

07;12

Способ индикации дифракционных спутников поверхностных плазмонов терагерцового диапазона

© В.В. Герасимов, Б.А. Князев, А.К. Никитин, В.В. Никитин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, Новосибирск
Российский университет дружбы народов, Москва
E-mail: alnikitin@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2010 г.

Предложен и апробирован способ индикации дифракционных спутников поверхностных плазмонов (ПП) терагерцового (THz) диапазона, возникающих при генерации поверхностной волны лазерным излучением. Своевременное обнаружение таких спутников позволит повысить точность измерительных плазмонных THz-устройств. Идея способа состоит в том, что локальное тонкослойное покрытие поверхности, направляющей ПП, приводит к уменьшению интенсивности ПП на одну и ту же величину, независимо от месторасположения покрытия. Тестовые эксперименты, выполненные на Новосибирском лазере на свободных электронах, подтвердили эффективность способа.

Поверхностные плазмоны (ПП) представляют собой комплекс волны плотности свободных электронов в приповерхностном слое металла и неоднородной p -поляризованной электромагнитной волны, напряженность поля которой максимальна на поверхности и экспоненциально затухает при удалении от нее [1]. Условием существования ПП является отрицательность действительной части диэлектрической проницаемости металла. Это условие удовлетворяется для ряда металлов не только в видимой области спектра, но и в инфракрасном диапазоне, включая его длинноволновую часть, получившую название терагерцовой (THz) (частота от 0.1 до 10 THz) [2].

В настоящее время ПП широко применяются в спектроскопии поверхности и сенсорных устройствах видимого и среднего ИК-диапазонов. С созданием перестраиваемых лазерных источников и чувствительных приемников THz излучения появилась возможность разработки THz ПП спектрометров тонкослойных объектов. Однако

механический перенос известных методик возбуждения и детектирования ПП в THz область невозможен. Это обусловлено следующими особенностями ПП на THz частотах:

1) их длина распространения и глубина проникновения поля в окружающую среду достигают макроскопических значений, 1000λ и 100λ (λ — длина волны излучения в вакууме) соответственно;

2) показатель преломления ПП на свободной поверхности металла превышает показатель преломления окружающей среды только на тысячные доли процента;

3) эффективность преобразования объемного излучения в THz ПП на свободной границе раздела „металл–воздух“ мала (тысячные доли процента);

4) практическая невозможность использования метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) для измерения характеристик THz ПП, поскольку такие ПП выходят далеко за пределы падающего пучка, не внося заметного вклада в отраженное излучение;

5) преобладание дифракционного механизма трансформации падающего излучения в поверхностную волну при использовании всех известных методов возбуждения ПП (апертурного, призмного, решеточного и др.).

Вследствие этих особенностей возбуждение THz ПП пучком лазерного излучения (что предпочтительно в абсорбционной ПП спектроскопии) сопровождается порождением мощных паразитных объемных волн дифракционного происхождения, пространственно совмещенных с THz ПП [3].

Известны следующие способы подавления таких дифракционных помех:

1) размещение над поверхностью перпендикулярно треку ПП непрозрачного экрана [4]. Но такой прием приводит к дифракции от края экрана теперь уже ПП (а не объемной волны) и возникновению ллойдовской интерференции пучков от края экрана и его изображения в зеркальной поверхности образца;

2) размещение обоих элементов преобразования (объемного излучения в ПП и обратно) на сопряженных скругленных ребром гранях образца [5]. В этом случае фотоприемник должен быть удален на большое расстояние от ребра, чтобы значительно уменьшить вклад дифрагировавшего излучения в фототок;

3) формирование в поверхности канавки цилиндрической формы, ориентированной перпендикулярно треку ПП, и размещение над ее дном непрозрачного экрана, край которого опускают в канавку ниже уровня поверхности [6]. Такое решение имеет много общего со способом 1), в том числе и его недостатки;

4) формирование в поверхности канавки конической формы, ориентированной перпендикулярно треку ПП и имеющей изменяющуюся по линейному закону образующую [7]. Такая канавка отклоняет ПП от исходного направления распространения, но не воздействует на дифрагировавшее излучение, что позволяет разделить пространственные ПП и объемное излучение. К сожалению, способ предполагает необратимое механическое воздействие на образец и к настоящему времени не апробирован.

В среднем ИК-диапазоне ПП идентифицируют по следующим признакам: 1) исчезновение сигнала с фотоприемника, детектирующего ПП, при смене поляризации излучения с p - на s -тип; 2) экспоненциальное затухание интенсивности ПП с увеличением их пробега; 3) экспоненциальное затухание поля ПП при удалении от поверхности; 4) резкое уменьшение интенсивности ПП при конденсации на поверхности выдыхаемой влаги. Однако в THz диапазоне эти признаки менее выражены. Так, дифракция на краю экрана чувствительна к смене поляризации излучения [8]. Заметить экспоненциальное уменьшение интенсивности THz ПП на образце длиной 10–20 см непросто. Промер экспоненты интенсивности поля ПП вдоль нормали к поверхности возможен только в отсутствии дифракционных спутников. И наконец, реакция интенсивности ПП на образование слоя конденсата завуалирована поглощением THz излучения выдыхаемыми парами воды.

Таким образом, ввиду практической невозможности избавиться от дифракционных спутников THz ПП, возникающих при преобразовании объемного излучения в поверхностную волну, и латентности идентификационных признаков ПП актуальна задача разработки оперативного способа обнаружения дифракционных волн в поле THz ПП.

Суть предлагаемого способа состоит в изменении измерения интенсивности ПП при последовательном наложении на поверхность вдоль трека ПП одного и того же тонкослойного локального покрытия. Покажем, что размещение такого покрытия на двух любых участках трека поверхностной волны, не совмещенной с пучками дифрагировавшего излучения, должно приводить к изменению интенсивности ПП,

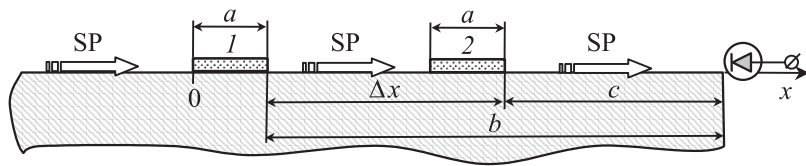


Рис. 1. Схема размещения локального покрытия протяженностью a на поверхности, направляющей ТНз ПП.

детектируемых в одной и той же точке трека (например, на крае образца), на одинаковую величину.

Очевидно, что нанесение на поверхность покрытия протяженностью a обусловит дополнительное затухание ПП: во-первых, увеличатся джоулевы потери вследствие перераспределения поля ПП из окружающей среды в металл; во-вторых, появятся дополнительные радиационные потери из-за дифракции ПП на краях покрытия. Учет оба эти вида потерь некоторым коэффициентом β .

Установим вначале съемное покрытие в положение 1, когда его передний край имеет координату $x = 0$, а расстояние от правого края покрытия до края образца, у которого расположен фотоприемник, равно b (рис. 1). Пусть интенсивность поля ПП в точке $x = 0$ равна J_0 . После преодоления покрытия интенсивность ПП станет равной $J_0\beta$. Тогда приемник зарегистрирует интенсивность

$$J_1 = J_0\beta \exp(-ab),$$

где α — коэффициент поглощения ПП на свободной от покрытия поверхности образца.

После перемещения покрытия на расстояние Δx , в положение 2, интенсивность ПП на входе фотоприемника будет описываться выражением

$$J_2 = J_0 \exp(-\alpha\Delta x)\beta \exp(-ac) = J_0\beta \exp[-\alpha(\Delta x + c)] = J_0\beta \exp(-ab),$$

где c — расстояние, проходимое ПП от покрытия до приемника после перемещения.

Как видим, $J_1 = J_2$, т.е. в отсутствии дифракционных спутников интенсивность ПП уменьшается на одну и ту же величину при размещении данного локального покрытия на любом участке трека ПП.

По направлению распространения дифракционные спутники ПП можно разделить на три группы: идущие строго параллельно поверхности, а также имеющие волновой вектор, направленный либо от поверхности, либо к ней.

От спутников, направленных от поверхности, фотоприемник можно защитить приемом, предложенным в [5]. Спутники же, направленные под небольшим углом к поверхности или параллельные ей, могут породить в приемнике паразитные сигналы. Обнаружение таких спутников THz ПП — задача предлагаемого способа.

Предположим, что ПП имеют пучки-спутники, направленные к поверхности. Тогда при последовательном наложении покрытия на различные участки трека ПП с приемника получим сигналы различной величины. Действительно, при одном местоположении покрытия такие спутники отражаются от него, при ином — от поверхности образца, поэтому сила фототока в этих ситуациях окажется разной.

Обнаружить спутники, идущие строго параллельно поверхности, можно следующим образом. Известно, что при нанесении на поверхность протяженного покрытия толщиной порядка λ длина распространения THz ПП уменьшается в сотни раз и составляет около 10λ [9]. Поэтому если ПП не имеют объемных спутников, направленных вдоль поверхности образца, то размещение на образце зачерненной пластины из прозрачного материала приведет к исчезновению сигнала. Если же таковые спутники имеются, то сигнал уменьшится до некоторого значения, которое можно либо учитывать как постоянный фон, либо обнулить юстировкой оптической схемы.

Тестовые эксперименты были выполнены на Новосибирском лазере на свободных электронах (ЛСЭ) (длина волны излучения $\lambda = 130 \mu\text{m}$, длительность импульсов 100 ps, диаметр пучка 5 см) [10]. Возбуждение ПП осуществляли на поверхности напыленного золота с использованием рупорного элемента и схемы Кречманна метода НПВО. В первом случае дифракционные спутники ПП практически неизбежны, во втором — маловероятны.

В первом эксперименте (рис. 2, а) рупорный элемент был образован непрозрачным слоем золота на подложке 1 и размещенным над ней позолоченным полуцилиндром 2. Излучение ЛСЭ фокусировали цилиндрическим зеркалом 3 в зазор между полуцилиндром и подложкой, где оно преобразовывалось в ТМ волноводные моды. При некоторой величине переменного зазора выполнялось условие

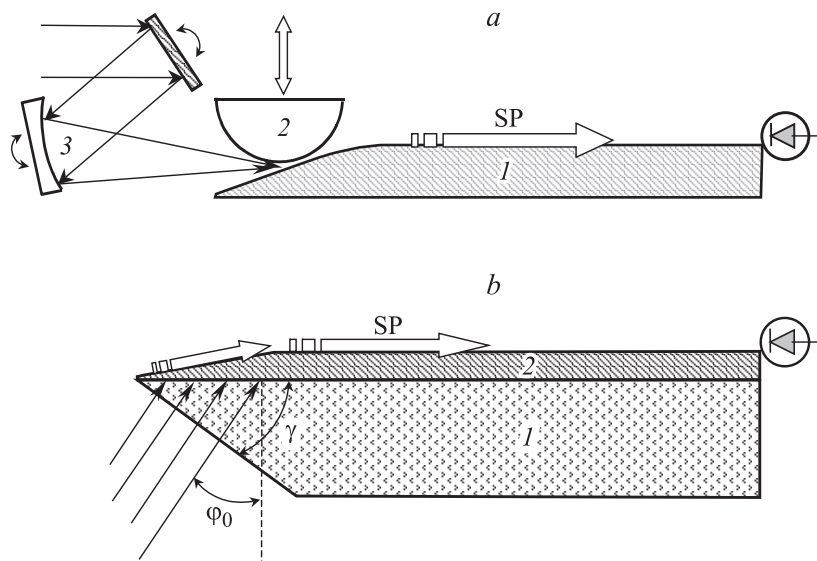


Рис. 2. Схемы возбуждения THz ПП излучением ЛСЭ с использованием: *a* — рупорного элемента преобразования, *b* — метода НПВО.

равенства фазовых скоростей одной из мод и ПП, что и обеспечивало в конечном итоге преобразование (с эффективностью $< 1\%$) падающего излучения в ПП [6]. Детектирование ПП осуществляли неохлаждаемым фотоприемником МГ-33, подключенным через резонансный усилитель к гальванометру и размещенным у дальнего края подложки. Многократное уменьшение фототока при смене типа поляризации (с *p*- на *s*-тип) служило подтверждением того, что ПП существуют и участвуют в порождении сигнала. Размещение на поверхности золота полоски писчей бумаги шириной 20 mm и толщиной 80 μm приводило к значительному уменьшению сигнала. На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость силы фототока I от расстояния s . Видно, что ток зависел от местоположения полоски: чем она ближе к скругленному ребру образца, тем меньше был ток. Этот факт свидетельствует о том, что ПП имели дифракционные спутники, направленные к поверхности образца. Действительно, уменьшение тока при $s > 20$ mm можно объяснить тем,

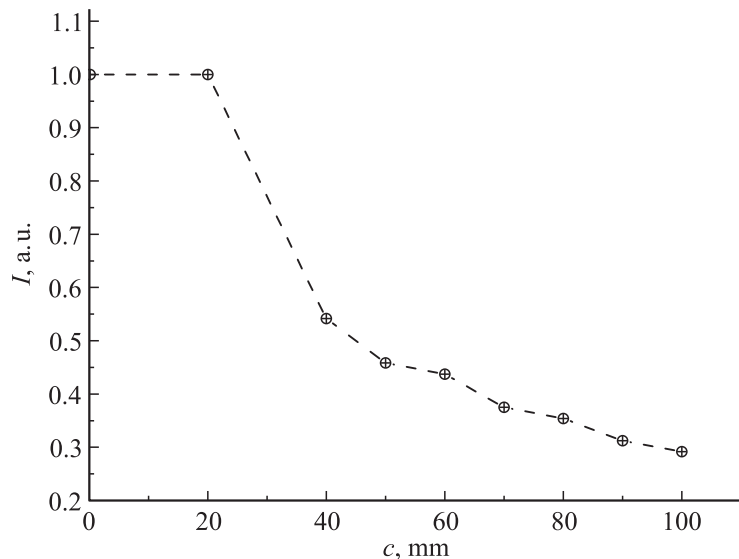


Рис. 3. Зависимость силы фототока I от расстояния c между полоской бумаги на поверхности образца и фотоприемником при использовании рупорного элемента для возбуждения THz ПП.

что полоска частично закрывала поверхность золота от дифрагировавшего излучения и поглощала его. При размещении же полоски ближе к приемнику ($c < 20$ мм) она не перекрывала идущие к поверхности дифракционные спутники, которые, отразившись от золотого слоя, попадали на приемник и порождали значительно больший, чем в первом случае, ток.

Во втором эксперименте (рис. 2, *b*) подложкой 1 служил оптически полированный брусок полиэтилена ($n = 1.6$) с поперечным сечением 15×30 мм² и длиной 150 мм. Угол наклона γ скошенной грани подложки был равен 51° , что обеспечивало угол падения на слой золота 2 приблизительно равным углу возбуждения ПП φ_0 при направлении излучения по нормали к этой грани. Толщина d однородной части слоя 2 составляла $1 \mu\text{m}$, а над скошенной гранью подложки она плавно уменьшалась до 10 нм. Образец установили на столик гониометра таким образом, чтобы слой 2 был перпендикулярен столику, ось

вращения которого проходила через центр прозрачного участка слоя 2. На противоположном конце образца укрепили фотоприемник МГ-33 таким образом, чтобы его входное окно находилось на уровне слоя 2. Пучок излучения ЛСЭ с расходимостью ~ 0.003 рад пропускали через обтюратор, регулируемый сеточный поляризатор и круговую диафрагму с диаметром 10 мм, а затем направляли через подложку 1 на прозрачный участок слоя 2. При углах падения φ , близких к φ_0 , и p -поляризации излучения приемник регистрировал ярко выраженный максимум интенсивности поступающего на него излучения. Ширина пика на зависимости силы фототока I от угла φ составила примерно один градус. При смене поляризации излучения с p - на s -тип сигнал с приемника исчезал полностью, что свидетельствовало об отсутствии у ПП дифракционных спутников. Наложение на поверхность золота упомянутой полоски бумаги на любой участок однородной части слоя 2 приводило к уменьшению фототока на 20%, что являлось вторым свидетельством отсутствия дифракционных спутников ПП.

Таким образом, в работе описан и апробирован способ индикации дифракционных спутников поверхностных плазмонов терагерцового диапазона. Применение способа позволит повысить точность плазмонных спектрометров THz диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (гос. контракт № П1132) и Интеграционного гранта СО РАН № 89.

Авторы благодарят Н.А. Винокурова и Г.Н. Кулипанова за поддержку работы, а сотрудников ЛСЭ М.Г. Власенко, Я.В. Гетманова, Т.В. Саликову, О.А. Шевченко и М.А. Щеглова — за обеспечение выполнения экспериментов.

Список литературы

- [1] Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009. 480 с.
- [2] Князев Б.А., Кузьмин А.В. // Вестник НГУ. 2007. Т. 2. № 1. С. 108–122.
- [3] Gong M., Jeon T.-I., Grischkowsky D. // Optics Express. 2009. V. 17. N 19. P. 17 088–17 101.
- [4] Silin V.I., Voronov S.A., Yakovlev V.A., Zhizhin G.N. // Int. J. Infrared & Millim. Waves. 1989. V. 10. N 1. P. 101–120.

- [5] *Koteles E.S., McNeill W.H.* // Int. J. Infrared & Millim. Waves. 1981. V. 2. N 2. P. 361–371.
- [6] *Jeon T.-I., Grischkowsky D.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 061113.
- [7] *Bogomolov G.D., Zhizhin G.N., Nikinit A.K., Knyazev B.A.* // Nuclear Instrum. & Methods in Phys. Research (A). 2009. V. 603. N 1/2. P. 52–55.
- [8] *Вайнштейн Л.А.* // Теория дифракции. М.: Радио и связь, 1995. 600 с.
- [9] *Schlesinger Z., Sievers A.J.* // Phys. Rev. (B). 1982. V. 26. N 12. P. 6444.
- [10] *Kulipanov G.N., Gavrilov N.G., Knyazev B.A. et al.* // Terahertz Sci. and Techn. 2008. V. 1. N 2. P. 19–37.