УДК 535.15:535.321

В. В. Герасимов [1], Б. А. Князев [1, 2], А. К. Никитин [3], В. В. Никитин [3]

[1] Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: einy@ngs.ru

[2] Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: B.A.Knyazev@inp.nsk.su

[3]Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342, Россия
E-mail: alnikitin@mail.ru

НЕИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ *

В статье обсуждаются два способа неинтерферометрического определения показателя преломления терагерцовых поверхностных плазмонов (ПП). Первый способ предполагает разделение исходного пучка ПП на два новых, измерение интенсивности полей новых пучков, после пробега ими различных расстояний, и угла их излучения в воздух на дифракционной решётке. Во втором способе измеряемыми величинами являются глубина проникновения поля ПП в воздух и длина их распространения. Выполнено численное моделирование обоих способов.

Ключевые слова: поверхностные плазмоны, комплексный показатель преломления, дисперсионная спектроскопия, терагерцовое излучение.

V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, A. K. Nikitin, V. V. Nikitin

NONINTERFEROMETRIC TECHNIQUES TO DETERMINE TERAHERTZ SURFACE-PLASMON COPLEX REFRACTIVE INDEX

Two noninterferometric techniques for mtasurement of THz surface plasmon (SP) refractive index κ are presented. The first method involves splitting of the initial SPs beam into two new ones and measurements of the SP decoupling angle on a diffractional grating. The second method is based on the fact that THz SP field penetration depth δ into air can be expressed through κ and measured directly. Numerical modeling of both techniques has been carried out.

Keywords: surface plasmons, complex refractive index, dispersive spectroscopy, terahertz radiation, free electron laser.

Введение

Поверхностные плазмоны (ПП) – комплекс *p*-поляризованной ЭМ волны и волны свободных зарядов на поверхности проводника [1]. Зная показатель преломления ПП $\kappa=\kappa'+i\cdot\kappa''$, можно определить два параметра структуры: диэлектрическую проницаемость проводника (металла) или толщину и показатель преломления слоя.

На терагерцовых (ТГц) частотах ПП подобна плоской волне: длина распространения $L\approx1000\lambda$, глубина проникновения поля ПП в воздух $\delta\approx100\lambda$, а κ' превышает показа-

* Работа выполнена в рамках госконтрактов № П1132 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» и 02.740.11.0556, а также интеграционного гранта СО РАН № 89.

тель преломления воздуха n_{air} только на тысячные доли процента [2]. Такие особенности ТГц ПП сильно затрудняют определение их комплексного показателя преломления.

Однако, наличие на поверхности слоя диэлектрика (который может быть как объектом исследования, так и вспомогательным компонентом структуры) увеличивает обе части κ, что обуславливает реализуемость метода ПП-спектроскопии и в ТГц диапазоне.

Для определения κ″ измеряют интенсивность поля в двух точках трека ПП. Величину же κ′ определяют, наблюдая интерференцию двух объёмных волн, одна из которых порождена ПП [3].

Мы предлагаем два неинтерферометрических способа определения обеих частей комплексного показателя преломления ТГц ПП, которые можно реализовать как в динамическом, так и в статическом режиме.

В первом способе исходный пучок ПП разделяют на два новых, измеряют интенсивности новых пучков, после пробега ими различных расстояний, и угол φ их излучения в воздух на идентичных дифракционных решётках с периодом Λ (рис. 1). При этом значения κ′ и κ″ рассчитывают по формулам:

$$n_{air}\cdot\sin(\varphi) = \kappa' + \lambda/\Lambda, \tag{1}$$

$$\kappa'' = \frac{\lambda}{4\pi\cdot L} = \frac{\lambda\cdot\ln\left(I_1/I_2\right)}{2\pi\cdot\Delta\ell}, \tag{2}$$

где I_1 и I_2 – сигналы от приёмников 7; $\Delta\ell$ – различие путей регистрируемых пучков; λ – длина волны излучения в вакууме.

Способ применим и для немонохроматического излучения. В этом случае, падающее излучение необходимо сфокусировать, а вместо единичных приёмников 7 – использовать линейки фотодетекторов.

Так, например, при исследовании данным способом слоя ZnS толщиной 0,5 мкм на поверхности золота, содержащей две решётки с Λ=300 мкм, в диапазоне λ от 36 мкм до 100 мкм, спектр углов φ простирается от 41°52′ до 62°05′, а величина L варьируется в пределах от 6 см до 24 см, соответственно. Согласно (1) и (2), такие значения φ и L соответствуют изменениям κ′ от 1.00073 до 1.00368 и κ″ – от $4.9\cdot10^{-5}$ до $3.35\cdot10^{-4}$.

Во втором способе измеряемыми величинами являются глубина проникновения поля ПП в воздух δ и длина распростране-

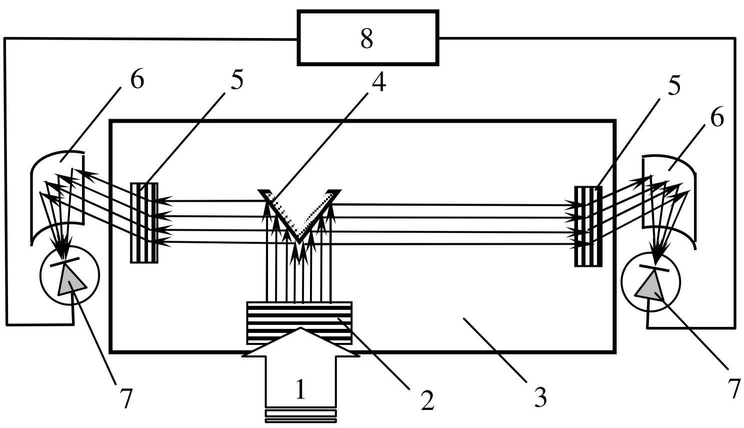

Рис. 1. Схема (вид сверху) неинтерференционного ТГц ПП-спектрометра: 1- излучение монохроматического источника, падающее на элемент согласования 2 с ПП; 3 – образец, содержащей исследуемый слой; 4 – уголковое зеркало; 5 – идентичные дифракционные решётки; 6 – цилиндрические зеркала; 7 –приёмники излучения; 8 – устройство обработки информации

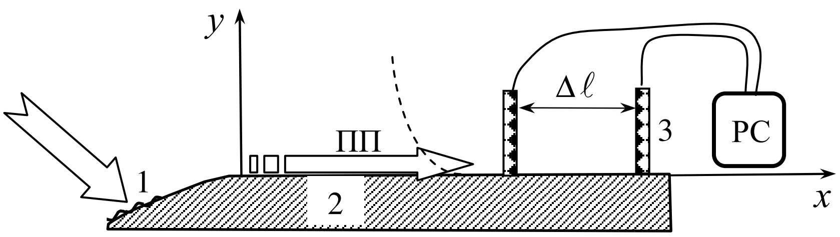

Рис. 2. Схема неинтерференционного ТГц ПП-спектрометра, в котором измеряют глубину проникновения поля ПП в воздухе

ния ПП L. Дело в том, что δ зависит от κ: $\delta = \left[\mathrm{Re}\left(k_0 \sqrt{\kappa^2 - n_{air}^2} \right) \right]^{-1}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$, и может быть измерена в ТГц диапазоне. Учитывая, что $\kappa'' = (2k_0L)^{-1}$, из выражения для δ можно получить форму для расчёта κ′ по измеренным значениям L и δ [1]:

$$\kappa' = \frac{1}{k_0\delta} \cdot \sqrt{\frac{1 + k_0^2\delta^2 \cdot \left[(\kappa')^2 + n^2 \right]}{1 + k_0^2\delta^2 \cdot (\kappa'')^2}}. \qquad (3)$$

На рис. 2 приведена схема, реализующая второй неинтерференционный способ определения показателя преломления ТГц ПП. Монохроматическое излучение источника направляют на согласующий элемент 1, размещённый на поверхности образца 2. Регистрацию поля ТГц ПП осуществляют линейкой приёмников 3, установленной перпендикулярно поверхности и перемещаемой вдоль неё. Линейка 3 подключена к компьютеру PC и содержит N пикселей.

Измерения выполняют не менее чем в двух точках трека ПП. Просуммировав сигналы от всех приёмников линейки 3, поступающие из обеих точек, по формуле (2) определяют значение κ″. Оценка же величины δ может быть дана PC в результате обработки сигналов с приёмников в любом из положений линейки 3. Для этого необходимо измерить силу тока I_m и I_j, вырабатываемого пикселями с номерами m, j и разделёнными расстоянием $\Delta y = y_m - y_j$ (где y_mи y_j – координаты пикселей). Формула для расчёта δ по результатам измерений, принимая во внимание экспоненциальный характер затухания поля ПП в воздухе, очевидна:

$$\delta = -\frac{\Delta y}{\ln\left(I_m / I_j \right)}. \qquad (4)$$

Так, например, для ПП, генерируемых на алюминиевом образце излучением с λ=110 мкм, величина δ ≈ 10 мм, а двукратное уменьшение интенсивности поля ПП происходит на расстоянии Δℓ=10 см. Такие значения δ и $\Delta I = I_m - I_j$ могут быть надёжно измерены и соответствуют κ′ = 1,0003 и $\kappa'' = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$.

[1] Вывод формулы (3) приведён в приложении.

Список литературы

1. Поверхностные поляритоны. Поверхностные электромагнитные волны на границах сред / Под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса. М.: Наука, 1985. 525 с.

2. *Князев Б. А., Кузьмин А. В.* Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 1. С. 108–122.

3. *Жижин Г. Н., Никитин А. К., Богомолов Г. Д., Завьялов В. В.* Генерация поверхностных плазмонов ТГц излучением лазера на свободных электронах и определение их эффективного показателя преломления // Генерация и применение терагерцового излучения: Сб. тр. Новосибирск, 2006. С. 83–92.

Приложение

Согласно определению, глубина проникновения поля ПП δ в граничащую с металлом среду, характеризуемую диэлектрической проницаемостью ε, соотносится с комплексным показателем преломления ПП $\kappa = \kappa' + i\cdot\kappa''$ следующим образом:

$$\delta = \left[\operatorname{Re}\left(k_0 \cdot \sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}\right)\right]^{-1}.$$

Введём обозначения:

$$\operatorname{Re}\left(\sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}\right) = \left(k_0 \cdot \delta\right)^{-1} = A;$$

$$\kappa' = x_1 \text{ и } \kappa'' = x_2.$$

Тогда квадратный корень можно представить в виде:

$$\sqrt{\kappa^2 - \varepsilon} = \sqrt{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right) + i \cdot 1 x_1 x_2} =$$

$$= \sqrt{\rho} \cdot \exp\left(i \cdot \varphi/2\right),$$

где $\rho = \sqrt{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right)^2 + \left(2x_1x_2\right)^2}$.

Но, согласно тригонометрической форме представления комплексных чисел $c = a + ib$, действительную часть любого из них можно записать в виде:

$$\operatorname{Re}(c) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\varphi) =$$

$$= \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos\left[\operatorname{arctg}(b/a)\right].$$

Тогда в нашем случае, имеем:

$$\operatorname{Re}\left(\sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}\right) =$$

$$= \operatorname{Re}\left(\sqrt{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right)^2 + i \cdot 2x_1x_2}\right) =$$

$$= \sqrt[4]{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right)^2 + \left(2x_1x_2\right)^2} \times$$

$$\times \cos\left[\frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{2x_1x_2}{x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon}\right)\right].$$

Принимая во внимание, что

$$\cos^2 x = \left[1 + \cos(2x)\right]/2,$$

предыдущее выражение можно представить в виде:

$$\operatorname{Re}\left(\sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}\right) =$$

$$= \sqrt[4]{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right)^2 + \left(2x_1x_2\right)^2} \times,$$

$$\times \sqrt{\left[\left(1 + \cos 2y\right)/2\right]},$$

где $y = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{2x_1x_2}{x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon}\right)$.

Воспользуемся известным соотношением:

$$\cos\left[\operatorname{arctg}(z)\right] = \left(\sqrt{1 + z^2}\right)^{-1}.$$

В нашем случае $z = \frac{2x_1x_2}{x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon}$. Тогда:

$$\operatorname{Re}\left(\sqrt{\kappa^2 - \varepsilon}\right) =$$

$$= \sqrt{\left[\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon + \sqrt{\left(x_1^2 - x_2^2 - \varepsilon\right)^2 + \left(2x_1x_2\right)^2}\right)/2\right]} =$$

$$= A.$$

Решив это уравнение относительно x_1, получим: $x_1 = A \cdot \sqrt{\frac{A^2 + x_2^2 + \varepsilon}{A^2 + x_2^2}}$.

И, наконец, подставив выражения для $A = \left(k_0 \cdot \delta\right)^{-1}$, $x_1 = \kappa'$ и $x_2 = \kappa''$, получим искомую формулу (3).

15.09.2010