

ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПРЕЛОМЛЕНИЕМ

Касумова Рена Джумшуд кызы

профессор, Бакинский государственный университет, Азербайджан, Баку

Сафарова Гюльнара Арастун кызы

старший научный сотрудник, Бакинский государственный университет, Азербайджан, Баку

Ахмадова Асмар Расим кызы

докторант, Бакинский государственный университет, Азербайджан, Баку

Амиров Шахмардан Шахбаз оглы

доцент, Университет Хазар, Азербайджан, Баку

FOUR-WAVE INTERACTION IN NEGATIVE REFRACTION MEDIA

Rena Kasumova,

professor, Baku State University, Azerbaijan, Baku

Gulnara Safarova

senior researcher, Baku State University, Azerbaijan, Baku

Asmar Ahmadova,

doctoral candidate, Baku State University, Azerbaijan, Baku

Shahmardan Amirov

associate professor, Khazar University, Azerbaijan, Baku

Аннотация. В работе с учетом изменения фаз всех взаимодействующих волн рассмотрен параметрический четырехволновой процесс для встречных волн в кубичной среде, являющейся «левой» для сигнальной волны. Получено, что в метаматериалах определяющую роль в процессе усиления обратной сигнальной волны играет как полная длина метаматериала, так и уровень интенсивностей всех трех прямых волн. Определено оптимальное значение фазовой расстройки, выбор которого позволяет получить максимум преобразования на требуемой частоте.

Abstract. In this paper the four-wave parametrical interaction of counter propagating waves has been considered by taking into account the phase changes of all interacting waves in the cubic nonlinear medium, which possesses negative refraction index at a frequency of a signal wave. It

was obtained that in metamaterials both the total length of the metamaterial and the intensities of all three direct waves play a decisive role in the process of amplification of the reverse signal wave. Optimum values of phase detuning the choice of which has allowed to obtain maximum efficiency of conversion at a desired frequency have been determined.

Ключевые слова: четырехволновое взаимодействие; метаматериал; отрицательная рефракция; приближение заданной интенсивности.

Keywords: four-wave interaction; metamaterial; negative refraction; constant-intensity approximation.

Метаматериал можно создать из композитного материала, образованного из диэлектрической матрицы, с включениями, обеспечивающими резонансные свойства материала. В работе [1] сообщается о получении композитных структур, у которых диэлектрическая восприимчивость

третьего порядка находится в интервале $\chi^{(3)} \sim 10^{-9} \div 10^{-8}$ ед. СГСЭ. Для сравнения величина $\chi^{(3)}$ в кристаллах составляет величину $10^{-14} \div 10^{-12}$ ед. СГСЭ, в стеклах равна $10^{-14} \div 10^{-11}$ ед. СГСЭ, а в полимерах равна $10^{-12} \div 10^{-8}$ ед. СГСЭ.

Как известно, при вырожденном четырехволновом взаимодействии наблюдается эффект обращения волнового фронта лазерного излучения, когда среда играет роль нелинейного зеркала [2]. Аналогично ведет себя нелинейная среда в случае генерации гармоники в метаматериале, когда максимум интенсивности гармоники достигается не на выходе, а на входе в нелинейную среду волны накачки. Подобный результат объясняется встречной геометрией в метаматериале волны накачки и гармоники, когда перенос энергии волны, для которой среда является «левой», происходит в направлении противоположном ее фазовой скорости. Геометрия встречного взаимодействия нелинейных оптических волн, наблюдаемая в метаматериалах, встречается при параметрическом взаимодействии в традиционных нелинейных средах.

Четырехволновое взаимодействие в метаматериалах было рассмотрено в ряде работ, например, в [3-4]. Согласно [4] четырехволновое взаимодействие в среде с отрицательным показателем преломления было экспериментально реализовано в слоистой наноструктуре метал-диэлектрик-метал. Как показывают результаты экспериментальных разработок метаматериалов перестройка частоты сигнальной волны при этом происходит в малом интервале частот, в пределах которого обеспечивается отрицательное значение показателя преломления. Изучение в приближении заданной интенсивности четырехволнового взаимодействия было проведено нами в [5], а трехволнового параметрического взаимодействия при высокочастотной и низкочастотной накачках в [6-7]. В настоящей работе предлагаются результаты исследования встречного взаимодействия нелинейных оптических волн при четырехволновом смещении в метаматериалах.

Рассмотрение проводится для нелинейного процесса третьего порядка, связывающего четыре

волны на частотах ω_j ($j=1 \div 4$), из которых две сильные волны накачки (на частотах ω_3 и ω_4). Считаем, что среда является «левой» только на частоте сигнальной волны ω_1 , т.е. среда принимает отрицательные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей на этой частоте и положительные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей на частотах ω_2 , ω_3 и ω_4 . Таким образом, рассматриваемые при четырехволновом

взаимодействии семь векторов волн, т.е. $k_{1,2,3,4}$ и $S_{2,3,4}$, противоположны вектору
Пойнтинга S_1 обратной сигнальной волны.

В случае метаматериала, решая известную систему укороченных уравнений в рамках приближения заданной интенсивности, т. е. при выполнении равенства

$I_{2,3,4}(z) = I_{2,3,4}(z=0) = I_{20,30,40}$, получаем однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 A_1}{dz^2} + (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4 - \delta_1 - i\Delta) \frac{dA_1}{dz} + [\gamma_1 \gamma_2 I_{30} I_{40} - \gamma_1 \gamma_3 I_{20} I_{40} - \gamma_1 \gamma_4 I_{20} I_{30} - \delta_1 (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4 - i\Delta)] A_1 = 0 \quad (1)$$

где $I_j = A_j \cdot A_j^*$. Решение которого это выражение для комплексной амплитуды сигнальной волны при ее распространении справа налево в метаматериале в общем случае, когда начальные значения всех четырех волн отличны от нуля, т.е. на входе и справа, и слева в среду присутствуют все четыре волны.

Анализ динамики взаимодействия в «левой» среде показывает следующее. Основное отличие поведения сигнальной волны от поведения попутных волн в обычной кубичной нелинейной среде связано со встречным направлением скорости переноса энергии сигнальной волны по отношению к ее фазовой скорости. Данное утверждение приводит к зависимости поля сигнальной волны через граничные условия от полной толщины метаматериала, что подтверждает выражение (4). В процессе распространения волн в нелинейной среде в результате нелинейного взаимодействия происходит энергообмен между встречными волновыми пакетами двух типов волн: прямых волн (волн накачки и слабой волны на частоте

ω_2) и обратной волны (сигнальной волны). В результате чего имеет место перекачка

энергии волн накачек и волны на частоте ω_2 в энергию сигнальной волны. Эффективность данного процесса зависит от фазового соотношения между взаимодействующими волнами.

В работе проанализированы три важных параметра, определяющих динамику процесса усиления и эффективности преобразования в метаматериале при четырехволновом взаимодействии. Для этого был введен коэффициент усиления сигнальной волны,

$$\eta_{\text{ampl}} = \frac{I_1(z=0)}{I_{1\ell}}$$

определяемый как , эффективность преобразования, которую

$$\eta_1 = \frac{I_1(z)}{I_{20}}$$

определим как , и коэффициент отражения нелинейного зеркала, роль которого выполняет метаматериал.

Таким образом, как следует из анализа взаимодействия волн в метаматериале в приближении

$$\eta_{\text{ampl}}(z)$$

заданной интенсивности в условиях фазового синхронизма поведение отличается от традиционного поведения данной зависимости в обычной среде. Коренное отличие в поведении зависимостей для “правых” и “левых” сред заключается, как отмечалось выше, в членах, связанных с полной толщиной метаматериала. Последнее связано со специфическими граничными условиями для “левой” волны. Схожая картина получена при анализе в приближении неистощенной накачки. Однако в отличие от приближения заданного поля в приближении заданной интенсивности получено, что месторасположение экстремумов интенсивности сигнальной волны зависит не только от интенсивностей волн накачки, но и от интенсивности прямой слабой волны на частоте ω_2 .

Таким образом, в работе дан анализ в приближении заданной интенсивности четырехволнового параметрического взаимодействия в кубичной нелинейной среде, являющейся «левой» для сигнальной волны. Согласно полученным в работе аналитическим выражениям, можно рассчитать ожидаемые значения для таких практически важных параметров взаимодействия, как коэффициент усиления, эффективность преобразования в метаматериале и коэффициент отражения для каждого конкретного условия эксперимента.

Список литературы:

1. Olivares J., Requejo-Isidro J., del Coso R., de Nalda R., Solis J., Afonso C.N., Stepanov A.L., Hole D., Townsend P.D., Naudon A.: Large enhancement of the third-order optical susceptibility in Cu-silica composites produced by low energy high-current ion implantation. *Journal of Applied Physics* 90, 1064 1066 (2001).
2. Райнтжес Дж. Нелинейные оптические параметрические процессы в жидкостях и газах (М. Мир, 1987, с. 510).
3. Popov A.K., Myslivets S.A., Georg T.F., Shalaev V.M.: Four -wave mixing, quantum control and compensating losses in doped negative-index photonic metamaterials. *Optics Letters* 32, 3044-3046 (2007).
4. Palomba S., Zhang Sh., Park Y., Bartal G., Yin X., Zhang X.: Optical negative refraction by four-wave mixing in thin metallic nanostructures. *Nature materials* 11, 34-38 (2012).
5. Тагиев З.А., Касумова Р.Дж., Салманова Р.А. Теория вырожденного четырёхволнового взаимодействия в приближении заданной интенсивности. *Оптика и спектроскопия*, 87, №1, 94-97 (1999).
6. Kasumova R.J., Tagiyev Z.H., Amirov Sh.Sh., Shamilova Sh.A., Safarova G.A.: Phase effects at parametrical interaction in metamaterials. *Journal of Russian Laser Research* 38 (4) 349-358 (2017).
7. Kasumova R.J., Amirov Sh.Sh., Shamilova Sh.A.: Parametric interaction of optical waves in metamaterials under low-frequency pumping. *Quantum Electronics*, 47(7) 655-660 (2017).