

# Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах

В. Д. Кукотенко<sup>1</sup>, В. В. Герасимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

В настоящее время в фотонных интегральных схемах размер схем ограничен дифракцией, что является барьером для дальнейшего развития в сфере оптических коммуникаций. Плазмоника могла бы устранить это несоответствие размеров между электронными и фотонными компонентами. Фотоника и плазмоника могут дополнять друг друга, поскольку при правильных условиях оптические сигналы могут быть преобразованы в поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) и наоборот. Поэтому, в настоящее время активно разрабатываются плазмонные интегральные планарные схемы для устройств беспроводной связи. Переход в ТГц диапазон частот позволит увеличить скорость передачи и обработки данных. При разработке плазмонных интегральных схем важно знать оптические свойства поверхностей. В настоящее время отсутствуют достоверные методы для определения оптических свойств поверхностей. В данной работе будут представлены экспериментальные методы зондирования эванесцентного поля ППП над металлической поверхностью. По измеренной глубине проникновения поля ППП и затуханию энергии ПП, вдоль направления распространения, предложен метод определения эффективной поверхностной диэлектрической проницаемости металла.

*Ключевые слова:* Оптика, Плазмоника, Терагерцовый диапазон, Поверхностные плазмоны.

*Цитирование:* Кукотенко, В. Д. Подходы к исследованию эванесцентного поля терагерцовых поверхностных плазмон-поляритонов на Новосибирском лазере на свободных электронах / В. Д. Кукотенко, В. В. Герасимов // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 220–225.

## Введение

В терагерцовых ППП, распространяющихся вдоль границы раздела проводник-диэлектрик 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. В отличие от видимого и ИК диапазонов, 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 плазмонов даже на небольших шероховатостях и неоднородностях [1]. Это накладывает определенные трудности для практической

реализации плазмонной рефрактометрии, в частности для измерения эванесцентного поля ППП над поверхностью проводника.

### 1. Поверхностный плазмон-поляритон

Поверхностный плазмон-поляритон — это комбинация электромагнитной волны и волны свободных зарядов, которые распространяются вдоль границы проводник-диэлектрик. Электромагнитное поле экспоненциально затухает на границе проводник – диэлектрик, и описывается формулой

$$E(z, x) = E_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta_d}\right) \exp(ik_{spp} x) \quad (1)$$

где  $E_0$  - амплитуда эванесцентного поля,  $\delta_d$  - глубина проникновения ППП в воздух (вдоль оси  $z$ ),  $k_{spp}$  - волновое число ППП по оси  $x$ , вдоль которой распространяются ППП.

Образцы представляют собой плоскую стеклянную пластинку размером 100×100×11 мм с нанесенным на ее полированную верхнюю грань непрозрачного слоя золота (Au) толщиной 300 нм методом магнетронного распыления. Поверх золота методом электронно-лучевого распыления наносится слой сульфида цинка (ZnS). Толщина слоя ZnS в различных образцах составляла от 0,96 до 1,67 мкм (см. Таблицу 1).

### 2. Оптическая схема для детектирования ППП методом «экранирования»

Методика эксперимента заключается в том, что регистрируется эванесцентная волна, прошедшая под металлическим экраном. Экран закреплялся на механизированном трансляторе, перемещаемом вдоль оси  $z$ , с помощью которого изменялось расстояние  $z$  между поверхностью образца и экраном. Часть энергии ППП, которая не проходила под экраном, рассеивалась от его поверхности.

Для измерения эванесцентного поля ППП использовалась установка, изображенная на рисунке 1. Излучение от Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ), проходило систему калибровочных зеркал 1, 2, попадало на цилиндрическое металлическое зеркало с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм. Пучок фокусировался на ребро торца образца 4. Сфокусированное на ребро образца излучение в следствии дифракции частично преобразовывалось в ППП, которые затем распространялись вдоль поверхности образца. Далее, пучок проходил через вертикальную щель 5 высотой 1 мм, изготовленную из непрозрачного для ТГц излучения поролон, установленную для экранирования от паразитных засветок объемных волн. После образца ППП распространялись по 1/8 цилиндра 6. Цилиндр, изображенный на рисунке 6, был необходим для того, чтобы увеличить соотношение сигнал/шум за счет уменьшения интенсивности радиационных засветок и паразитных объемных волн, которые возникали на входе при дифракции сфокусированного зеркалом 3 излучения на ребре образца, а также в результате радиационных потерь ППП. Эванесцентная волна, прошедшая под экраном, регистрировалась Ячейкой Голея 7.

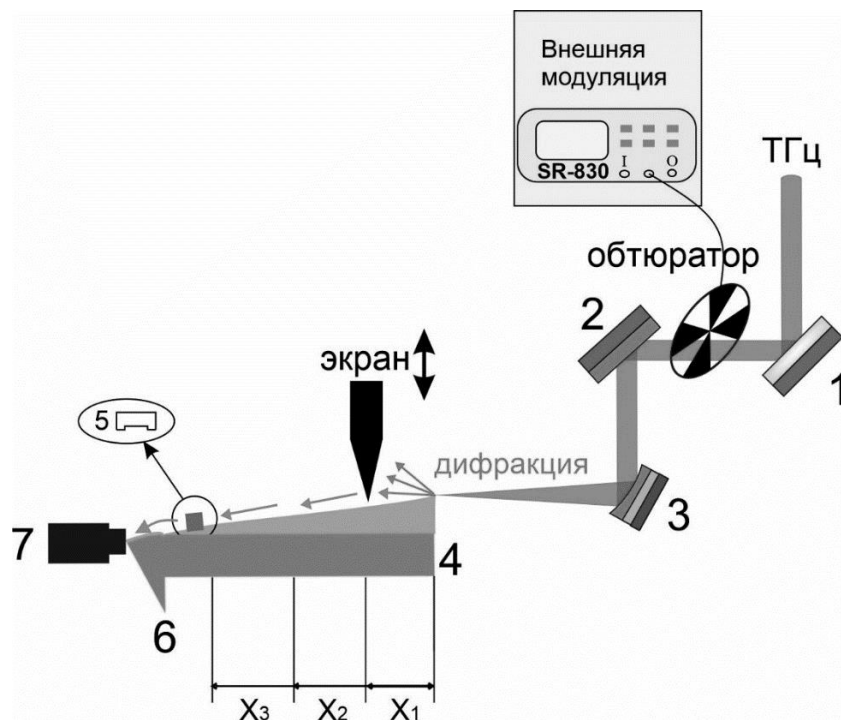


Рис. 1. Установка для детектирования ПП методом «экранирования»

### 3. Глубина проникновения ППП в зависимости от толщины напыляемого слоя ZnS

Для измерения глубины проникновения ППП использовалась установка, изображенная на рисунке 1. Структура образца представляла из себя слой Au толщиной 300 нм, поверх которого наносился слой ZnS, который имел градиент толщины от 0,96 до 1,67 мкм.

Была получена зависимость полезного сигнала с синхронного детектора от расстояния  $z$  между экраном и образцом. Полученные данные представлены в Таблице 1. Аппроксимация проводилась функцией вида

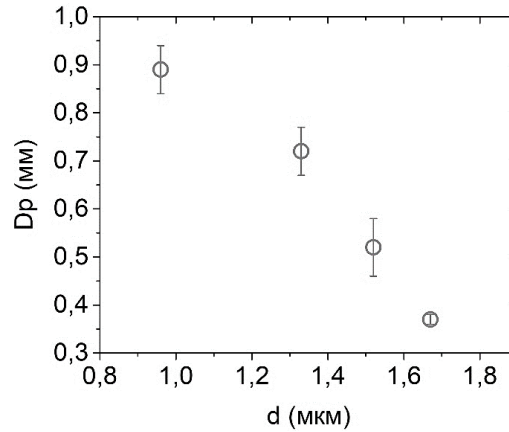
$$y = y_0 + A_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{z - z_0}{D_p}\right) \right] \quad (2)$$

где  $y_0$  – сигнал шума,  $A_1$  – амплитуда,  $z$  – расстояния между экраном и образцом,  $z_0$  – начальный уровень аппроксимации,  $D_p = \delta_d / 2$  – глубина проникновения поля ППП (по интенсивности).

Таблица 1. Зависимость глубины проникновения ППП от толщины напыляемого слоя ZnS.

Толщина напыляемого слоя ZnS (d), мкм	1,67	1,52	1,33	0,96
Расстояние от края образца (x), мм	17	46	65	84
Глубина проникновения ( $D_p$ ), мм	0,37±0,01	0,58±0,07	0,72±0,05	0,89±0,06

По результатам аппроксимации для разных толщин ZnS была построена зависимость глубины проникновения  $D_p$  от толщины напыляемого слоя ZnS ( $d$ ) на длине волны  $\lambda=197$  мкм, представленная на рисунке 2.



**Рис. 2.** Зависимость глубины проникновения ППП от толщины напыляемого слоя ZnS

Из полученного графика видно, что при увеличении толщины напыляемого слоя ZnS ( $d$ ) глубина проникновения уменьшается, что качественно согласуется с теоретической зависимостью.

#### 4. Определение диэлектрической проницаемости металла

Для определения диэлектрической проницаемости металла необходимы две экспериментальные величины. Первая это глубина проникновения поля ППП ( $D_{p\_exp}$ ) в воздух (по интенсивности), которая была измерена и описана в главе 3. Вторая это комплексный показатель преломления ППП ( $\tilde{n}_{s\_exp}$ ) (по отношению к вакууму), рассчитываемая по формуле (3).

$$\tilde{n}_{s\_exp} = n_{s\_exp} + ik_{s\_exp} \cdot \quad (3)$$

Показатель преломления ППП был измерен с помощью плазмонного интерферометра Майкельсона. Описание прибора и методики измерения можно найти в статье [2].

Аналитическое выражение для нахождения глубины проникновения в модели трехслойной структуры имеет вид

$$D_{p\_an} = \frac{1}{2\text{Re}(\zeta)} \quad (4)$$

где  $\zeta$  - константа затухания поля ППП в воздух, рассчитываемая по формуле (5).

$$\zeta = ik_0\xi \quad (5)$$

где  $\xi$  - поверхностный импеданс, рассчитываемый по приближенной формуле, описываемой в статье [3]

$$\xi \approx \frac{i \times \left( \varepsilon_d \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_m^2}{\varepsilon_a + \varepsilon_m}} \times (\varepsilon_a + \varepsilon_m) + k_0 d \cdot \varepsilon_m \times [\varepsilon_a (\varepsilon_m - \varepsilon_d) - \varepsilon_m \varepsilon_d] \right)}{\varepsilon_d \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_m) \times \left[ k_0 d \cdot \varepsilon_d \sqrt{\frac{\varepsilon_m^2}{\varepsilon_a + \varepsilon_m}} + \varepsilon_m \right]} \quad (6)$$

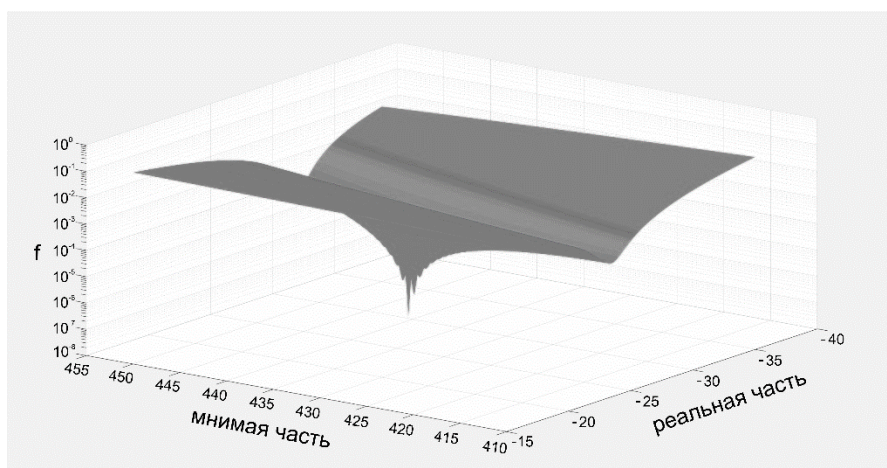
где  $\varepsilon_d$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика,  $\varepsilon_m$  - диэлектрическая проницаемость металла,  $\varepsilon_a$  - диэлектрическая проницаемость воздуха (над диэлектриком),  $k_0$  - волновое число объемного излучения в вакууме,  $d$  - толщина напыляемого слоя ZnS.

Комплексный показатель преломления в модели трехслойной структуры описывается формулой (7)

$$\tilde{n}_{s\_an} = \sqrt{\varepsilon_a - (\varepsilon_a \xi)^2} \quad (7)$$

Взяв экспериментальное значение глубины проникновения и экспериментальную мнимую часть показателя преломления, мы построили поверхность функции ошибки (см. рисунок 3), определяемой выражением:

$$f = \left[ \frac{\kappa_{s\_exp} - \text{Im}(\tilde{n}_{s\_an})}{\kappa_{s\_exp}} \right]^2 + \left[ \frac{D_{p\_an} - D_{p\_exp}}{D_{p\_exp}} \right]^2 \quad (8)$$



**Рис. 3.** Рассчитанная поверхность по функции ошибки. Зависимость реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости металла (Au).

В данном случае было получено однозначное решение и найдена эффективная диэлектрическая проницаемость золотой поверхности:  $\varepsilon_{Au} = -27 + i \cdot 436$ . Значение, рассчитанное по модели Друде ( $\varepsilon_{Au} = -110000 + i \cdot 465000$ ), отличается на несколько порядков, что демонстрирует актуальность данной работы.

### Заключение

Предложен и апробирован метод «экранирования» для детектирования затухания поля поверхностных плазмон-поляритонов. Измерены глубины проникновения поля поверхностных плазмонов на структуре «Au-ZnS-воздух» с градиентной толщиной напыления слоя ZnS на длине волны  $\lambda = 197$  мкм. Было доказано, что глубина проникновения поля ППП уменьшается с увеличением толщины напыляемого диэлектрического слоя. Найден метод решения обратной задачи нахождения диэлектрической проницаемости металлической поверхности по глубине проникновения и мнимой части показателя преломления ППП, дающий однозначное решение. Данные результаты говорят о

необходимости измерения оптических констант при разработке плазмонных интегральных схем.

### **Благодарности**

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Новосибирский ЛСЭ" в ИЯФ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

### **Список источников**

- [1] Gerasimov V. V. et al. Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating //JOSA B. – 2016. – Т. 33. – №. 11. – С. 2196-2203.
- [2] Gerasimov V. V., Nikitin A. K., Lemzyakov A. G. Planar Michelson Interferometer Using Terahertz Surface Plasmons //Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Т. 66. – №. 3. – С. 423-434.

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

*V. D. Kukotenko<sup>1</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

Currently, photonic integrated circuits are diffraction-limited in size, which is a barrier to further development in optical communications. Plasmonics could eliminate this size mismatch between electronic and photonic components. Photonics and plasmonics can complement each other because, under the right conditions, optical signals can be converted into surface plasmon-polaritons (SPP) and vice versa. Therefore, plasmonic integrated planar circuits for wireless communication devices are currently being actively developed. The transition to the THz frequency range will increase the speed of data transmission and processing. When designing plasmonic integrated circuits, it is important to know the optical properties of surfaces. Currently, there are no reliable methods for determining the optical properties of surfaces. In this paper, we will present experimental methods for probing the evanescent field of the SPP over a metal surface. Based on the measured depth of penetration of the SPP field and the attenuation of the SPP energy along the direction of propagation, a method is proposed for determining the effective surface permittivity of a metal.

*Keywords:* Optics, Plasmonics, Terahertz range, Surface plasmons.