

УДК 535.15;535.016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ИК-ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2009 г. Г. Д. Богомолов¹, Г. Н. Жижин², А. П. Кирьянов²,
А. К. Никитин², О. В. Хитров²

E-mail: alnikitin@mail.ru

Предложен новый метод определения комплексного показателя преломления поверхностных плазмонов терагерцового диапазона. Метод реализует идею асимметричной статической интерферометрии в планарном варианте, когда сбиваются не объемные, а поверхностные волны. Информация о действительной части показателя преломления содержится в периоде интерферограммы, о мнимой – в освещенности в ее экстремумах.

ВВЕДЕНИЕ

По величине комплексного показателя преломления $\kappa = \kappa' + i\kappa''$ (i – мнимая единица) поверхностных плазмонов (ПП) – разновидности поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) – можно определить как характеристики ПП (фазовую скорость, длину распространения, глубину проникновения поля в окружающую среду), так и диэлектрическую проницаемость материала образца или два параметра переходного слоя на его поверхности [1].

Актуальность проблемы определения показателя преломления ИК ПП обусловлена 1) бурным развитием импульсной лазерной техники, позволяющей изучать процессы с фемтосекундным разрешением; 2) интенсивным освоением терагерцового (ТГц) диапазона; 3) отсутствием иных оптических методов исследования тонких слоев на поверхности металлов в дальнем ИК-диапазоне.

В видимой области спектра значение κ определяют косвенно, чаще всего методом НПВО по ширине и угловому положению резонансного провала, обусловленного возбуждением ПП и наблюдаемого в отраженном излучении при изменении его частоты или угла падения [1], реже – методами интерферометрии [2] или болометрии [3]. Существенное отличие фазовой скорости ПП $V_\phi = C/\kappa'$ видимого диапазона от скорости света C в окружающей среде и достижения в области цифровой фотографии позволили измерить V_ϕ непосредственно [4].

ПП дальнего ИК-диапазона по своим характеристикам схожи с плоской волной в окружающей среде: их фазовая скорость отличается от скорости

света в ней на сотые доли процента, а длина пространства $L = (2k_0\kappa'')^{-1}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$, варьируется от нескольких сантиметров в среднем ИК-диапазоне до нескольких метров в ТГц-диапазоне [5].

Применение метода НПВО для определения характеристик ПП в ИК-диапазоне невозможно из-за неприемлемо большого влияния призмы на ПП [6], поэтому длину распространения ИК ПП измеряют непосредственно методом двух призм [1], состоящим в измерении интенсивности поля ПП не менее чем в двух точках трека волны. Для определения же κ' было предложено использовать метод двулучевой интерферометрии, основанный на интерференции двух объемных волн: опорной и зондирующей, порожденной дифрагировавшей на крае образца поверхностной волной [7]. Такой метод определения κ' назван фазовой ПЭВ-спектроскопией и был апробирован как в среднем, так и в дальнем ИК-диапазонах с использованием лазерного излучения.

Позднее было предложено определять обе части κ по интерференционным картинам, наблюдаемым в плоскости падения [8]. Однако точность такого метода оказалась недостаточной вследствие того, что 1) интерферирующие пучки сбивались под большим углом ($\geq 10^\circ$), в результате чего период картины Λ оказался сравнимым по величине с длиной волны λ ; 2) диаграммы направленности интерферирующих волн зависели от особенностей дифракционных элементов – края экрана, преобразующего падающее излучение в ПП и порождающего первую объемную волну, и края образца, преобразующего ПП во вторую объемную волну; 3) волновые фронты интерферирующих волн существенно отличались от плоских и, как следствие, период и контраст интерферограмм уменьшались с увеличением расстояния до поверхности образца.

¹ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва.

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва.

СТАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ ИК-ДИАПАЗОНА И СХЕМА ПЛАЗМОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В данной работе предложен новый метод определения комплексного показателя преломления ИК ПП, позволяющий повысить точность измерений и основанный на концепции асимметричной статической интерферометрии [9]. Суть метода состоит в том, что анализируемую интерференционную картину формируют не объемные, а поверхностные волны. В результате из процесса измерений исключаются элементы с неизвестными характеристиками: край образца и край экрана. Кроме того, угол сведения интерферирующих пучков ПП предложено выбирать малым, а регистрацию интерферограммы – осуществлять в плоскости поверхности образца. Формируемая пучками интерферограмма содержит информацию как о k' , так и о k'' , которая извлекается из результатов измерений с помощью их математической обработки.

Использование в методе фазовой ПЭВ-спектроскопии поверхностных вместо объемных волн допустимо в ИК-диапазоне, поскольку в этом случае ПП имеют, с одной стороны, макроскопическую длину распространения, а с другой стороны, глубина проникновения поля ПП в воздух достигает нескольких сантиметров [10].

На рис. 1 приведена схема интерферометра, реализующего предлагаемый метод. Здесь использованы обозначения: 1 – исходный пучок ПП; 2 – образец; 3 – уголковое зеркало, разделяющее исходный пучок ПП на два новых когерентных пучка; 4, 5 – зеркала, отражающие пучки ПП в первом и втором плечах интерферометра; 6 – второе уголковое зеркало, сбивающее оба пучка ПП; 7 – линейка фотодетекторов; 8 – вычислительное устройство. Все зеркала установлены на поверхности образца 2 и ориентированы перпендикулярно к ней.

Интерферометр работает следующим образом. Исходный пучок лучей ПП 1 шириной d , направляемый поверхностью образца 2, достигает первого уголкового зеркала 3, делящего его на два когерентных пучка ПП, распространяющихся перпендикулярно треку исходного пучка 1 в противоположных направлениях. Новые пучки ПП достигают зеркал 4 и 5, расположенных на расстояниях a и b от соответствующих граней зеркал 3 и 6 отражаются от них и падают на смежные грани уголкового зеркала 6, грани которого ориентированы таким образом, чтобы отраженные от них пучки падали на линейку фотодетекторов 7. Прошедшие по поверхности образца различные расстояния пучки ПП формируют интерференционную картину с периодом Λ , регистрируемую линейкой 7. Устройство 8, используя электрические сигналы линейки 7 и известные координаты ее элементов,

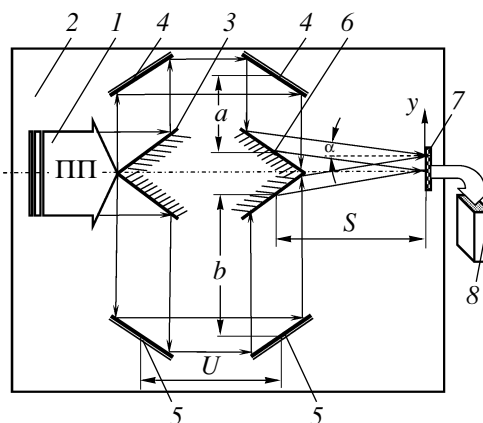


Рис. 1. Схема статического асимметричного ПП-интерферометра.

определяет величину Λ и освещенность в экстремумах интерферограммы, а затем, на основе этих результатов, рассчитывает обе части комплексного показателя преломления ПП.

В соответствии с теорией интерференции [11, 12], пространственный период картины Λ связан с величиной k' соотношением

$$k' = \lambda / (4\Lambda \sin \alpha). \quad (1)$$

Распределение же интенсивности $I(y)$ излучения на линейке 7, в предположении плоскостности волновых фронтов интерферирующих пучков ПП, описывается выражением

$$I(y) = I_0 D \exp[-2k_0 k''(U + S/\cos \alpha)] \times \{ [-2k_0 k'' \exp[(2a + y \sin \alpha)] + \exp[-2k_0 k''(2b - y \sin \alpha)] + 2 \exp[-2k_0 k''(a + b)] \} \times \cos[2k_0 k'(b - a) + 2k_0 k' y \sin \alpha], \quad (2)$$

где $y = 0$ – координата центра линейки 7; I_0 – интенсивность излучения исходного пучка в плоскости граней уголкового зеркала 3; U – расстояние между центрами пучков, отраженных зеркалами 4 и 5; S – расстояние от центров пучков, отраженных уголковым зеркалом 6 до линейки 7; a и b – половины расстояний, проходимых пучками в направлениях, перпендикулярных треку исходного пучка в первом и втором плечах интерферометра; α – угол между любым из интерферирующих пучков и исходным пучком; D – динамическая (вольт-ваттная) чувствительность фотодетекторов.

По результатам измерений интенсивности интерферограммы в точках с известными координатами y можно, используя численные методы решения выражения (2), рассчитать величину мнимой части k'' показателя преломления ПП.

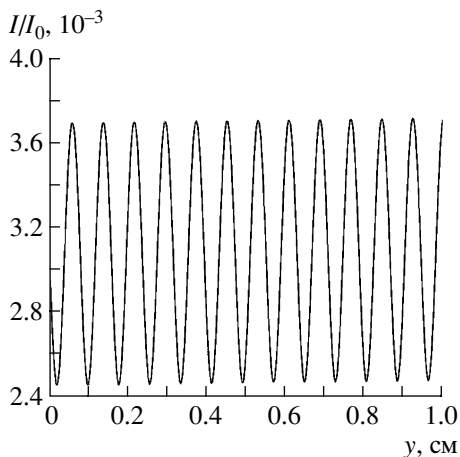


Рис. 2. Расчетная интерференционная картина.

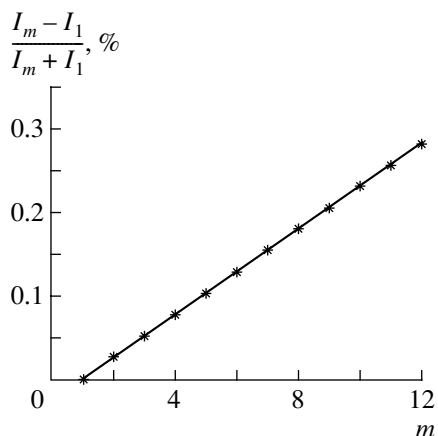


Рис. 3. Зависимость относительного изменения интенсивности в максимумах интерференционной картины от номера m максимума для рассмотренного примера применения предлагаемого метода определения комплексного показателя преломления ИК ПП.

Отметим, что для успешного функционирования интерферометра, реализующего метод, интерферирующие поверхностные волны должны иметь плоский волновой фронт, что упрощает процедуру обработки результатов измерений. Это условие надежно выполняется в направлении, перпендикулярном поверхности образца, поскольку вертикальный размер фотоприемников значительно меньше глубины проникновения поля ИК ПП в окружающую среду. В плоскости же образца, волновой фронт ПП линейен и ориентирован перпендикулярно направлению распространения ПП, поскольку угловое дифракционное уширение пучка (λ/d) мало, порядка 10^{-3} рад, вследствие того, что поперечный размер пучка d во много раз больше λ [11, 12].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАЗМОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим определение с его помощью показателя преломления ПП, возбуждаемых лазерным излучением с $\lambda = 110$ мкм на плоской поверхности алюминиевого образца, размещенного в воздухе. Ширину исходного пучка ПП d положим равной 2.0 см. Углы наклона граней зеркала 3 относительно плоскости симметрии исходного пучка выберем равными 45° , а углы наклона зеркала 6 – $47^\circ 00'$. Пару зеркал 4, отражающих пучок ПП в первом плече интерферометра, разместим на расстоянии $a = 2.0$ см от зеркала 3, а пару зеркал 5, отражающих пучок ПП во втором плече интерферометра, – на расстоянии $b = 12.0$ см. Расстояние U между центрами пар зеркал 4 и 5 положим равным 5.0 см. Тогда различие геометрических путей первого и второго пучка окажется равным 20.0 см. Расстояние же S от центров граней уголкового зеркала 6 до линейки 7, выберем равным 15.354 см, что обеспечит угол сбоя пучков $\alpha = 2.0^\circ$.

Линейка 7, состоящая из фотодетекторов размером 10 мкм, зарегистрирует интерференционную картину, имеющую неизменный период $\Lambda = 0.79$ мм, контраст которой плавно нарастает по мере роста координаты y . Расчетная картина, нормированная на константу $I_0 D$, представлена на рис. 2. Подставив в формулу (2) значения Λ , λ и угла α , получим $k' = 1.0008$.

На рис. 3 приведена зависимость отношения $(I_m - I_1)/(I_m + I_1)$, выраженного в процентах, от номера m максимума картины, где I_m , I_1 – интенсивность излучения в m -ном и первом максимумах соответственно. Для двенадцатого максимума, например, это отношение равно 0.28%, что соответствует превышению I_{12} над I_1 приблизительно на 0.56%. Такое различие интенсивностей надежно регистрируется выпускаемыми промышленностью детекторами терагерцового излучения [13, 14]. Тогда решение уравнения (2), при использовании оговоренных выше значений λ , α , отношения $(I_{12} - I_1)/(I_{12} + I_1)$ и $\Lambda = 0.79$ мм, дает величину $k'' = 2 \cdot 10^{-4}$.

Учитывая, что точность измерения интенсивности ИК-излучения современными детекторами не ниже $10^{-3}\%$, стабильность значения λ порядка 1%, и полагая точность измерения координат максимумов картины равной 10 мкм, получим, что точность определения k' и k'' предлагаемым методом составляет 0.1 и 1% соответственно. Это на порядок превышает точность определения k' и k'' ИК ПП при использовании известных методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, переход от интерферометрии объемных волн к интерферометрии поверхностных волн, а также применение в новом методе кон-

цепции асимметричной интерферометрии, позволяет не только повысить точность определения обеих частей – действительной и мнимой – комплексного показателя преломления поверхностных плазмонов инфракрасного диапазона, но и сократить время измерений до длительности одного импульса излучения источника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поверхностные поляритоны. Поверхностные электромагнитные волны на границах сред / Под ред. Аграновича В.М., Миллса Д.Л. М.: Наука, 1985. 525 с.
2. Никитин А.К., Тищенко А.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 11. С. 76.
3. Xie Y.-L., Li H., Zhou Y.-L. et al. // Appl. Phys. A. 1989. V. 48. № 5. P. 497.
4. Bai M., Guerrero C., Ioanid S. et al. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. 115416.
5. Жижин Г.Н., Никитин А.К., Богомолов Г.Д. и др. // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 100. № 5. С. 798.
6. Hirori H., Nagai M., Tanaka K. // Opt. Express. 2005. V. 13. № 26. P. 10801.
7. Silin V.I., Voronov S.A., Yakovlev V.A., Zhizhin G.N. // Int. J. Infrared & Millimeter Waves. 1989. V. 10. № 1. P. 101.
8. Zhizhin G.N., Alieva E.V., Kuzik L.A. et al. // Appl. Phys. A. 1998. V. 67. P. 667.
9. Егорова Л.В., Ермаков Д.С., Кувалкин Д.Г., Таганов О.К. // Оптикомех. пром-сть. 1992. № 2. С. 3.
10. Zhizhin G.N., Nikitin A.K., Bogomolov G.D. et al. // Inf. Phys. Technol. 2006. V. 49. № 1–2. P. 108.
11. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Оптика. М.: Наука, 1980. 752 с.
12. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Мир, 1983. 683 с.
13. Вольф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. Т. 3. Приборная база ИК-систем. М.: Мир, 1999. 472 с.
14. Кубарев В.В. // Сб. трудов раб. совещания учреждений РАН “Генерация и применение терагерцевого излучения”, 24–25 ноября 2005 г. Новосибирск, 2006. С. 35.