

# Подходы к исследованию эванесцентного поля поверхностных плазмон-поляритонов на ТГц излучении Новосибирского лазера на свободных электронах

*В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов*

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В данной работе будут рассмотрены экспериментальные подходы к измерению затухания интенсивности эванесцентного поля ППП: зондовый метод с внешней модуляцией и модуляцией колебаниями самого зонда, а также регистрация поля, возникающего после дифракции ППП на краю проводящей поверхности. Тестовые эксперименты на структуре «золото-ZnS-воздух» с использованием ТГц излучения Новосибирского лазера на свободных электронах показали согласие результатов по глубине проникновения поля в воздух для обоих способов модуляции, что свидетельствует о достоверности результатов и работоспособности методов регистрации.

*Ключевые слова:* Терагерцовый диапазон, Поверхностные-плазмон поляритоны, Проводящие поверхности.

*Цитирование:* **Кукотенко, В. Д.** Подходы к исследованию эванесцентного поля поверхностных плазмон-поляритонов на ТГц излучении Новосибирского лазера на свободных электронах / В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 251–255.

## Введение

Одним из применений терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов (ППП), распространяющихся вдоль границы раздела проводник-диэлектрик, является рефрактометрия волноведущей поверхности. В качестве проводника может выступать металл, диэлектрик в линии поглощения или допированный полупроводник. По измеряемым характеристикам ППП (длине распространения вдоль границы раздела, фазовой скорости и глубине проникновения поля ППП в диэлектрик) можно восстановить оптические свойства проводника, что важно для задач диагностики качества поверхностей и тонких пленок, сенсорики и др. В отличие от видимого диапазона, все благородные металлы имеют высокую проводимость в ТГц диапазоне частот, в результате чего поле ППП в диэлектрике слабо связано с поверхностью и присутствуют большие радиационные потери интенсивности плазмонов даже на небольших шероховатостях и неоднородностях [1].

### 1. Поверхностный-плазмон поляритон

ППП — это комбинация электромагнитной волны и волны свободных зарядов, которые распространяются вдоль границы проводник-диэлектрик, схематичное изображение ППП представлено на рис.1. Электромагнитное поле экспоненциально затухает на границе проводник- диэлектрик и описывается формулой 1:

$$E(z, x) = E_0 \exp(-kz) \exp(ik_x x), \quad (1)$$

где  $E_0$  – амплитуда эванесцентного поля ППП,  $k_x$  – вектор ППП, распространяющихся вдоль оси  $x$ ,  $k$  – константа затухания поля ППП в воздух (вдоль оси  $z$ ).

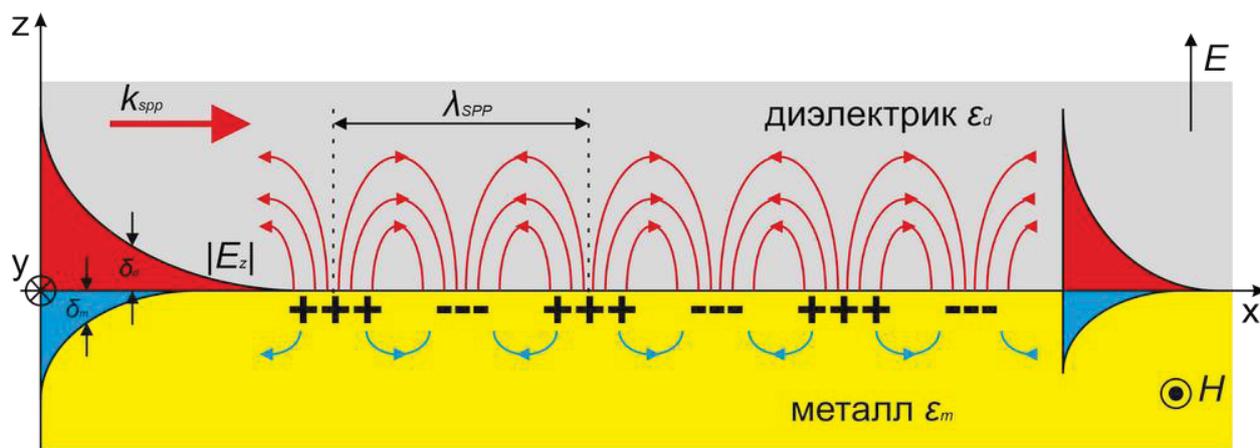


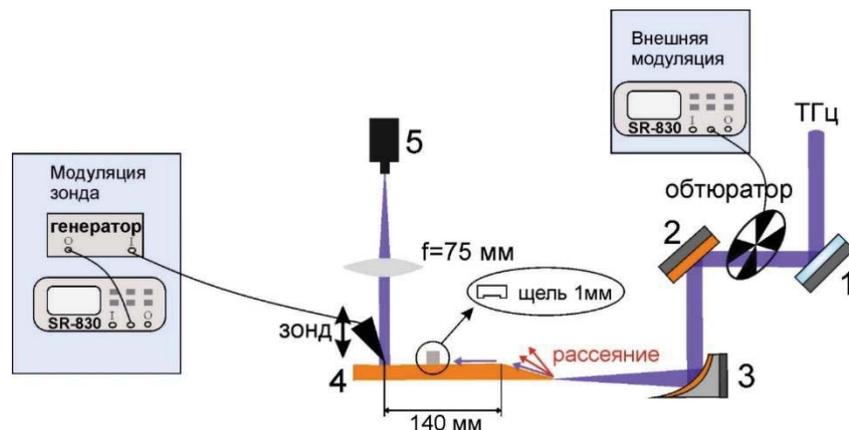
Рис. 1. Иллюстративное изображение ППП [2]

Свойства электромагнитных полей зависят от оптических констант проводника и диэлектрика. Таким образом, измеряя распределение поля наряду с другими характеристиками ППП (длина распространения ППП вдоль поверхности или их фазовая скорость) мы можем получать оптические константы материалов (полупроводник, металл, диэлектрик).

## 2. Оптическая схема

Для детектирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) зондовым методом использовалась установка, представленная на рис.2. Луч лазера, отражаясь от юстировочного зеркала 1, попадал на зеркало 2, с золотым напылением. Далее параболическим зеркалом 3 с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм пучок фокусировался на ребро торца образца 4, представляющего собой плоскую стеклянную пластинку с нанесенным на ее полированную верхнюю грань непрозрачного слоя золота толщиной 300 нм методом магнетронного напыления. Поверх золота методом электронно-лучевого распыления наносился слой сульфида цинка (ZnS) толщиной 700 нм.

Сфокусированное на ребро образца излучение в следствии дифракции частично преобразовывалось в ППП, которые затем распространялись вдоль поверхности образца. Образец имел плавный загиб на 13 градусов для того, чтобы экранирования от паразитных объемных волн, которые возникали при дифракции излучения на ребре. По той же причине для экранирования от засветок в центре образца устанавливались «ворота» из поролонa с вертикальной щелью размером 1 мм. На другом краю образца ППП рассеивались металлическим зондом, колеблющимся с частотой и амплитудой задаваемой на генераторе. Рассеянное излучение собиралось линзой (в схеме  $2f-2f$ ) с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм и фокусировалось на входной апертуре ячейки Голя 5.

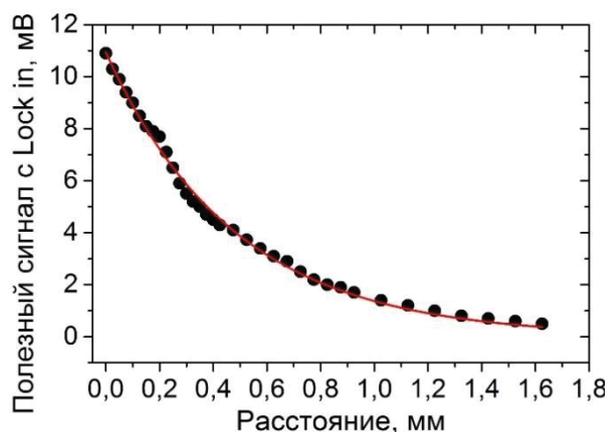


**Рис. 2.** Установка для детектирования поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) зондовым методом

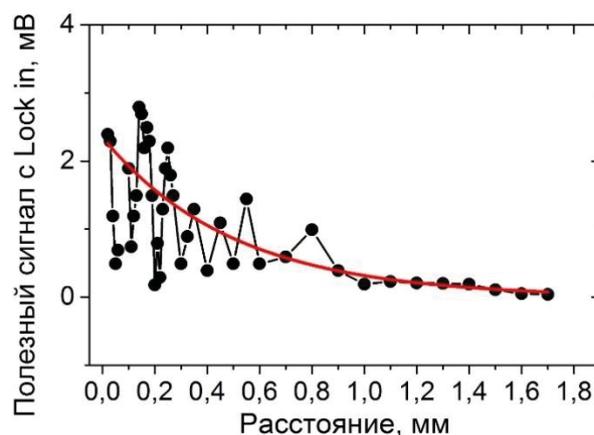
В схеме использовалось два вида модуляции. Первый – это уже упомянутая модуляция зонда, она реализовывалась с помощью генератора. Второй – внешняя модуляция, реализуемая с помощью механического обтюратора, помещаемого на входе в установку. Сигнал от Голея синхронно с опорной частотой обтюратора приходили на синхронный детектор (SR-830). Внешний тип модуляции использовался при задании с помощью поляризатора максимальной допустимой мощности, подаваемой на вход системы, для измерения поля ППП.

### 3. Результаты экспериментов

Для детектирования ППП зондовым методом использовалась установка, изображенная на рис.2. Для графиков на рисунке 3 из полезного сигнала вычиталось измеренное значение шума. В данном эксперименте измерялся абсолютный уровень шума, то есть значение, измеряемое детектором при отсутствии излучения. По результатам экспоненциальной аппроксимации графика на рисунке 3а глубина проникновения ППП в воздух (по интенсивности) составила  $d_p = 0,48 \pm 0,01$  мм. На рисунке 3б представлены измерения с колебаниями зонда. При максимально подаваемом напряжении на зонд была измерена зависимость полезного сигнала с синхронного детектора от расстояния. Глубина проникновения составила  $d_p = 0,49 \pm 0,15$  мм.



а) Использовалась внешняя модуляция  
 $\nu=30$  Гц. Уровень шума 0,3 мВ.



б) Использовалась модуляция зонда. Уровень шума  
 0,01 мВ.

**Рис. 3.** Зависимость полезного сигнала от расстояния, на которое поднимался зонд от поверхности образца

### Заключение

Собрана экспериментальная установка по детектированию затухания поля ППП над поверхностью проводника зондовым методом с внешней модуляцией и модуляцией колебаниями зонда. Тестовые эксперименты на структуре «золото-ZnS-воздух» показали согласие результатов по глубине проникновения поля в воздух между двумя видами модуляции, что свидетельствует о достоверности результатов и работоспособности методов регистрации. Предварительный анализ шумовых характеристик установки показал, что использование более высокочастотной модуляции позволит повысить соотношение сигнал/шум в зондовой схеме.

### Благодарность

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

### Список источников

- [1] **Gerasimov, V. V.** Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating / В. А. Кныазев, А. Г. Лемзяков, А. К. Никитин, Г. Н. Жижин. // Journal of Optical Society of America B. V. 33, Is. 11, P. 2196-2203 (2016).
- [2] URL: <https://www.rscf.ru/project/19-12-00103/>

# Approaches to the study of the evanescent field of surface plasmon polaritons at the Novosibirsk free electron laser

*V. D. Kukotenko, V. V. Gerasimov*

Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Waveguide surface refractometry is one of the applications of terahertz surface plasmon polaritons (SPP) propagating along the conductor-insulator interface. The conductor can be a metal, a dielectric in the absorption line, or a doped semiconductor. Measuring of characteristics of SPP (propagation length along the interface, phase velocity and depth of penetration of the SPP field into the dielectric) allowed restoration of the optical properties of the conductor, which is important for the problems of diagnosing the quality of surfaces and thin films, sensorics, etc. In this work, we consider experimental approaches to measuring the attenuation of the intensity of the SPP evanescent field: the probe method with external modulation and modulation by the oscillations of the probe itself, as well as the registration of the field arising after SPP diffraction at the edge of the conducting surface.

*Keywords:* Optics, Surface-plasmon polariton, Terahertz range, Metal, Dielectric.