

ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ НА ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

С.Н. Курилкина, В.Н. Белый, Н.С. Казак

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
пр. Независимости, 68-2, 220072, Минск, Беларусь

Метаповерхности (МП), обладающие ультратонкой планарной легко реализуемой структурой, совместимой с оптоэлектронными компонентами и интегральными схемами, представляют собой платформу для наблюдения и практического использования необычных взаимодействий света и вещества [1]. В настоящем сообщении рассмотрены свойства особого класса МП – гиперболические метаповерхности (ГМП), которые в приближении эффективной среды можно характеризовать одноосным тензором проводимости σ . При этом мнимые части собственных значений σ для указанных МП имеют различные знаки. Данные искусственно синтезированные материалы могут рассматриваться как двумерный аналог гиперболических метаматериалов.

Возможны различные дизайны гиперболической метаповерхности. Для оптического излучения, например, подобные МП могут быть реализованы на основе двумерных решеток анизотропных наночастиц золота, размещенных на диэлектрической подложке. В работе [2] в качестве последней использована пластина плавленого кварца с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=2.1$, а плазмонные наночастицы эллиптической формы с большей (меньшей) осью

134 нм (103 нм) и толщиной 20 нм упакованы в квадратную решетку с периодом 200 нм.

Собственные значения $\sigma_{\perp}$, $\sigma_{\parallel}$ описывающего резонансное взаимодействие между отдельными плазмонными наночастицами одноосного тензора проводимости в дипольном приближении задаются формулой Лорентца-Друде [3]:

$$\sigma_s(\omega) = \sigma_s^{\infty} + i \frac{\omega}{\omega^2 - \omega_s^2 + i\gamma_s\omega} . \quad (1)$$

В выражении (1) $s=\perp, \parallel$; в абсолютных единицах здесь и ниже представлены следующие величины: ω_s – резонансные частоты в направлении главных осей тензора проводимости, γ_s – постоянные затухания, σ_s^{∞} – проводимости, обусловленные недипольным откликом, либо конечностью толщины плазмонного слоя. Как видно из рис.1, возможно реализовать условия, когда мнимые части σ_s будут иметь одинаковые (отрицательные или положительные), либо различные знаки, что соответствует случаю ГМП.

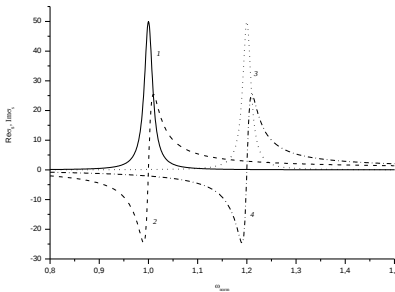


Рис.1. Частотная зависимость действительных (кривые 1, 3) и мнимых (кривые 2, 4) частей проводимостей метаповерхности на основе одноосной плазмонной решетки [2]: продольной (кривые 1, 2) и поперечной (кривые 3, 4).

Этот режим для случая структуры на основе золотых анизотропных наночастиц реализуется в диапазоне нормированных частот $\omega_{||} < \omega < \omega_{\perp}$ ($1 < \omega < 1.2$).

Выберем систему координат таким образом, чтобы ось X была ортогональна метаповерхности, разделяющей изотропные диэлектрики: верхний с диэлектрической проницаемостью ε_1 и нижний с проницаемостью ε_2 . Ось Z , образующая угол φ с продольной главной осью тензора σ , коллинеарна направлению распространения возбуждаемого поверхностного плазмон-поляритона (ППП) (рис.2).

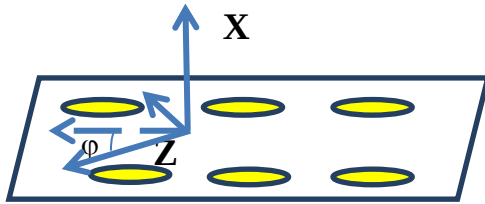


Рис.2. Используемая система координат.

Дисперсионное уравнение, определяющее условие существования ППП, получаем из уравнений Максвелла с учетом экспоненциального затухания поля при удалении от МП, а также граничных условий для векторов напряженности электрического $\mathbf{E}$ и магнитного $\mathbf{H}$ поля:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1] = (4\pi / c) \sigma \mathbf{E}, \quad [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0.$$

Здесь $\mathbf{n}$ – единичный вектор, ортогональный МП, индекс 1 (2) соответствуют верхнему (нижнему) полупространству относительно метаповерхности. В результате получаем

$$F = \left(\frac{\chi_1}{k_0} + \frac{\chi_2}{k_0} - i\sigma_{yy} \right) \left(\frac{k_0 \varepsilon_1}{\chi_1} + \frac{k_0 \varepsilon_2}{\chi_2} + i\sigma_{zz} \right) - \sigma_{yz}^2 = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{\perp} \cos^2 \varphi + \sigma_{\parallel} \sin^2 \varphi, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{\parallel} \cos^2 \varphi + \sigma_{\perp} \sin^2 \varphi, \\ \sigma_{yz} = \delta \sin 2\varphi, \quad \delta = (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp})/2.$$

Здесь величина $\chi_{1,2}^2 = k_z^2 - \varepsilon_{1,2} k_0^2$ определяет глубину проникновения поверхностного плазмон-поляритона в граничащие с МП среды, $k_0 = \omega/c$. Как следует из (2), в общем случае возбуждаемые на метаповерхности ППП не являются чисто ТЕ или ТМ поляризованными. При симметричном окружении ($\chi_1/k_0 = \chi_2/k_0 = \tilde{\chi}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$) из уравнения (2) следует

$$\tilde{\chi}(\varphi) = \frac{1}{2i\sigma_{zz}} \left\{ - \left(2\varepsilon + \frac{1}{2} (\sigma_{yy} \sigma_{zz} - \sigma_{yz}^2) \right) \pm \sqrt{\left(2\varepsilon + \frac{1}{2} (\sigma_{yy} \sigma_{zz} - \sigma_{yz}^2) \right)^2 - 4\sigma_{yy} \sigma_{zz}} \right\} \quad (3)$$

и, следовательно, можно получить аналитическое выражение для эффективного показателя преломления ППП $n^* = k_z/k_0$:

$$n^{*2} = \tilde{\chi}^2 + \varepsilon. \quad (4)$$

В случае асимметричного окружения для определения n^* может быть использован метод полюсов коэффициента отражения, суть которого сводится к следующему. Вблизи полюса функции $F(n^*)$ (соответствующего возбуждению плазмон-поляритона) ее фаза Φ испытывает быстрое изменение, которому отвечает максимум кривой $f(\text{Ren}^*) = \partial\Phi/\partial(\text{Ren}^*)$. Указанный максимум определяет действительную часть эффективного показателя преломления n^* , а полная ширина этого максимума уровню 0.5 – мнимую часть n^* . Данный метод использован нами для оценки n^* локализованных плазмон-поляритонов, возбуждаемых на ГМП на основе одноосной решетки золотых анизотропных наночастиц (рис.3). При расчете полагалось $\omega=1.1$.

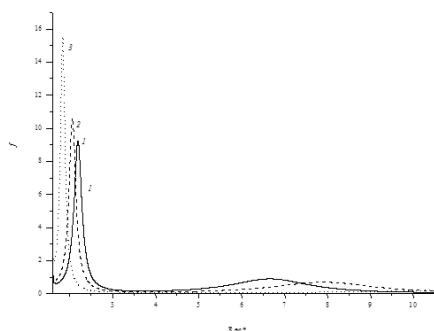


Рис.3. Зависимость $f(\text{Ren}^*)$ для ГМП, синтезированной в работе [2]. $\omega=1.1$, $\varepsilon_1=1.3$, $\varepsilon_2=2.1$. 1 - $\varphi=0^\circ$, 2 - $\varphi=10^\circ$, 3 - $\varphi=20^\circ$.

Результаты численного моделирования показали, что асимметрия диэлектрического окружения обуславливает изменение как фазовой скорости $V = c/n^*$ обоих ППП, так и их затухания. Так, например, если при $\varepsilon=2.1$ для $\varphi=0^\circ$ имеем $n_1^*=2.692+0.109i$, $n_2^*=7.172+1.118i$; при $\varphi=10^\circ$ получаем $n_1^*=2.562+0.095i$, $n_2^*=8.418+1.437i$; при $\varphi=20^\circ$ находим $n_1^*=2.337+0.065i$, $n_2^*=13.194+2.914i$. Если же $\varepsilon_1=1.33$, $\varepsilon_2=2.1$, то при $\varphi=0^\circ$ $n_1^*=2.355+0.058i$,

$n_2^*=6.794+1.117i$; при $\varphi=10^\circ$ $n_1^*=2.287+0.049i$,
 $n_2^*=7.887+1.406i$; при $\varphi=20^\circ$ $n_1^*=2.175+0.029i$,
 $n_2^*=12.159+2.756i$. Отметим, что как в случае симметричного, так и асимметричного диэлектрического окружения плазмон-поляритон с меньшей фазовой скоростью обладает большим затуханием.

Представляет интерес случай, когда мнимая часть продольной (поперечной) проводимости МП оказывается близкой к нулю. Как показал расчет, проведенный в соответствии с (3),(4) для случая симметричного окружения метаповерхности, в этом случае кривая $n^*(\varphi)$ «выползает» вблизи $X(Y)$. Плоские участки поверхности показателей преломления соответствуют коллинеарному направлению групповых скоростей [4]. Таким образом, в указанных направлениях имеет место каналирование энергии поверхностных плазмон-поляритонов.

Установленные особенности ППП могут быть использованы при разработке устройств наноплазмоники.

Список использованных источников

1. Gomez-Diaz J.S. Hyperbolic metasurfaces: surface plasmons, light-matter interactions, and physical implementation using graphene strips/ J.S. Gomez-Diaz, M. Tymchenko, A. Alù// Optical Material Express. – 2015. – V.5, N10. – P.2313.
2. Effective surface conductivity of optical hyperbolic metasurfaces: from far-field characterization to surface wave analysis/ O. Yermakov et al// Scientific reports. – 2018, - V.8, N1. - P.14135.
3. Kotov V. Hyperbolic hybrid waves and optical topological transitions in few-layer anisotropic metasurfaces/ V.Kotov, Yu. Lozovik//arXiv:1909.05427v3 [cond-mat.mes-hall] 20 June 2020.
4. Федоров Ф.И. Теория гиротропии//Ф.И. Федоров. – Мн.: Наука и техника, 1976.