

УДК 621.365.825

К.Ю. Никитенко, В.А. Трофимов

ОВФ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВСТРЕЧНОМ НЕКОЛЛИНЕАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДИФРАГИРУЮЩИХ ГАУССОВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В СРЕДАХ С КЕРРОВСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ. Ч. 2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Анализируются эффективность и качество ОВФ при четырехволновом встречном неколлинеарном взаимодействии дифрагирующих световых пучков. Обнаружено развитие нестационарных (периодических) процессов изменения характеристик взаимодействия. Обсуждается природа их появления. Показано, что принципиальную роль в их развитии играет самовоздействие световых пучков. Правильность полученных результатов оценивается с помощью спектрального анализа характеристик взаимодействующих волн.

Введение

В первой части настоящей статьи проведен анализ развития конвективной неустойчивости в системе встречных неколлинеарно распространяющихся волн. В линейном приближении получены результаты, при которых такая неустойчивость имеет место. В то же время известно, что при ЧВВ в условиях сильного нелинейного взаимодействия световых пучков могут проявляться осциллирующие режимы, вызванные другими физическими факторами, например взаимной перекачкой энергии волн.

Во второй части статьи методом численного моделирования анализируется влияние физических факторов (самовоздействия, перекачки световой энергии) и неколлинеарности распространения на возникновение абсолютной неустойчивости и изучается ее механизм.

1. Результаты численных экспериментов

В процессе численных экспериментов нас будет интересовать эволюция положения центра пучка

$$X_C(z, t) = \int_0^{L_x} (x - X_C(0, t)) |A(z, x, t)|^2 dx / P(z, t);$$

$$P(z, t) = \int_0^{L_x} |A(z, x, t)|^2 dx, \tag{1}$$

качества ОВФ

$$\chi = \sqrt{\int_0^{L_x} |A_3 A_4|^2 dx / P_3 P_4} \Big|_{z=0}, \tag{2}$$

максимальной интенсивности пучка, достигаемой в сечении L_z :

$$I_m(z, t) = \max_x |A_m(z, x, t)|^2, \tag{3}$$

и поперечная координата ее достижения $X_m(z, t)$, коэффициента отражения по мощности

$$R_M = P_4(0, t) / [P_3(0, t)], \tag{4}$$

коэффициента отражения по максимуму интенсивности

$$R_{I_{max}} = I_{m,4}(0, t) / [I_{m,3}(0, t)]. \tag{5}$$

Так как в ходе численных экспериментов обнаружено, что процесс взаимодействия носит существенно нестационарный характер и комплексные амплитуды взаимодействующих волн и введенные выше характеристики взаимодействия осциллируют с различными пространственными и временными масштабами, то для контроля точности получаемых результатов большое внимание уделялось их спектральному анализу. Необходимость такого контроля следует из того очевидного факта, что решение, полученное на пространственной и временной сетках с характерными масштабами τ и h , адекватно описывает решение исходной дифференциальной задачи, в частности, и при условии, что амплитуды пространственных и временных гармоник, превышающих некоторый номер N_0 , в процесс расчетов равны нулю. Другими словами, фильтрующее действие разностной сетки не должно исказить спектр решения дифференциального уравнения. С этой целью численное решение и перечисленные выше характеристики взаимодействия представлялись в виде рядов Фурье по пространству и времени вида

$$f(m) = \sum_{n=0}^N a_n \cos \frac{\pi n h m}{L} + b_n \sin \frac{\pi n h m}{L}, 0 \leq m \leq M, \tag{6}$$

где a_n, b_n – коэффициенты разложения; M – номер максимальной гармоники; $2*L$ – размер соответст-

вующей области по координате разложения и времени; h – шаг сетки по ней.

Критерием адекватного описания происходящих процессов является стремление к нулю коэффициентов разложения $a_n \rightarrow 0$ ($b_n \rightarrow 0$), начиная с некоторого значения $n = N_0$. При этом они вычисляются по формулам

$$a_n(b_n) = \frac{2}{L} \sum_{m=0}^N f(m) \cos \frac{\pi n h m}{L} \left(\sin \frac{\pi n h m}{L} \right). \quad (7)$$

Здесь $f(m)$ – значение функции в точке m сетки.

Численные эксперименты проводились для следующих значений параметров:

$$\gamma = -12, -17, -20; L_X = 14; L_Z = 0,25;$$

$$R_0 = 1; R_m = 10; \beta = 0,05; D = 0,1. \quad (8)$$

Учитывая вышеизложенное, нами выбирались следующие значения узлов по поперечной (N_X) и продольной (N_Z) координатам:

$$N_X = 650, N_Z = 81. \quad (9)$$

В этом случае для рассматриваемого интервала значений коэффициента нелинейности амплитуды гармоник с большими номерами обращались в нуль с высокой точностью, что обеспечивало адекватное описание эволюции пространственного и временного спектров взаимодействующих волн.

Цель проведения экспериментов заключалась в выявлении роли неколлинеарности распространения, самовоздействия и перекачки энергии в развитии осциллирующих режимов изменения характеристик взаимодействия.

При численном моделировании уравнений (1), (2) в ч. 1 использовались нелинейные консервативные разностные схемы [1,2], имеющие второй порядок точности по пространственным и временной переменным.

Заметим, что, как показывает проведенное в [3, 4] моделирование попутного взаимодействия четырех волн, обратная перекачка энергии (из сигнальной и обращенной волн в волны накачек) происходит, если набег фазы превышает 3–4 единицы нелинейных длин. В исследуемой здесь ситуации, вплоть до значений $\gamma = -10$ и $\beta = 0$, он не превышает 2,5, поэтому влияние обратной перекачки энергии для параметров (8) при $|\gamma| > 16$ сказывается на развитии автоосцилляций.

Проанализируем сначала временную эволюцию максимальной интенсивности обращенной волны на выходе из среды $I_m(0, t)$ (рис. 1).

На рис. 1,а,б,в представлена динамика изменения максимальной интенсивности при трех значениях мощности пучка. Заметим, что для наименьшего значения $|\gamma|$ после переходного процесса устанавливается стационарное значение макси-

мальной интенсивности. При этом в случае неколлинеарного взаимодействия достигается большее значение выходной интенсивности. С ростом начальной мощности пучка до $|\gamma| = 17$ происходит развитие осцилляций. В случае наклонного падения оно происходит раньше во времени. При дальнейшем увеличении мощности пучка осцилляции приобретают сложный характер: в них присутствует несколько различных периодических процессов. Частота осцилляций возрастает со временем.

Для выявления причины развития осцилляций на рис. 1,з,д представлены зависимости интенсивности отраженной волны при моделировании взаимодействия световых пучков без учета их самовоздействия (слагаемые F_{sj} в (1) ч. 1 отсутствуют). Сравнение этих рисунков с рис. 1,а,б,в показывает, что основным механизмом возникновения осцилляций при ЧВВ является перекачка энергии взаимодействующих волн. При этом следует отметить, что неколлинеарность взаимодействия приводит к снижению амплитуды осцилляций и частоты колебаний максимума интенсивности. Подчеркнем, что при коллинеарном взаимодействии для $|\gamma| = 17$ реализуется бистабильная зависимость значения максимальной интенсивности во времени (см. рис. 1,з).

Подтверждение выводов о наиболее существенном факторе, влияющем на возникновение неустойчивости, дают и расчеты, проведенные без учета перекачки энергии взаимодействующих волн (слагаемые F_{cj} в (1) ч. 1 отсутствуют). Рис. 1,е,ж показывает существенное уменьшение частоты осцилляций выходной интенсивности отраженного пучка. Однако неколлинеарность взаимодействия в данном случае приводит к более сильным осцилляциям по сравнению со случаем встречного взаимодействия волн.

Аналогичным образом ведут себя и другие характеристики взаимодействия – качество обращения, коэффициенты отражения по мощности и интенсивности. Для примера на рис. 2 представлена динамика качества обращения. Как следует из анализа рисунка, неколлинеарность взаимодействия приводит к увеличению амплитуды и частоты осцилляций этой характеристики. Заметим, что при отсутствии перекачки энергии взаимодействующих волн (просто встречное распространение) неколлинеарность распространения не оказывает влияния на качество обращения. В случае отсутствия самовоздействия (длина взаимодействия много больше нелинейной длины) при коллинеарном взаимодействии осцилляции качества могут практически исчезать (рис. 2,в): их амплитуда в квазистационарном режиме весьма мала. В то же время неколлинеарность процесса взаимодействия приводит на начальном этапе к увеличению амплитуды осцилляций, а затем к выходу χ на режим с более быстрым изменением качества обращения и более высоким средним уровнем его осцилляций.

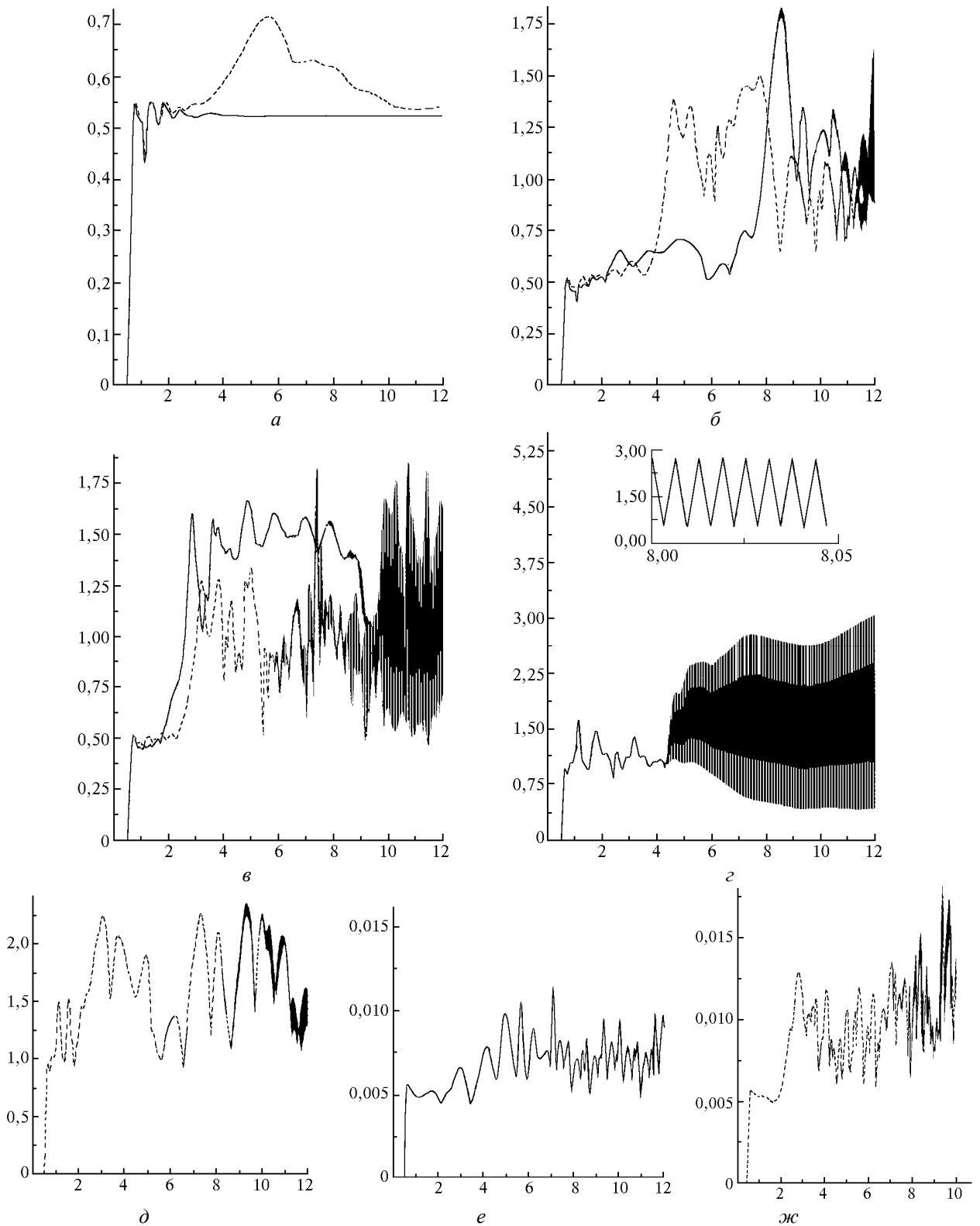


Рис. 1. Динамика изменения интенсивности отраженной волны на выходе из нелинейной среды при коллинеарном (сплошная кривая) и неколлинеарном взаимодействии ($\beta = 0,5$) (пунктир) для $\gamma = -12$ (а), -17 (б), -20 (в) и учета самовоздействия и перекачки энергии; з, д соответствуют коллинеарному (з) и неколлинеарному ($\beta = 0,5$) (д) взаимодействию без учета самовоздействия пучков для $\gamma = -17$; е, ж соответствуют случаю взаимодействия волн без учета их перекачки для коллинеарного (е) и неколлинеарного ($\beta = 0,5$) (ж) взаимодействия при $\gamma = -17$

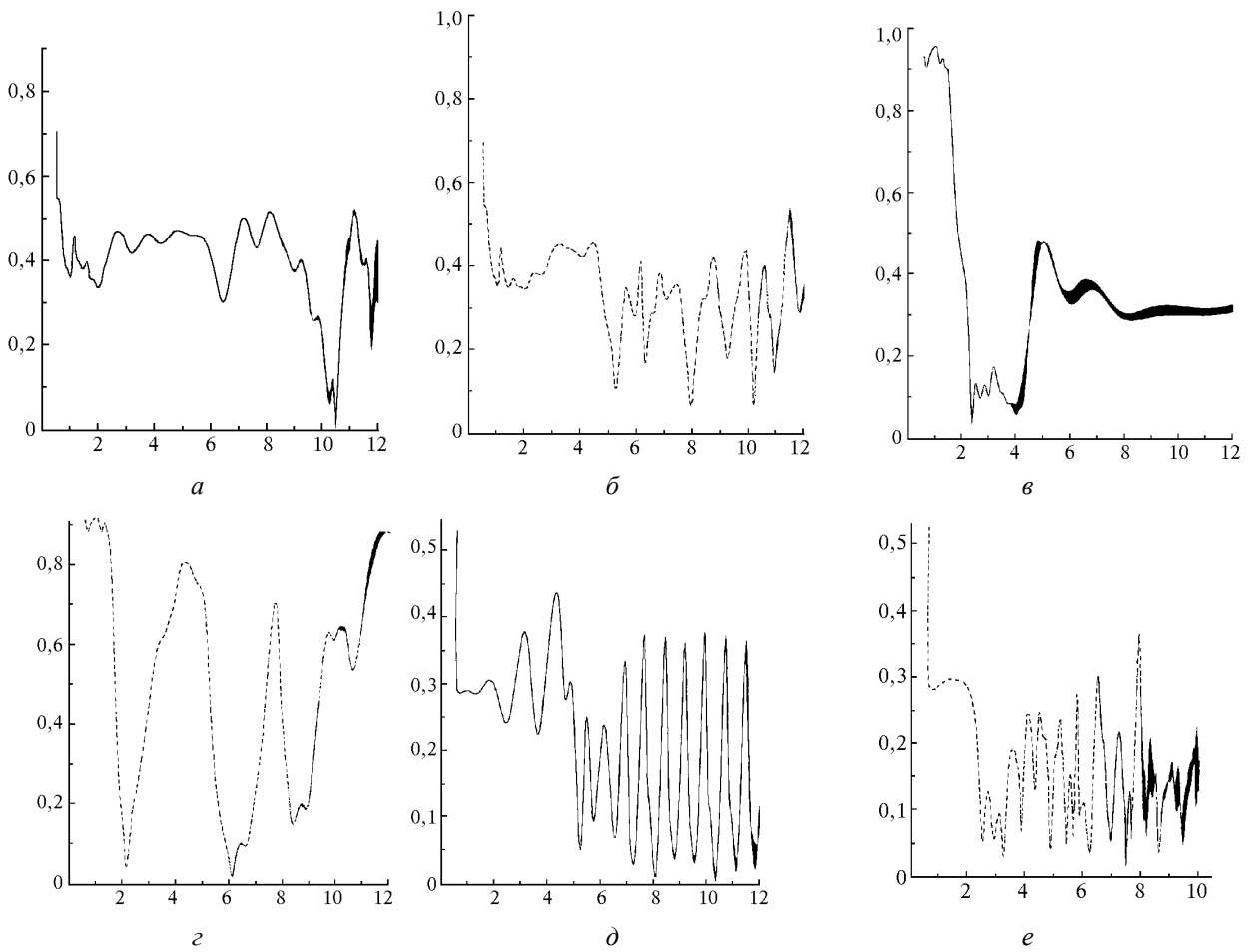


Рис. 2. Динамика изменения качества ОВФ при коллинеарном (а) и неколлинеарном взаимодействии (б) при $\gamma = -17$ в случае учета самовоздействия и перекачки энергии; в, з соответствуют коллинеарному (в) и неколлинеарному ($\beta = 0,5$) (з) взаимодействию без учета самовоздействия при $\gamma = -17$; д, е соответствуют коллинеарному (д) и неколлинеарному ($\beta = 0,5$) (е) взаимодействию без учета перекачки при $\gamma = -17$

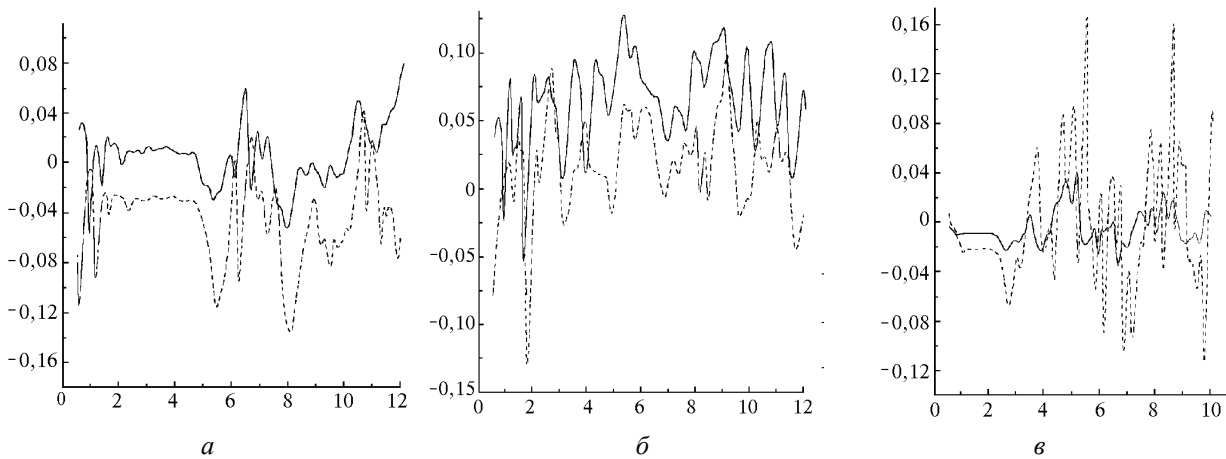


Рис. 3. Динамика изменения центра падающего сигнала пучка (сплошная кривая) в сечении $z = L_z$ и обращенного (пунктир) в сечении $z = 0$ при $\gamma = -17$, $\beta = 0,5$ для полного варианта (а), в случае без учета самовоздействия пучков (б) и в случае без перекачки (в)

Изменения коэффициентов отражения по мощности и интенсивности также имеют сложный характер. Максимальное значение R_M достигает 92, минимальное 70 (для $\beta = 0$), 75 (для $\beta = 0,5$). Коэффициент отражения по интенсивности изменяется в пределах $50 \div 150$ ($\beta = 0$), $40 \div 185$ ($\beta = 0,5$). Следовательно, локальные характеристики пучка более чувствительны к геометрии взаимодействия, и неколлинеарность взаимодействия может их существенно повысить. Интегральные характеристики менее чувствительны. Важно подчеркнуть, что без учета же самовоздействия коэффициент отражения по интенсивности существенно возрастает как в минимуме (до 100), так и в максимуме (до 240) по сравнению со случаем ОВФ с самовоздействием, причем неколлинеарность приводит к усилению осциллирующих режимов.

В случае неколлинеарного взаимодействия волн испытывает осцилляции и положение центра пучков (рис. 3). При этом в случае учета и самовоздействия и перекачки энергии волн (рис. 3,а) центры падающего менее мощного 3-го и отраженного 4-го пучков осциллируют с меньшей частотой и амплитудой по сравнению со случаем без самовоздействия (рис. 3,б) и без перекачки (рис. 3,в). Следует подчеркнуть, что во всех трех случаях центр падающего пучка может находиться выше центра отраженного, причем в случае без самовоздействия он находится выше большую часть времени взаимодействия. Самовоздействие пучков оказывает наибольшее влияние на осцилляции положения центра тяжести, поскольку в этом случае значения амплитуды осцилляций и их частоты гораздо выше, чем при учете только перекачки энергии или при учете обоих факторов. В заключение отметим, что для более мощных 1-го и 2-го пучков осцилляции центра тяжести также имеют место и выражены еще более ярко, причем амплитуды ос-

цилляций центра могут превышать амплитуды осцилляций центра менее мощных пучков почти в 4 раза.

2. Выводы

Процесс неколлинеарного встречного ЧВВ носит существенно нестационарный характер. Для его адекватного описания необходимо использовать нестационарные уравнения. Так как в процессе встречного взаимодействия волн, как правило, реализуются сложные пространственно-временные осциллирующие процессы, то при его моделировании необходимо контролировать спектральный состав полученного в численных экспериментах распределения интенсивности.

Основная причина развития нестационарных процессов при ЧВВ обусловлена взаимной перекачкой энергии взаимодействующих волн. Неколлинеарность распространения пучков может как сглаживать осцилляции из-за перемешивания лучей, так и, наоборот, усиливать их.

Развитие осцилляций характеристик взаимодействия и их максимальные значения критичны по отношению к мощности взаимодействующих пучков: они появляются при превышении начальной мощностью пучка накачки некоторого характерного значения. В случае слабого взаимодействия энергетический центр обращенной волны может находиться ниже центра сигнального пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 95-02-04448).

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
2. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. Математическое моделирование в нелинейной оптике. М.: Изд-во МГУ, 1989. 159 с.
3. Сухоруков А.П., Титов В.Н., Трофимов В.А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 10. С. 1089.
4. Сухоруков А.П., Титов В.Н., Трофимов В.А. // Известия АН СССР. Сер. Физ. 1990. Т. 54. N 6. С. 1099–1103.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
4 августа 1998 г.

K.Yu. Nikitenko, V.A. Trofimov. WFI and Instability during Incollinear Counter-Interaction of Diffracting Gaussian Light Beams within Media with Kerr Nonlinearity. Part II. Numerical Experiment.

An efficiency and a quality of WFI at four-wave incollinear counter-action of diffracting nonstationary (periodic) processes during a change of interaction characteristics has been found. A nature of the processes appearance is under discussion. The light beams selfaction is shown to play therewith a principal role. A validity of the obtained results has been estimated by means of spectral analysis of interacting waves characteristics.