

УДК 535.14;535.016;621.391

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ НА НОВОСИБИРСКОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2013 г. В. В. Герасимов^{1,2}, Г. Н. Жижин³, Б. А. Князев^{1,2}, И. А. Котельников¹,
Н. А. Митина^{1,2}, А. К. Никитин^{2,3}

E-mail: einy@ngs.ru

Описан диагностический комплекс для исследования поверхностных плазмон-поляритонов, генерированных монохроматическим излучением Новосибирского терагерцевого лазера на свободных электронах, включающий в себя три детектирующие системы: неохлаждаемый матричный микроболометрический приемник, сопряженный с собирающей линзой, оптоакустическая ячейка Голя и сверхпроводниковый болометр на горячих электронах. Приведены примеры экспериментов, демонстрирующие работу данного комплекса.

DOI: 10.7868/S0367676513090147

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП), являющиеся разновидностью поверхностных электромагнитных волн, представляют собой комплекс неоднородной p -поляризованной волны и волны индуцированных свободных зарядов, распространяющийся вдоль проводящей поверхности [1]. Напряженность поля ППП максимальна у границы раздела сред и экспоненциально убывает по мере удаления от нее; при этом доля энергии поля, переносимая в воздухе, превышает 90% и пропорциональна длине волны излучения λ . Эта особенность ППП обуславливает их широкое применение в спектроскопии проводящей поверхности, а также в сенсорных и коммуникационных устройствах [2]. Определен комплексный показатель преломления ППП $k = k' + ik''$ (i – мнимая единица), можно рассчитать диэлектрическую проницаемость металла или два параметра переходного слоя на его поверхности [3].

Терагерцевые (ТГц) ППП 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 распространения $L = (2k_0k'')^{-1}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$, ва-

рьируется от нескольких сантиметров в среднем ИК- до нескольких метров в ТГц-диапазоне [2].

Исследование ТГц ППП осуществляется в настоящее время главным образом с использованием широкополосных импульсных источников излучения и фотопроводящих дипольных антенн методом *time-domain spectroscopy* (спектроскопия с высоким временным разрешением) [4–6], реже – с использованием лазерных источников и традиционных фотодетекторов [7, 8]. Специфика источников в значительной степени определяет круг возможных методов исследования плазмон. При этом результаты, полученные разными авторами, часто значительно различаются.

С созданием перестраиваемых монохроматических источников ТГц-излучения появилась возможность применить методы исследований ППП, отличающиеся от ранее использованных. В настоящее время наиболее мощный источник монохроматического ТГц-излучения – Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ), особенностью которого является возможность плавной перестройки частоты излучения [9]. Новосибирский ЛСЭ генерирует непрерывную последовательность импульсов линейно поляризованного излучения длительностью 100 пс, следующих с частотой повторения 5.6 МГц и средней мощностью около 10 Вт в диапазонах 120–240 и 40–70 мкм. Пучок ЛСЭ имеет полную пространственную когерентность и малую расходимость порядка $3 \cdot 10^{-1}$ радиана.

Интерес к “монохроматическим” поверхностным плазмонам оправдан возможностью их потенциального применения для диагностики материалов, тонких пленок, биологических объектов, в ТГц-системах передачи и обработки информации.

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), Новосибирск.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Новосибирский государственный университет”, Новосибирск.

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской Академии наук (НТЦ УП РАН), Москва.

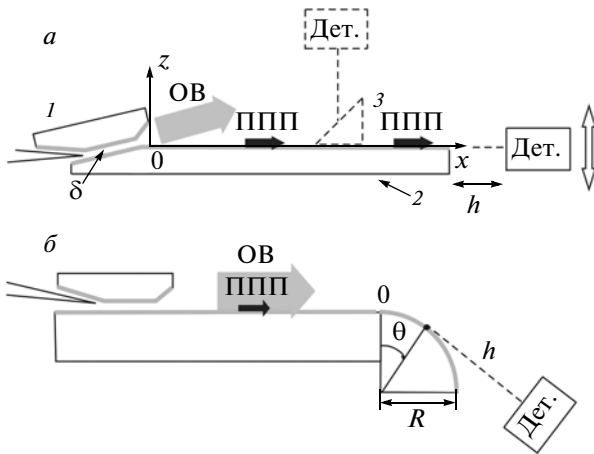


Рис. 1. Экспериментальные конфигурации: 1 – призма, 2 – образец, 3 – 45-градусное зеркало.

Поскольку ППП являются неизлучающими волнами, локализованными у поверхности проводника, исследование их поля возможно либо в отраженном от элемента преобразования излучении методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [10], либо путем внедрения в поле специального зонда [11, 12], либо исследуя объемную волну (ОВ), порождаемую ППП на элементе обратного преобразования. Приближение призмы в геометрии НПВО или какого-либо материального зонда к поверхности проводника заведомо возмущает поле ППП. При использовании элемента преобразования ОВ в ППП, например экрана, помещенного на некотором расстоянии от поверхности образца, наблюдается веер ОВ, порожденных ППП при дифракции на данном элементе, поэтому перечисленные выше методы исследования не дают достоверной информации о характеристиках поверхностной волны.

В данной работе при исследовании ППП мы регистрировали электромагнитное поле, формирующееся после “срыва” плазмонов с края образца, либо с искривленной поверхности. Для этой цели были использованы три детектирующие системы, описанные в следующем разделе. В экспериментальной части приведены примеры экспериментов, выполненных с использованием ТГц-излучения Новосибирского ЛСЭ. Результаты экспериментов сравниваются с теоретическим анализом.

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТГц ППП

На рис. 1 схематически показаны экспериментальные конфигурации, которые мы использовали для формирования и детектирования ППП. Терагерцевое излучение ЛСЭ фокусировалось на щель плоскопараллельного волновода, образованного поверхностью образца 1 и нижней гра-

нью стеклянной призмы 2. Обе поверхности были покрыты слоем золота толщиной 1 мкм. Поскольку толщина скин-слоя значительно меньше одного микрона, слой золота можно считать полубесконечной средой. При ширине щели δ порядка длины волны, которая в наших экспериментах составляла 140 мкм, сфокусированное излучение преобразовывалось в волноводные ТМ-моды, которые, дифрагируя на ребре выходного среза призмы, преобразовывались в объемную волну и в ППП [5]. Для того чтобы увеличить коэффициент преобразования мод в ППП [13] и лучше “прижать” поверхностную волну к проводнику [5], на образцы поверх золота наносился слой диэлектрика ZnS толщиной 0.1–1 мкм. Как видно из рисунка, для исследования поля ППП необходимо избавиться от влияния ОВ. Для этого конец образца, примыкающий к призме, имел гладкий изгиб, соединяющий две плоские грани (см. рис. 1а). Данная схема впервые была предложена и реализована Е. Котелесом и соавторами в 1981 г. [14].

Поверхностные плазмон-поляритоны, достигнув края образца, дифрагировали на торце. Поле вблизи торца, очевидно, связано с колеблющимися зарядами, а в дальней зоне представляет собой свободную электромагнитную волну. Это поле регистрировалось двумя способами. В первом случае записывалось изображение волнового фронта на торце образца с помощью неохлаждаемого матричного микроболометрического приемника (ММБП) и линзы ТРХ (материал поли-4-метилпентен-1) с фокусным расстоянием 50 мм. Матричный приемник, изготовленный в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, содержит 320×240 болометров размером 51 мкм (общий размер матрицы 16×12 мм), чувствительных к ТГц-излучению [15]. Среднее значение пороговой чувствительности или noise equivalent power (NEP) одного болометра составляет порядка $2 \cdot 10^{-10}$ Вт \cdot Гц $^{-1/2}$ при 130 мкм. Альтернативным способом регистрации было измерение интенсивности электромагнитного поля в пространстве за торцом образца с помощью оптико-акустической ячейки Голея (NEP $\approx 1.4 \cdot 10^{-10}$ Вт \cdot Гц $^{-1/2}$) с входной щелью шириной 0.2 мм и синхронного усилителя SR-830. С помощью данного приемника измеряли интенсивность поля в зависимости от смещения z по нормали к поверхности образца на расстоянии h от его торца.

Для измерения длины распространения ППП вдоль поверхности образца использовали 45-градусное зеркало 3 (выделено штрихами на рис. 1а). Плазмон, достигнув зеркала, преобразовывался в объемную волну и детектировался одним из вышеупомянутых способов. Перемещая зеркало вдоль поверхности, измеряли интенсивность ОВ в зависимости от расстояния x , пробегаемого ППП.

В экспериментальной конфигурации б, показанной на том же рисунке, использовались плоские

образцы, к концам которых была приклеена четверть цилиндра. Пройдя вдоль плоской поверхности, ОВ распространялись в исходном направлении, а ППП следовал по цилиндрической поверхности. Вследствие радиационных потерь на изогнутой поверхности ППП частично преобразовывался в ОВ, которая детектировалась сверхпроводниковым болометром на горячих электронах компании “Сконтел”, охлаждаемым до гелиевых температур [16]. Данный приемник в ТГц-диапазоне имеет чувствительность $NEP \approx 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ при 130 мкм и, в отличие от ячейки Голя, имеет малый приемный угол $\delta\theta \approx 1^\circ - 2^\circ$. Последнее свойство детектора оказалось очень важным для данной схемы, так как диаграмма направленности “сорвавшейся” с цилиндрической поверхности волны оказалась очень узкой и составляла несколько градусов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью диагностического комплекса был получен обширный экспериментальный материал; ниже приведено несколько примеров результатов измерений. На рис. 2 показаны снимки волнового фронта, записанного с помощью ММБП (см. схему *a* на рис. 1) в области позади торца. Изображения соответствуют распределению интенсивности поля на торце (масштаб указан для предметной плоскости): на рис. 2*a* – снимок, полученный на образце с золотым напылением, на рис. 2*б* – на образце с золотым напылением, покрытым слоем ZnS толщиной 0.25 мкм. Длина волны излучения составляла 140 мкм, а ширина зазора в волноводе $\delta \approx 0.2$ и 0.5 мм для правого и левого снимков соответственно. Из рисунков видно, что для непокрытого золота интенсивность волны остается достаточно большой в направлении, перпендикулярном поверхности образца. Нанесение диэлектрического покрытия радикально меняет характеристики волны: она имеет более узкое распределение интенсивности и малый угловой разброс.

Для сравнения на рис. 3 показаны зависимости интенсивности поля от координаты z на расстоянии $h = 1$ мм от торца, измеренные на тех же образцах с помощью ячейки Голя. Как и в предыдущем случае, на золоте зависимость имеет широкий профиль, а на золоте с покрытием ZnS – профиль “прижимается” к поверхности и достигает максимума на 1 мм от поверхности образца. Таким образом, результаты, полученные двумя разными детектирующими методами, хорошо согласуются между собой. Указанный вид распределения не соответствует известному (экспоненциально спадающему) распределению поля поверхностной волны, что сначала вызывает некоторое удивление. Однако мы наблюдаем не собственно ППП, а поле, возникшее при их “срыве” с поверхности. На

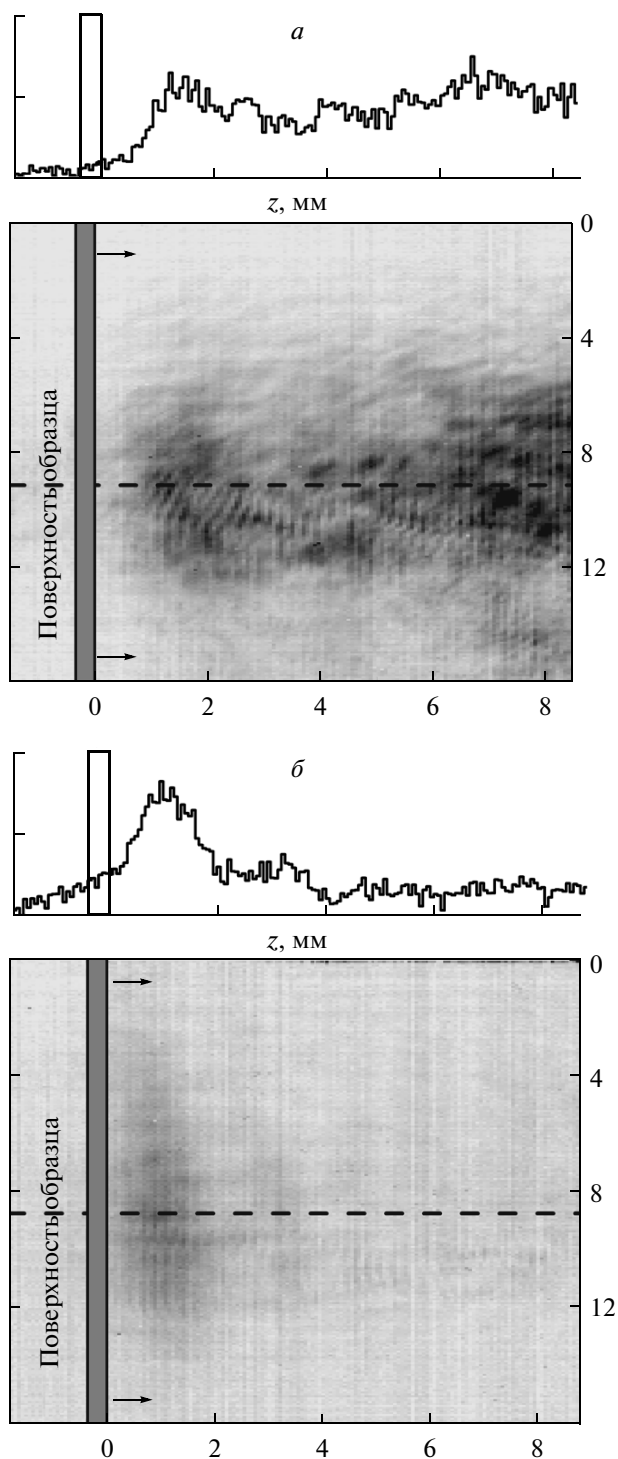


Рис. 2. Изображения, записанные с помощью комплекса линза – матричный микроболометрический приемник для золота (*a*) и для золота с покрытием ZnS толщиной 0.25 мкм (*б*). Масштаб указан для предметной плоскости.

возможность подобного вида распределения указывает теоретическая работа [17]. И. А. Котельниковым выполнен теоретический анализ дифракции ППП на прямоугольном проводящем торце

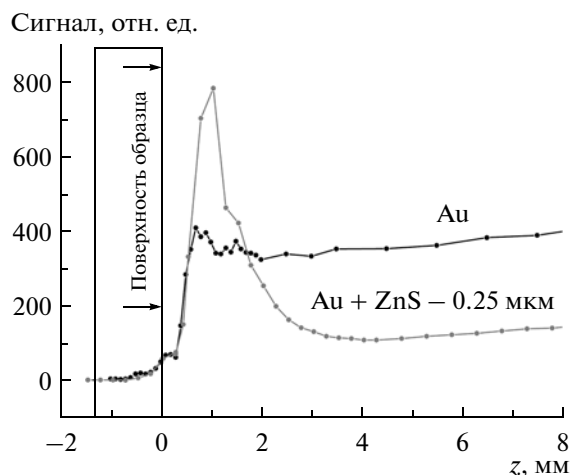


Рис. 3. Зависимости интенсивности поля от координаты z , измеренные ячейкой Голея на расстоянии $h = 1$ мм от торца образца.

методом Зоммерфельда–Малюжинца, в котором были исправлены некоторые ошибки в расчетах [17]. Результаты расчетов качественно и количественно совпали с экспериментальными результатами⁴.

На тех же образцах, используя схему с 45-градусным зеркалом Z , с помощью ячейки Голея были измерены длины распространения ППП, которые составили 30 мм для золотой поверхности, и 10 мм для золота с покрытием ZnS. Значительное уменьшение длины распространения при нанесении диэлектрика свидетельствует об увеличении поглощения плазмонов в металле, которое, согласно упомянутым теоретическим расчетам, вызвано перераспределением поля ППП в металле.

С помощью сверхпроводникового болометра на горячих электронах были проведены эксперименты на цилиндрических образцах (см. рис. 1б) с покрытием ZnS толщиной 0.2 и 1 мкм. Измерены зависимости интенсивности объемной волны, возникающей при срыве ППП с цилиндрической поверхности, от координаты (угол θ). Измерения проводились, начиная с угла $\theta \geq 15^\circ$, при котором объемная волна от элемента преобразования заведомо не должна попадать в апертуру детектора, до максимального угла 40° – 45° , при котором еще удавалось зарегистрировать сигнал. С увеличением θ наблюдался экспоненциальный спад интенсивности излучения.

⁴ Теория будет опубликована отдельно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный диагностический комплекс, включающий в себя три детектирующие системы (матричный микроболометрический приемник, сопряженный с собирающей линзой, оптоакустическая ячейка Голея и сверхпроводниковый болометр на горячих электронах), продемонстрировал высокую эффективность и надежность при невозмущающих исследованиях поверхностных плазмон-поляритонов, генерированных монохроматическим терагерцевым излучением лазера на свободных электронах.

Благодарим руководство, операторов и обслуживающий персонал Новосибирского ЛСЭ за обеспечение ТГц-излучением и содействие при проведении экспериментов. Работы выполнены при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М.: Физматлит, 2009. 482 с.
2. Maier S.A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer, Springer Science + Business Media LLC, 2007. 223 p.
3. Gerasimov V.V., Knyazev B.A., Nikitin A.K., Zhizhin G.N. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. 171912.
4. Saxler J., Rivas J.G., Janke C. et al. // Phys. Rev. (B). 2004. V. 69. 155427.
5. Gong M., Jeon T.-I., Grischkowsky D. // Opt. Express. 2009. V. 17. № 19. P. 17088.
6. Nazarov M., Coutaz J.-L. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. V. 32. P. 1054.
7. Seymour R.J., Koteles E.S., Stegeman G.I. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. № 11. P. 1013.
8. Steijn K.W., Seymour R.J., Stegeman G.I. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. № 18. P. 1151.
9. Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Kayran D.A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. Phys. Res. 2005. V. A543. P. 81.
10. Okada T., Nagai M., Tanaka K. // Opt. Express. 2008. V. 16. № 8. P. 5633.
11. Ahn K.J., Lee K.G., Kihm H.W. et al. // New J. Physics. 2008. V. 10. 105003.
12. Mueckstein R., Mitrofanov O. // Opt. Express. 2011. V. 19. № 4. P. 3212.
13. Seymour R.J., Krupczak J.J., Stegeman G.I. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. № 4. P. 373.
14. Koteles E.S., McNeill W.H. // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1981. V. 2. P. 361.
15. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Марчишин И.В. и др. // Автометрия. 2011. Т. 47. № 5. С. 109.
16. Гольцман Г.Н. // Сорос. образоват. журн. 1996. № 4. С. 90.
17. Zon V.B. // J. Opt. Soc. Amer. B. 2007. V. 24. № 8. P. 1960.