

## Отрицательная групповая скорость поверхностных поляритонов в металлической плёночной наноструктуре

Ю.М. Александров\*, В.В. Яцышен

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

(Получено 10.04.2017; в отредактированной форме – 20.04.2017; опубликовано online 30.06.2017)

В работе рассмотрены условия, при которых возможно отрицательное преломление в плёночной наноструктуре, состоящей из изотропных металлических плёнок (платина, серебро) на металлической подложке (алюминий) при оптических частотах (УФ). С использованием генетического алгоритма получено решение дисперсионного уравнения в области частот близких к резонансу. Произведено сравнение полученных решений с решениями для тонкой одиночной плёнки на подложке. Также проведено сравнение получаемых решений для различных толщин нанослоёв в структуре из двух плёнок. Показано влияние дополнительных слоёв на изменение дисперсионной зависимости плёночной структуры и на характер зависимости групповой скорости от волнового вектора при изменении толщин, входящих в структуру слоёв.

**Ключевые слова:** Поверхностный поляритон, Генетический алгоритм, Плёночная структура, Отрицательное преломление, Дисперсия, Дисперсионная зависимость.

DOI: 10.21272/jnep.9(3).03039

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проявление широкого интереса к поверхностным плазмон-поляритонам в металлических наноструктурах с отрицательной групповой скоростью вызван тем, что исследования условий возбуждения таких квазичастиц может помочь при создании метаматериалов и реальных устройств, работающих на эффектах отрицательной групповой скорости. Актуальность исследований в данной области подтверждается рядом работ. Так исследования плёночных наноструктур с отрицательной групповой скоростью плазмон-поляритонов проводились в работе [4]. В работе [6] проведено численное моделирование условий возбуждения плазмон-поляритонов в тонкой металлической плёнке с V-профилем поверхности. Распространение плазмон-поляритонов в тонкой металлической плёнке на поверхности одномерного фотонного кристалла изучалось в работе [5]. На основе существующей теории поверхностных поляритонов представленной в работах [1, 2] рассмотрен случай тонкого макроскопического изотропного слоя и выведен закон дисперсии для поверхностных поляритонов (1). В работе [3], по данной зависимости была найдена область существования поверхностных поляритонов для переходного слоя олова на подложке из вольфрама. Из формулы (1) следует существенное влияние переходного слоя, представленного на рис. 1, на дисперсионное уравнение.

$$\frac{\kappa_1}{\varepsilon_1} + \frac{\kappa_2}{\varepsilon_2} + k^2 p + \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} q = 0, \quad (1)$$

где

$$\kappa_i = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_i}, \quad i = 1, 2,$$

$$q = (\varepsilon - \varepsilon_2) d, \quad p = \left( \frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) d.$$

Вакуум	$\varepsilon_1 = 1$
Тонкая плёнка металла1	$\varepsilon_3$
Тонкая плёнка металла2	$\varepsilon_4$
Металл	$\varepsilon_2 < 1$

а

Вакуум	$\varepsilon_1 = 1$
Тонкая плёнка металла1	$\varepsilon_3$
Металл	$\varepsilon_2 < 1$

б

**Рис. 1** – Геометрия задачи для (а) плёночной структуры на металлической подложке; (б) тонкой плёнки на металлической подложке

Формулу аналогичную (1) можно получить и для плёночной структуры (в виде двух слоёв с параметрами  $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ ). Известно, что вклад плёнок в дисперсионное уравнение носит аддитивный характер, т.е. порядок следования слоёв на подложке не меняет решения дисперсионного уравнения. Дисперсионное уравнение для структуры, представленной на рис. 2, имеет вид (в изотропном случае):

$$(\beta_1 + \beta_2) A + (\beta_1 - \beta_2) B \exp(-2\kappa_2 d) = 0, \quad (2)$$

где

$$A = (\beta_1 + \beta_2)(\beta_3 + \beta_4) + (\beta_1 - \beta_2)(\beta_3 - \beta_4) \exp(-2\kappa_3 l),$$

$$B = (\beta_2 - \beta_3)(\beta_3 + \beta_4) + (\beta_2 + \beta_3)(\beta_3 - \beta_4) \exp(-2\kappa_3 l),$$

\* taronte@ya.ru

$$\beta_i = \varepsilon_i / \kappa_i; \quad \kappa_i = 2\pi\nu \left[ \varepsilon_i \left( \kappa_x^2 / \varepsilon_i - 1 \right) \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

В данном случае  $d$  и  $l$  – толщины каждой из плёнок. Постановка задачи, решаемой в настоящей работе: найти условия, при которых в двухслойной структуре возможно существование нормальных волн в виде поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью. На рис. 1 и рис. 2 показана геометрия задачи (приближение немагнитной среды  $\mu = 1$ ).

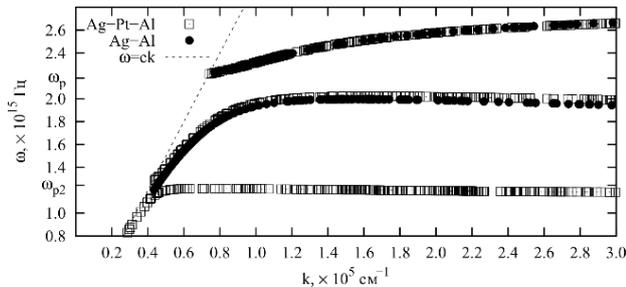


Рис. 2 – Дисперсионные кривые однослойной структуры Ag-Al в сравнении с двухслойно – Ag-Pt-Al. Прямая линия соответствует дисперсионной зависимости фотона в вакууме

Для определённости возьмём плёночные структуры и Ag-Pt-Al. Сравним полученные результаты с результатами для структур Ag-Al и Pt-Al.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить многопараметрическую задачу (1), а также подобрать условия для возбуждения поверхностного плазмон-поляритона с отрицательной групповой скоростью. Для решения уравнения (1) был выбран один из эмпирических алгоритмов случайно-направленного поиска (генетический). Суть данного метода заключается в отборе решений по принципу «выживает сильнейший». Значительная часть терминологии данного метода заимствована из биологии.

Для аппроксимации полученной зависимости использованы полиномы Чебышева двенадцатого порядка. Данная аппроксимация нужна для получения выражения для первой производной частоты по волновому вектору.

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 (алюминий) и тонкие плёнки (платина, серебро). Толщины плёнок при расчётах полагались равными толщине 10 элементарных ячеек для каждого металла. Таким образом, толщина плёнки Pt – 3,920 нм, Ag – 4,086 нм, диэлектрические проницаемости всех металлов задавались простейшими зависимостями Друде (формулы (4), (5)). Использовались значения плазменных частот для объёмных материалов, параметры  $\omega_p$  для наноструктур в виде наносфер можно найти в [7]. Для серебра, платины и

алюминия они соответственно равны:  $\omega_p(\text{Ag}) = 2,18$  ПГц,  $\omega_p(\text{Pt}) = 1,244$  ПГц,  $\omega_p(\text{Al}) = 3,57$  ПГц. Для вакуума  $\varepsilon_i = 1$ .

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = 1 - \frac{\omega_{p2}^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -той плёнки, а  $\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость подложки из алюминия.

Расчёт каждой точки дисперсионной зависимости проводился отдельно, с разной точностью.

## 3. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 показан результат решения уравнения (1) для случая плёнки платины на подложке алюминия и плёнки серебра на подложке алюминия, а также результаты решения уравнения (2) для двухслойной структуры серебро – платина – алюминий.

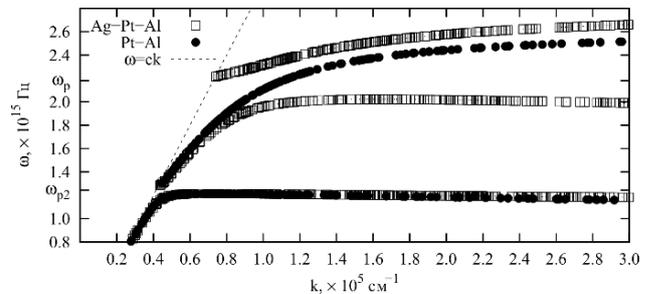


Рис. 3 – Дисперсионные кривые однослойной структуры Pt-Al в сравнении с двухслойно – Ag-Pt-Al. Прямая линия соответствует дисперсионной зависимости фотона в вакууме

Как видно из рис. 3, в двухслойной структуре существуют два поверхностных поляритона с отрицательной групповой скоростью – один в серебряной плёнке, второй – в платиновой. В слоистой структуре меняется характер распространения поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью по сравнению с однослойными структурами. В двухслойной плёночной структуре появляется третья ветвь, которая является общей, аддитивной ветвью для обоих поверхностных поляритонов, что хорошо видно из рис. 3. Данная ветвь лежит между резонансными частотами  $\omega_{p2}(\text{Pt}) = 2,144$  ПГц и  $\omega_p(\text{Ag}) = 2,18$  ПГц.

Наблюдается изменение наклона нижней ветви при сравнении дисперсионных зависимостей платины на алюминии и двухслойной структуры (рис. 4) притом, что аналогичное изменения наклона нижней ветви в случае серебра отсутствует (рис. 3). Это позволяет сделать вполне очевидный и закономерный вывод о том, что наклон дисперсионной кривой промежуточного слоя между плёнкой и подложкой определяется влиянием верхнего слоя.

Также следует отметить значительное отличие средней кривой двухслойной системы от каждой из кривых для однослойной структуры. Исходя из этого, был проведён сравнительный анализ зависимостей

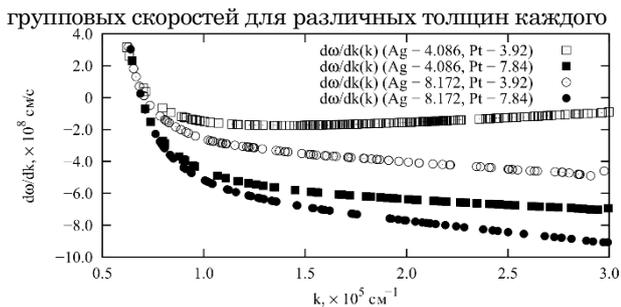


Рис. 4 – Зависимость групповой скорости от волнового вектора электромагнитной волны для различных толщин слоёв в двухслойной структуре Ag-Pt-Al (нижняя ветвь с отрицательным наклоном в дисперсионной зависимости)

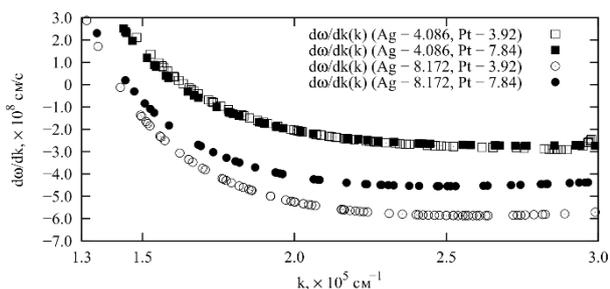


Рис. 5 – Зависимость групповой скорости от волнового вектора электромагнитной волны для различных толщин слоёв в двухслойной структуре Ag-Pt-Al (верхняя ветвь с отрицательным наклоном в дисперсионной зависимости)

из слоёв. Было выбрано четыре случая для каждой из ветвей с отрицательным наклоном. По аппроксимации дисперсионных зависимостей для двухслойной структуры построена зависимость первой производной  $d\omega(\vec{k})/d\vec{k}$  (рис. 5 – 6), которая, как известно, опреде-

ляет групповую скорость (5):

$$\vec{V}_g = \frac{d\omega}{d\vec{k}} \tag{5}$$

В скобках на легенде рис. 5 и рис. 6 указаны толщины каждого слоя в нанометрах.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования данных слоистых структур для тонкой настройки величины отрицательной групповой скорости, что может найти применение в устройствах наноэлектроники и фотоники

Результаты согласуются с работой [8], в которой строились дисперсионные зависимости для различных толщин плёнок серебра.

#### 4. ВЫВОДЫ

В итоге, с использованием генетического алгоритма было решено дисперсионное уравнение для поверхностных поляритонов в слоистой структуре. Использовалось приближение изотропных макроскопических тонких плёнок. Проведено сравнение дисперсионных зависимостей слоистой структуры и одиночных тонких плёнок. Выявлено появление дополнительной ветви в дисперсионной зависимости для двухслойной структуры по сравнению с однослойными. Определены области существования поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью. Проведён анализ дисперсионной зависимости двухслойной структуры для различных толщин, входящих в структуру слоёв. Полученные результаты могут найти применение при постановке соответствующих экспериментов и создании устройств на основе исследовавшихся в работе структур.

### Negative Group Velocity of Surface Polaritons in Metal Foil Nanostructure

Y.M. Aleksandrov, V.V. Yatsishen

Volgograd State University, 100, University Ave., 400062 Volgograd, Russia

The paper discusses the conditions under which the negative refraction in the membrane nanostructure consisting of isotropic films of metal (platinum, silver) on a metallic substrate (aluminum) at optical frequencies (UV) is possible. Using the genetic algorithm, the solution of the dispersion equation in the frequency region close to resonance is obtained. The obtained solutions are compared with solutions for a thin single film on a substrate. Also, comparisons of the obtained solutions for different thicknesses of nanolayers in the structure of two films were made. The effect of the additional layers depending on the change in the dispersion membrane structure is shown. Also, the influence of additional layers on the character of the dependence of the group velocity on the wave vector is shown for the changes of layers thickness in the structure.

**Keywords:** Surface polariton, Genetic Algorithm, Foil structure, Negative refraction, Dispersion.

### Негативна групова швидкість поверхневих поляритонів у металевій плівковій наноструктурі

Ю.М. Александров, В.В. Яцишен

Волгоградський державний університет, пр-т Університетський, 100, 400062 Волгоград, Росія

У роботі розглянуті умови, при яких можливо негативне заломлення в плівковій наноструктурі, що складається з ізотропних металевих плівок (платина, срібло) на металевій підкладці (алюміній)

при оптичних частотах (УФ). Із використанням генетичного алгоритму отриманий розв'язок дисперсійного рівняння в області частот близьких до резонансу. Проведено порівняння отриманих розв'язків з аналогічними для тонкої одношарової плівки на підкладці. Також проведено порівняння одержуваних розв'язків для різної товщини наночарів у структурі з двох плівок. Показано вплив додаткових шарів на зміну дисперсійної залежності плівковою структурі і на характер залежності групової швидкості від хвильового вектора при зміні товщини, що входять у структуру шарів.

**Ключові слова:** Поверхневий поляритон, Генетичний алгоритм, Плівкова структура, Негативне переломлення, Дисперсія.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. J.M. Pitarke, V.M. Silkin, E.V. Chulkov, P.M. Echenique, *Rep. Progr. Phys.* **70**, 1 (2007).
2. В.М. Агранович, Ю.Н. Гаргштейн, *УФН* **176**, 10 (2006).
3. Y.M. Aleksandrov, V.V. Yatsishen, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 1, 01013 (2016).
4. C. Liu, M. Kong, B. Li, *Opt. Express* **22**, 208900(8) (2014).
5. V.N. Konopsky, E.V. Alieva, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 253904 (2006)
6. S. Lee, S. Kim, *Opt. Express* **19** No 24, 24055 (2011).
7. M.G. Blaber, M.D. Arnold, M.J. Ford, *J. Phys. Chem. C* **113**, 8 (2009).
8. Y. Liu, D. Pile, Zh. Liu, D. Wu, Ch. Sun, X. Zhang, *Proc. SPIE* 6323 (2003).