

Поверхностные поляритоны с отрицательной групповой скоростью в структуре с переходным слоем

Ю.М. Александров*, В.В. Яцышен

Волгоградский государственный университет, пр-т. Университетский, 100, 400062 Волгоград, Россия

(Получено 14.12.2015; в отредактированной форме – 04.03.2016; опубликовано online 15.03.2016)

В работе рассмотрены условия, при которых возможно отрицательное преломление в тонкой изотропной плёнке олова на подложке из вольфрама при частотах видимого света (длина волны 380-720 нм).

Ключевые слова: Поверхностный поляритон, Отрицательная групповая скорость, Переходный слой.

PACS numbers: 78.20. – e, 78.20.Bh, 78.66.Bz

1. ВВЕДЕНИЕ

В литературе в последнее время проявляется широкий интерес к теме создания материалов с отрицательной групповой скоростью электромагнитной волны. Эти материалы получили название метаматериалов, т.к. они являются искусственными средами и их свойства задаются не химическим составом, а структурой. Ранее, в литературе 40-х – 50-х годов присутствовал термин «искусственные среды». К этой области можно отнести работы Лауэ (1904) [1], Лэмба (1905) [2], Мандельштам [10,11]. В своих лекциях Мандельштам теоретически указывает на возможность получения отрицательной групповой скорости при определённых условиях. В конце 20 – начале 21 веков в литературе были представлены различные работы [3-7], указывающие на некоторые экспериментальные попытки создания метаматериалов в определённых диапазонах электромагнитного спектра. Основной задачей при создании метаматериалов является их способность проявлять свои уникальные свойства в оптическом диапазоне, в диапазоне видимого света, что является сложной задачей по разным причинам.

1. Метаматериал определяет свои свойства не химическим составом, а структурой, следовательно, структурные элементы должны иметь размеры сопоставимые с длиной волны видимого света, т.е. в диапазоне от 380 до 720 нм. Причём погрешность при создании таких элементов должна быть значительно меньше размеров самих элементов, что является сложной технологической задачей [1].

2. Высокая частота терагерцового диапазона электромагнитных волн приводит к эффекту запаздывания, т.е. здесь нужно остановиться более подробно на физической природе компонентов тензора диэлектрической проницаемости. По сути дела тензор определяет отклик на внешнее электромагнитное воздействие. Значит, если внешнее электромагнитное воздействие слишком высокочастотно, то этот отклик будет запаздывать как во времени, так и в пространстве. Следовательно, можно предположить, что теоретические условия на практике могут не выполняться и, исходя из этого предположения, можно построить некоторую теорию опровергающую созда-

ние метаматериалов при превышении некоторого предела электромагнитных частот.

Однако, нужно понимать, что второе утверждение выше также может найти своё опровержение. Таким образом, предполагается, что рассматриваемые материалы при данном подходе могут быть описаны существующей теорией и могут быть найдены условия, при которых метаматериалы могут рассматриваться как среды с отрицательной групповой скоростью.

2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [8, 9] даётся закон дисперсии для поверхностных поляритонов (2.1). Как видно из формулы (2.1) вклад переходного слоя в дисперсионную зависимость поверхностных поляритонов может оказаться существенным при определённых соотношениях частот внешнего электромагнитного излучения и частот плазменных колебаний в металлах.

$$\frac{\kappa_1}{\varepsilon_1} + \frac{\kappa_2}{\varepsilon_2} + k^2 p + \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} q = 0,$$
$$\kappa_i = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i} \quad i = 1, 2, \quad (2.1)$$
$$q = (\varepsilon - \varepsilon_2)d, p = \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) d$$

где ε – диэлектрическая проницаемость переходного слоя, ε_1 – диэлектрическая проницаемость первой среды, ε_2 – диэлектрическая проницаемость второй среды, k – числовое значение волнового вектора, ω – частота электромагнитного излучения, c – скорость света в вакууме.

Проведём моделирование условий, при которых согласно формуле (2.1) могут существовать поверхностные поляритоны с отрицательной групповой скоростью с учётом только действительных числовых значений всех входящих в уравнение (2.1) величин. На рис. 1 показана геометрия задачи (приближение немагнитной среды $\mu = 1$).

* taronte@yandex.ru

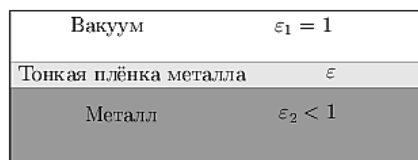


Рис. 1 – Геометрия задачи к условиям генерации поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью

Для реализации генетического алгоритма был выбран язык программирования C++. Написана программа, позволяющая найти закон дисперсии $\omega(k)$ для поверхностных поляритонов в исследуемых наноструктурах. Для определённости были выбраны материал подложки (вольфрам) и тонкой плёнки (олово). Толщина плёнки – 50 нм, диэлектрические проницаемости олова и вольфрама задавались простейшими зависимостями Друде (формулы (2.2) и (2.3) соответственно). Для вакуума $\epsilon_1 = 1$.

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \tag{2.2}$$

$$\epsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{p2}^2}{\omega^2}, \tag{2.3}$$

Чтобы достичь цели работы необходимо решить многопараметрическую задачу (2.1), подобрать условия для возбуждения поверхностного поляритона. Для решения уравнения (2.1) был выбран генетический алгоритм случайно-направленного поиска, который относится к семейству эмпирических. Суть данного метода заключается в подражании процессу микроэволюции и отбора по принципу «выживает сильнейший». Терминология данного метода заимствована из биологии. На рис. 2 показана блок-схема алгоритма.

Также для аппроксимации полученной зависимости использованы полиномы Чебышева одиннадцатого порядка. Данная аппроксимация нужна для получения выражения для первой производной

Таблица 1 – Назначение специальных стилей абзаца

№	Частота ω , Гц	Волновой вектор k , см ⁻¹	Толщина плёнки, см	Плазменная частота олова ω_p	Плазменная частота вольфрама ω_{p2}	Точность расчёта
1	4.69698e+14	18235.5	5e-06	1.08498e+16	1.40367e+16	(0.00169914)
2	5.87815e+14	154717	5e-06	1.08498e+16	1.40367e+16	(0.000815363)
3	2.7596e+14	163855	5e-06	1.08498e+16	1.40367e+16	(0.00632848)
4	1.51895e+14	165529	5e-06	1.08498e+16	1.40367e+16	(0.000579965)
5	3.76385e+14	161737	5e-06	1.08498e+16	1.40367e+16	(0.00323846)

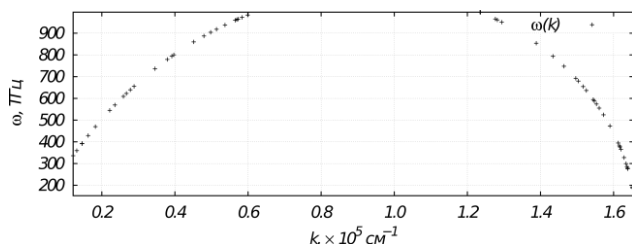


Рис. 3 – Дисперсионная кривая поверхностных поляритонов



Рис. 3 – Блок-схема генетического алгоритма

частоты по волновому вектору.

Групповая скорость, как известно, выражается в виде:

$$\vec{V}_g = \frac{d\omega}{d\vec{k}}, \tag{2.4}$$

По аппроксимации рассчитанной зависимости строится первая производная частоты по волновому вектору от волнового вектора.

3. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчёт каждой точки дисперсионной зависимости проводился отдельно, с разной точностью. В таблице 1 показана часть вывода программы с параметрами расчёта.

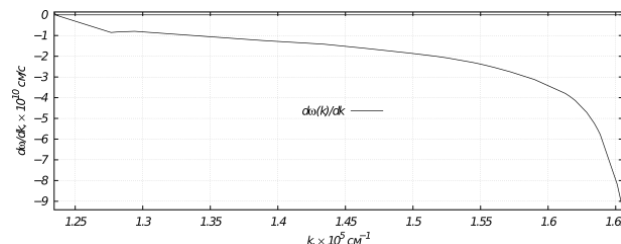


Рис. 4 – Зависимость групповой скорости от волнового вектора

На рис. 3 показан результат решения уравнения (1) для рассматриваемого случая.

В области порядка [60000 : 110000] см⁻¹ наблюдается щель, соответствующая условию (5).

$$k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i > 0, i = 1, 2, \quad (2.4)$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что возбуждение поверхностных поляри-

тонов с отрицательной групповой скоростью в изотропном приближении возможны в области частот от не менее 100 ТГц и до порядка 1 ПГц, волновых векторов порядка [110000 : 180000] см⁻¹.

Из рис. 4 очевидно, что резкий спад кривой физического смысла не имеет, т.к. превышает допустимый предел скоростей. Исходя из этого, можно заключить, что кривая имеет пологий спад в области волновых векторов порядка [129000 : 157000] см⁻¹.

Surface Polaritons with Negative Group Velocity in Structure with Transition Layer

Y.M. Aleksandrov¹, V.V. Yatsishen^{1,2}

¹ *Volgograd State University, 100, University Av., 400062 Volgograd, Russia*

The paper discusses the conditions under which it is possible to observe negative refraction in a thin isotropic tin film on a substrate of tungsten at the frequencies of visible light (length wavelength 380-720 nm).

Keywords: Surface polariton, Negative group velocity, Transition layer.

Поверхневі поляритони з негативною груповою швидкістю в структурі з перехідним шаром

Ю.М. Александров, В.В. Яцишен

Волгоградський державний університет, пр. Університетський, 100, 400062 Волгоград, Росія

У роботі розглянуті умови, при яких можливе негативне заломлення в тонкій ізотропній плівці олова на підкладці з вольфраму при частотах видимого світла (довжина хвилі 380-720 нм).

Ключові слова: Поверхневий поляритон, Негативна групова швидкість, Перехідний шар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M.T.F. von Laue, *Ann. Phys.* **18**, 4 (1905).
2. W.E. Lamb, *Proc. London Math. Soc.* **1**, 1 (1904).
3. Л.И. Мандельштам, *Полное собрание трудов*. Т. 5. (Москва: АН СССР: 1950) (L.I. Mandelshtam, *Polnoye sobraniye trudov*. V. 5. (Moskva: AN USSR: 1950)).
4. Л.И. Мандельштам, *Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике*. (Москва: Наука: 1972) (L.I. Mandelshtam, *Lektsii po optike, teorii otноситel'nosti i kvantovoy mekhanike* (Moskva: Nauka: 1972)).
5. S. Brûlé, E.H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 133901 (2014).
6. B. Wang, J. Zhou, T. Koschny, S. Guenneau, M. Kafesaki, C.M. Soukoulis, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, 114003 (2009).
7. V.E. Babicheva, M.Y. Shalaginov, S. Ishii, A. Boltasseva, A.V. Kildishev, *Opt. Express.* **23**, 31109 (2009).
8. I.B. Vendik, O.G. Vendik, *Tech. Phys.* **58**, 1 (2013).
9. V.M. Shalaev, *Nat. Photon.* **1**, 41 (2007).
10. *Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред* (Ред. В.М. Агранович, Д.Л. Миллс) (Москва: Наука: 1985) (*Poverkhnostnyye polyaritonu. Elektromagnitnyye volny na poverkhnostyakh i granitsakh razdela sred* (Red. V.M. Agranovich, D.L. Mills) (Moskva: Nauka: 1985)).
11. V.M. Agranovich, Yu.N. Gartstein, *Phys-Usp.* **49**, 1029 (2006).