delta k = k_1 - k_2 + k_3 - k_4$ — отстройка от направления синхронизма. Остальные уравнения получаются путем циклической перестановки индексов (компоненты пронумерованы по кругу). В случае вырождения частот ($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega$) система (1) имеет интеграл:

$$\frac{\gamma}{2} \left[\sum_{j=1}^4 |E_j|^2 \right]^2 - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 |E_j|^4 + \gamma (E_1 E_2^* E_3 E_4^* e^{i\Delta k z} + \text{к.с.}) + |\Delta k| |E_4|^2 = \text{const}. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что при отсутствии истощения опорных волн E_1 и E_3 (т.е. если пренебречь вторым слагаемым в левой части (3)) для компенсации самовоздействия необходимо ввести в систему дополнительную расстройку $\Delta k \neq 0$.

Решение системы (1) с граничными условиями (2) без учета самовоздействия сигнальных волн получаем, воспользовавшись интегралами: $|E_1|^2 + |E_3|^2 = C_1$; $|E_2|^2 - |E_4|^2 = C_2$. В этом случае коэффициент обращения

$$M = (|E_4|_{z=L}^2 / |E_2|_{z=0}^2)^{1/2} = (4|E_{10} E_{30} \gamma / \Gamma) \text{sh}(\Gamma L / 2),$$

где $\Gamma = [(4|\gamma E_{10} E_{30}|)^2 - (|\Delta k| - \gamma I_0)^2]^{1/2}$, $I_0 = |E_{10}|^2 + |E_{30}|^2$ — суммарная интенсивность опорных волн. В случае точного синхронизма ($\Delta k = 0$) при $E_{10} = E_{30} = 1$ имеем $\Gamma = \sqrt{3}\gamma$, т.е. для данной системы инкремент неустойчивости в $\sqrt{3}$ раз превышает максимальный инкремент неустойчивости плоского пучка.

Заметим, что коэффициент обращения имеет максимальное значение при $|\Delta k|_{\text{opt}} = \gamma I_0$. Следовательно, для компенсации самовоздействия (т.е. для увеличения коэффициента преобразования энергии в обращенную волну) в систему необходимо ввести волновую расстройку $\Delta k = \Delta k_{\text{opt}}$. Один из методов введения волновой расстройки — отклонение сигнальной волны E_2 от направления синхронизма. В этом случае волновой вектор k_2 лежит на конусе с углом при вершине $\alpha' = \alpha + \varphi_{\text{opt}}$ и величина этого отклонения

$$\varphi_{\text{opt}} = n_2 |E_{10}|^2 / n_0 = \theta_{NL}. \quad (4)$$

При введении в систему оптимальной волновой расстройки коэффициент обращения достигает максимального значения:

$$M = \text{sh}(|\gamma E_{10} E_{30}| / 2).$$

Оценим оптимальный угол отклонения φ_{opt} по формуле (4), воспользовавшись данными [2], где в качестве нелинейной среды был взят сероуглерод ($n_2 = 5 \cdot 10^{-11}$ см³/эрг, $n_0 = 1,5$), опорные импульсы накачки имели энергию 1 Дж и длительность $\tau = 20 \div 60$ нс, начальный диаметр пучков составлял 2,2 мм. При $\alpha = 6 \div 15$ мрад угол оптимальной отстройки φ_{opt} составляет $0,2 \div 0,5$ мрад.

Автор благодарна Ф.В. Бункину за полезные обсуждения в ходе работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев В. Д., Хижняк А. И. Оптика и спектроскопия, 53, 723 (1982).
2. Большов Л. А., Власов Д. В., Гараев Р. А. Квантовая электроника, 9, 83 (1982).
3. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М., Наука, 1985.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 18 июня 1986 г.