

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Визуальное наблюдение конверсии тепловых поверхностных плазмон-поляритонов в фотоны

В.Б. Зон, Б.А. Зон, В.Г. Клюев, А.Н. Латышев, Д.А. Минаков, О.В. Овчинников

Описан простой эксперимент, позволяющий наблюдать конверсию поверхностных плазмон-поляритонов в фотоны на краю металлической пластины.

PACS numbers: 44.40. + a, 71.36. + c

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103d.0305

Поверхностными плазмон-поляритонами (ППП) называют квазичастицы, возникающие при взаимодействии фотонов и электронов в металле. Эти квазичастицы, связанные с поверхностью металла, распространяются в виде поверхностной электромагнитной волны с импульсом, превосходящим по величине импульс обычных объёмных волн, вдоль границы раздела металла и вакуума или воздуха (в простейшем случае) [1]. Амплитуда ППП экспоненциально убывает при удалении от поверхности как в глубь металла, так и в вакуум. Подобные волны над проводящей поверхностью Земли известны с начала XX в. как волны Ценнека [2]. Более строго, волнами Ценнека называют "быстрые" поверхностные электромагнитные волны, возникающие на границе раздела сред, одна из которых является проводящей (морская вода, влажная поверхность земли). Если же соприкасающиеся среды имеют разные знаки действительной части диэлектрической проницаемости, то "медленная" поверхностная волна на границе их раздела называется волной Фано. Заметим, что проблема экспериментального наблюдения волн Ценнека до сих пор является актуальной (см., например, недавнюю дискуссию на страницах *УФН* [3, 4]), тогда как волны Фано (ППП) активно исследуются и применяются во многих лабораториях [5].

Если ППП распространяются вдоль металлической поверхности, имеющей форму клина, то подходя к ребру клина, они могут либо перейти на его другую сторону, либо оторваться от клина, трансформируясь в фотоны. В работе [6] наблюдалась плазмон-фотонная конверсия



Рисунок. Изображение боковой грани нагретой пластины молибдена. По данным тепловизора температура центральной части грани равна 85 °C, а температура участков, прилегающих к рёбрам пластины, равна 171 °C.

тепловых ППП, образующих двумерный бозе-газ с планковским спектром, на прямоугольном краю медной пластины. На рисунке приведена фотография этого явления для прямоугольного края молибденовой пластины шириной 15 мм, толщиной 0,5 мм и длиной 5 см. Пластина была нагрета до температуры 85 °C, съёмка проводилась термосканирующим тепловизором ThermoCAM SC3000 (FLIR Systems) в диапазоне длин волн 8–9 мкм. Боковая грань пластины была ориентирована параллельно тепловизору. Как видно, яркость излучения, исходящего с участков, прилегающих к горизонтальным рёбрам пластины, превышает яркость центральной части боковой грани пластины. Это превышение настолько существенно, что невольно создаётся впечатление о различии температур участков пластины, расположенных вблизи горизонтальных поверхностей пластины, и её центральной части, что, разумеется, при указанной выше толщине пластины неверно.

Приведённая фотография наглядно демонстрирует и неприменимость закона Ламберта, справедливого для излучения абсолютно чёрного тела, к тепловому излучению реальных тел. Напомним, что согласно этому закону яркость теплового излучения нагретого тела одинакова по всем направлениям [7].

Теория конверсии ППП в реальные фотоны на краю проводящего клина была дана Г.Д. Малюжиным в работе [8]. Эти результаты, к сожалению, остались малоизвестными, о чём свидетельствуют, например, публикации [9–11]. В некоторой степени это связано с тем, что результаты, приведённые в [8], основываются на неопубликованной докторской диссертации автора, защищённой в ФИАНе в 1950 г. В этой диссертации

В.Б. Зон. Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Российская Федерация, present address: Walter Schottky Institut, Technische Universität München, Am Coulombwall, Garching 85748, Germany
Б.А. Зон, В.Г. Клюев, А.Н. Латышев, Д.А. Минаков, О.В. Овчинников. Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Российская Федерация
 Tel. (7-4732) 208 780. Fax (7-4732) 208 755
 E-mail: zon@niif.vsu.ru, opt@phys.vsu.ru

Статья поступила 21 декабря 2009 г.,
 после доработки 15 ноября 2010 г.

дано обобщение классической задачи Зоммерфельда о дифракции электромагнитной волны на идеально проводящем клине для случая клина с конечной проводимостью. Для этого обобщения Малюжиным был развит оригинальный метод, недавно изложенный в монографии [12]. Но если для дифракции учёт конечной проводимости клина является лишь уточнением теории, хотя и важным, то для ППП учёт конечной проводимости имеет принципиальное значение, так как именно конечная проводимость определяет ширину диаграммы направленности конверсионных фотонов (см. ниже). Более подробное изложение работы [8], а также некоторая модификация результатов, связанная с учётом отличия акустического импеданса, рассматривавшегося в [8], от электромагнитного, возникающего в теории ППП, даны в работах [13, 14].

В теории Малюжинца угловое распределение фотонов $P(\alpha)$, возникающих вследствие конверсии ППП, определяется довольно громоздкими формулами [13, 14], но в окрестности своего максимума это угловое распределение для прямоугольного клина является лоренцевым с шириной, определяемой мнимой частью поверхностного импеданса металла ζ :

$$P(\alpha) = \frac{|\operatorname{Im} \zeta|}{\pi} \frac{1}{\alpha^2 + |\operatorname{Im} \zeta|^2}. \quad (1)$$

Угол α отсчитывается здесь от прямой, лежащей на плоской поверхности металла, вдоль которой распространяются ППП, и нормальной к ребру этой поверхности, а импеданс в системе СИ имеет смысл импеданса металла по отношению к импедансу вакуума. Физический смысл такой симметрии углового распределения совершенно ясен: фотоны преимущественно излучаются в том же направлении, вдоль которого распространялись ППП.

Строго говоря, использование основанного на большой величине импеданса приближения Леонтовича в рамках которого Малюжиным было получено обобщение решения задачи Зоммерфельда, становится некорректным на ребре клина, где кривизна поверхности формально стремится к нулю [2]. К сожалению, точного решения этой задачи получить не удаётся, поэтому хорошее совпадение экспериментальных данных, приведённых в [6], с формулой (1) может рассматриваться как свидетельство того, что нарушение приближения Леонтовича на ребре клина не имеет определяющего значения в рассматриваемом явлении конверсии ППП в фотоны.

Из формулы (1) видно, что, измеряя ширину углового распределения фотонов, возникающих на прямоуголь-

ной границе металла вследствие плазмон-фотонной конверсии, можно измерить величину мнимой части поверхностного импеданса металла. При этом точность измерений в инфракрасной области может существенно превышать точность традиционных методов [15], что было продемонстрировано в работе [16]. Напомним, что для хороших проводников мнимая часть импеданса в оптическом и инфракрасном диапазонах значительно превышает его действительную часть. Отметим также, что импеданс определяет оптические свойства металлов и в условиях аномального скин-эффекта, когда диэлектрическая проницаемость металла теряет смысл (см., например, [17] и указанные там ссылки). При нормальном скин-эффекте $\zeta = (\mu/\epsilon)^{1/2}$, где μ и ϵ — магнитная и диэлектрическая проницаемости металла соответственно.

Результаты, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-00744-а).

Список литературы

1. Agranovich V M, Mills D L *Surface Polaritons: Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces* (Amsterdam: North-Holland, 1982) [Агранович В М, Миллс Д Л (Ред.) *Поверхностные поляритоны: Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред* (М.: Наука, 1985)]
2. Вайнштейн Л А *Электромагнитные волны* (М.: Радио и связь, 1988)
3. Дачко В Н, Копылов А А *УФН* **178** 109 (2008) [Datsko V N, Kopylov A A *Phys. Usp.* **51** 101 (2008)]
4. Кукушкин А В *УФН* **179** 801 (2009) [Kukushkin A V *Phys. Usp.* **52** 755 (2009)]
5. Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A *Phys. Rep.* **408** 131 (2005)
6. Latyshev A N et al. *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 397 (2009)
7. Гуревич М М *Фотометрия: теория, методы и приборы* (Л.: Энергоатомиздат, 1983)
8. Малюжинец Г Д *ДАН СССР* **121** 436 (1958) [Malyuzhinets G D *Sov. Phys. Dokl.* **3** 752 (1959)]
9. Wallis R F, Maradudin A A, Stegeman G I *Appl. Phys. Lett.* **42** 764 (1983)
10. Hasegawa K, Nöckel J U, Deutsch M *Appl. Phys. Lett.* **84** 1835 (2004)
11. Moreno E et al. *Phys. Rev. Lett.* **100** 023901 (2008)
12. Бабич В М, Лялинов М А, Грикуров В Э *Метод Зоммерфельда — Малюжинца в теории дифракции* (СПб.: СПбГУ, 2003)
13. Zon V B *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1960 (2007)
14. Zon V B *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **9** S476 (2007)
15. Lynch D W, Hunter W R, in *Handbook of Optical Constants of Solids* (Eds E D Palik) (Orlando: Academic Press, 1985) p. 275
16. Зон В Б и др. *Оптика и спектроскоп.* **108** 677 (2010) [Zon V B et al. *Opt. Spectrosc.* **108** 637 (2010)]
17. Зон В А *Оптика и спектроскоп.* **95** 462 (2003) [Zon V A *Opt. Spectrosc.* **95** 431 (2003)]

Conversion of surface plasmon polaritons into photons: visual observation

V.B. Zon

Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, 394006 Voronezh, Russian Federation,
present address: Walter Schottky Institut, Technische Universität München, am Coulombwall, Garching 85748, Germany

B.A. Zon, V.G. Klyuev, A.N. Latyshev, D.A. Minakov, O.V. Ovchinnikov

Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, 394006 Voronezh, Russian Federation
Tel. (7-4732) 208 780. Fax (7-4732) 208 755. E-mail: zon@niif.vsu.ru, opt@phys.vsu.ru

Here we present a simple experimental arrangement to observe the conversion of surface plasmon polaritons into photons at an edge of a metal plate.

PACS numbers: **44.40.+a**, **71.36.+c**

Bibliography — 17 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **181** (3) 305–306 (2011)

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103d.0305

Received 21 December 2009, revised 15 November 2010

Physics — Uspekhi **54** (3) (2011)