

УДК 535.56/535-14

А. П. Сухоруков, Д. О. Сапарина, А. Н. Калиш

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991, Россия
E-mail: apsmsu@gmail.com

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОННЫЕ ВОЛНЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА В ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СРЕДАХ *

Исследуется распространение поверхностных плазмон-поляритонных волн терагерцового диапазона вдоль границы двух сред: металла или метаматериала с отрицательным показателем преломления и диэлектрика, обладающего оптической активностью или кубической нелинейностью. Показано, что в обоих случаях профиль волны отличен от экспоненциально затухающего. На границе оптически активных сред поверхностные волны являются комбинацией локализованных ТЕ и ТМ компонент. Изучается дифракция и дисперсия терагерцовых поверхностных пучков и импульсов.

Ключевые слова: поверхностная волна, плазмон-поляритонная волна, метаматериал, дифракция, дисперсия, кубическая нелинейность.

A. P. Sukhorukov, D. O. Saparina, A. N. Kalish

SURFACE PLASMON-POLARITON TERAHERTZ WAVES IN OPTICALLY ACTIVE MEDIA

We examine the propagation of surface plasmon-polariton terahertz waves along the interface between two media: metal or metamaterial with a negative index and an optically active medium or a nonlinear dielectric. It is shown that in both cases wave profile is not exponential. On the interface of optically active media surface waves are combination of TE and TM localized modes. Diffraction and dispersion of terahertz beams and pulses is studied.

Keywords: surface plasmon-polariton, metamaterial, diffraction, dispersion, cubic nonlinearity.

Введение

Поверхностные электромагнитные волны распространяются вдоль границы раздела двух сред, диэлектрическая или магнитная проницаемости которых имеют разные знаки. Диэлектрики обладают положительной диэлектрической проницаемостью, в то время как металлы имеют отрицательную диэлектрическую проницаемость на длинах волн, превышающих плазменную длину волны. Поэтому в течение долгого времени изучалось распространение поверхностных волн на границе диэлектриков и металлов [1, 2]. Поверхностные волны представляют собой связанные колебания электромагнит-

ного поля и электронной плазмы в металле, поэтому они называются поверхностными плазмон-поляритонами, а соответствующая область фотоники – плазмоникой. В последние годы к ней проявляется повышенный интерес в связи с многочисленными возможными применениями в передаче информации, литографии, медицине, нанопотонике. Достаточно перспективным для плазмоники является терагерцовый диапазон, так как по сравнению с оптическим поверхностные плазмоны в этом диапазоне имеют большую длину затухания.

В последние годы появились искусственные метаматериалы с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной

* Данная работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 08-02-00717, 09-02-01028, 10-02-90010_Бел, 10-02-00796 и фонда «Династия».

проницаемости (а, следовательно, и показателя преломления) вплоть до оптических частот, в том числе, отработана методика изготовления метаматериалов в терагерцовом диапазоне частот [3]. Поверхностные волны на границе такого метаматериала и диэлектрика обладают свойствами, отличными от случая границы металл-диэлектрик [4]. Примечательно, что на такой границе могут существовать как ТМ, так и ТЕ моды, обладающие различными законами дисперсии, и которые могут быть прямыми и обратными.

Одна из отличительных особенностей металлов и метаматериалов – это присущая им частотная дисперсия, приводящая к расплыванию поверхностных импульсов [4]. Кроме того, ограничение поперечных размеров пучка ведет к его дифракционному расплыванию [5]. В работе [4] описано влияние нелинейности одной или обеих сред на дисперсионное расплывание пучка, показано, что оно может быть скомпенсировано, в результате чего вдоль границы метаматериала и диэлектрика будет распространяться солитон. Нелинейность также может компенсировать и дифракционное, и дисперсионное расплывание, причем особое значение имеют пространственно-временные вихрекс-солитоны, т. е. импульсные пучки, имеющие дислокацию фазы в точках равенства нулю амплитуды [5]. При распространении таких пучков даже в линейных средах нулевые значения амплитуды не изменяются, несмотря на дифракционное и дисперсионное расплывание импульсных пучков [6].

Поляризация поверхностных волн строго определяется диэлектрической и магнитной проницаемостью обеих сред: на границе металла и диэлектрика могут существовать только ТМ моды, на границе метаматериала и диэлектрика – либо ТМ, либо ТЕ моды, а на границе метаматериала и металла могут существовать только ТЕ моды. В связи с этим интерес представляет исследование поверхностных плазмон-поляритонных волн на границе металла или метаматериала и оптически активной среды, в которой происходит вращение плоскости поляризации объемных волн.

Поверхностные волны в оптически активных средах

Явление оптической активности представляет собой частный случай пространственной дисперсии [7]. Тензор диэлектрической проницаемости оптически активной среды можно разложить в ряд по степеням волнового вектора \vec{k} :

$$\epsilon_{ab}(\omega, \vec{k}) = \epsilon_{ab}(\omega) + i\alpha_{abc}(\omega)k_c + \alpha_{abcd}(\omega)k_c k_d \dots \quad (1)$$

Второй член этого разложения описывает явление оптической активности. В случае изотропной оптически активной среды материальное уравнение (1) приобретает компактную запись:

$$\vec{D} = \epsilon_g \vec{E} + i\alpha \text{rot } \vec{E},$$

где α – коэффициент гирации.

Рассмотрим границу диэлектрика, обладающего оптической активностью, и металла или метаматериала. В этом случае поле поверхностной волны в диэлектрике представляет собой сумму двух компонент с различной поляризацией, соответствующих двум собственным решениям волнового уравнения:

$$\vec{E} = (\vec{E}_1 \exp(-\gamma_{1g} |z|) + \vec{E}_2 \exp(-\gamma_{2g} |z|)) \times \exp(i\beta x),$$

где γ_{jg} – коэффициенты локализации, а β – постоянная распространения.

В металле / метаматериале поле поверхностной волны экспоненциально затухает в поперечном направлении:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \exp(-\gamma_m |z|) \exp(i\beta x).$$

В линейном по коэффициенту гирации приближению постоянная распространения и коэффициенты локализации поверхностной волны имеют вид:

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_g \epsilon_m \frac{\epsilon_m \mu_g - \epsilon_g \mu_m}{\epsilon_m^2 - \epsilon_g^2}},$$

$$\gamma_m = k_0 \epsilon_m \sqrt{\frac{\epsilon_g \mu_g - \epsilon_m \mu_m}{\epsilon_m^2 - \epsilon_g^2}},$$

$$\gamma_{1,2g} = k_0 \epsilon_g \sqrt{\frac{\epsilon_g \mu_g - \epsilon_m \mu_m}{\epsilon_m^2 - \epsilon_g^2}} \mp$$

$$\mp \alpha \frac{k_0^2 \mu_g}{2\epsilon_g} \sqrt{\epsilon_g \mu_g \frac{\epsilon_m^2 - \epsilon_g^2}{\epsilon_g \mu_g - \epsilon_m \mu_m}}.$$

Таким образом, оптическая активность не изменяет величину постоянной распространения поверхностной волны. В то же время изменяется поляризация волны: в отличие от случая распространения волн вдоль границы среды без оптической активности, поверхностно активная волна содержит как ТМ, так и ТЕ компоненты. При этом ТМ компоненты имеют ту же величину, как и в отсутствие оптической активности, а ТЕ компоненты пропорциональны коэффициенту гирации.

Дифракция поверхностных волн в оптически активных и нелинейных средах

Рассмотрим границу металла или метаматериала и оптически активной среды или нелинейного диэлектрика. В [4] было показано, что если поверхностная волна распространяется вдоль среды с нелинейностью керровского типа, изменяется ее поперечное распределение поля, также как и в описанном выше случае распространения поверхностной волны вдоль границы оптически активной среды.

Электромагнитное поле поверхностного плазмон-поляритонного пучка может быть представлено в виде:

$$E(x, y, z) = A(x, y) f(z) \exp(i\beta x),$$

где $A(x, y)$ – медленно меняющаяся огибающая, $f(z)$ описывает поперечное распределение поля:

а) в линейной среде

$$f(z) = \exp(-\gamma_j |z|),$$

б) в среде с керровской нелинейностью

$$f(z) = f_0 \operatorname{sech}[\gamma_j (z - z_{j0})],$$

в) в среде с оптической активностью

$$f(z) = f_1 \exp(-\gamma_1 |z|) + f_2 \exp(-\gamma_2 |z|).$$

Для огибающей поверхностного волнового пучка можно получить уравнение дифракции:

$$\frac{\partial A}{\partial x} - iD_{dif} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - i\alpha_{NL} |A|^2 A = 0,$$

где $D_{dif} = \frac{1}{2\beta}$ – коэффициент дифракции, а

α_{NL} – эффективный коэффициент нелинейности, знак и величина которого зависит от диэлектрической и магнитной проницаемо-

стей, нелинейности сред и коэффициентов локализации пучка γ_j . Таким образом, так как в линейном приближении наличие оптической активности не изменяет величины постоянной распространения, оптическая активность не влияет на дифракцию поверхностных пучков.

С учетом дифракционных и дисперсионных явлений уравнение для поверхностного плазмон-поляритонного импульсного пучка

$$E(x, y, z, \xi) = A(x, y, \xi) \exp(i\beta x - i\omega_0 t) f(z)$$

конечной ширины и длительности может быть записано в виде [5]:

$$\frac{\partial A}{\partial x} + iD_{dis} \frac{\partial^2 A}{\partial \xi^2} - iD_{dif} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} - i\alpha_{NL} |A|^2 A = 0, \quad (2)$$

где $\xi = x - v_{gr} t$ – бегущая координата пучка, $v_{gr} = \partial\omega / \partial\beta$, – групповая скорость пучка,

$$D_{dis} = \frac{1}{2} \left. \frac{dv_{gr}^{-1}}{d\omega} \right|_{k=k_0} \quad \text{– коэффициент дисперсии.}$$

Уравнение (2) – это нелинейное уравнение Шредингера, имеющее солитонные решения.

Заключение

Исследовано распространение поверхностных плазмон-поляритонных волн терагерцового диапазона вдоль границы двух сред: металла или метаматериала с отрицательным показателем преломления и диэлектрика, обладающего оптической активностью или кубической нелинейностью. Нелинейность диэлектрика и оптическая активность приводят к изменению профиля поверхностной волны по сравнению с экспоненциально затухающим. На границе оптически активных сред изменяется поляризация поверхностных волн, которые представляют собой не чистые ТЕ или ТМ волны, а их комбинацию. Изучена дифракция и дисперсия терагерцовых поверхностных пучков и импульсов, показано, что оптическая активность не влияет на дифракцию поверхностных волн.

Список литературы

1. *Либенсон М. Н.* Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 92–98.
2. *Князев Б. А., Кузьмин А. В.* Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 1. С. 108–112.
3. *Shalaev V.* Optical negative-index metamaterials // *Nature Photonics*. 2007. Vol. 1. P. 41–48.
4. *Shadrivov I. V., Sukhorukov A. A., Kivshar Yu. S. et al.* Nonlinear surface waves in left-handed materials // *Phys. Rev. E*. 2004. Vol. 69. P. 016617(1–9).
5. *Сапарина Д. О., Сухоруков А. П.* Дифракция поверхностных волн в металлах и метаматериалах // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73. С. 1701–1704.
6. *Sukhorukov A. P., Yangirova V. V.* Spatio-temporal vortices: properties, generation and recording // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5949. P. 594906(1–9).
7. *Федоров Ф. И.* Теория гиротропии. Минск: Наука и техника, 1976. 453 с.

18.09.2010