

# Генерация и исследование терагерцовых вихревых поверхностных плазмонов на цилиндрической поверхности

Н. Д. Осинцева<sup>1,2</sup>, Б. А. Князев<sup>1,2</sup>, Ю. Ю. Чопорова<sup>1</sup>, В. В. Герасимов<sup>1,2</sup>, В. С. Павельев<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», Самара, Россия

Терагерцовый (ТГц) диапазон является перспективным инструментом в развитии области передачи информации. Одной из методик применения данного вида излучения для телекоммуникации является возбуждение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). ППП, распространяющиеся вдоль границ раздела сред «металл-диэлектрик», играют важную роль во многих оптических явлениях и могут использоваться в системах интегральной оптики в качестве носителей информации и энергии. В работе впервые были экспериментально получены вихревые ТГц ППП на цилиндрической поверхности, для генерации которых применялись идеальные бесселевы пучки, сформированные фазовыми аксиконами. Исследованы характеристики ППП, продемонстрировано их вращение, показано, что волны распространяются отдельно, не взаимодействуя с соседними плазмонами.

*Ключевые слова:* Терагерцовое излучение, дифракционные оптические элементы, вихревые пучки, поверхностные плазмон-поляритоны, Фазовый аксикон.

*Цитирование:* Осинцева, Н. Д. Генерация и исследование терагерцовых вихревых поверхностных плазмонов на цилиндрической поверхности / Н. Д. Осинцева, Б. А. Князев, Ю. Ю. Чопорова, В. В. Герасимов, В. С. Павельев // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 378–381.

## Введение

Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) представляют собой распространяющиеся волны электронных колебаний на границе раздела металла и диэлектрика. ППП хорошо исследованы в видимом и среднем инфракрасном диапазонах. В терагерцовом (ТГц) же диапазоне исследования начались относительно недавно, но число работ в этом направлении непрерывно растет. Причиной внимания к ТГц ППП является потенциально широкая область возможных применений. Преимуществом ТГц излучения для плазмонов является большая длина распространения (десятки сантиметров), по сравнению с видимым диапазоном (десятки микрометров), и высокая частота, что позволяет говорить об увеличении скорости в обработке и передаче информации в микросхемах, биосенсорах и др. Таким образом интерес представляет генерация ППП на проводах, т.е. аксиальной поверхности, как альтернатива волноводам в миниатюрных интегрированных оптических устройствах [1]. Несмотря на то, что при распространении плазмонов по цилиндрической поверхности проводников наблюдаются большие потери в сравнении с плоскими поверхностями, ими можно

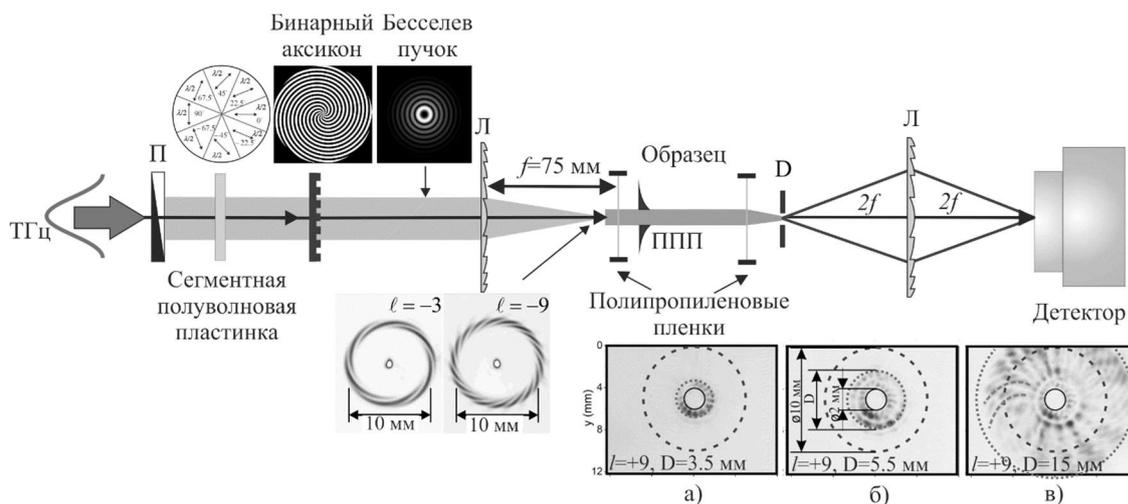
пренебречь в приложениях, указанных выше. Данный фактор незначителен по сравнению с преимуществами мультиплексирования каналов данных что может обеспечить формирование вихревых пучков.

### **Используемые методы и подходы**

Обязательным условием создания поверхностных плазмонов является наличие поляризации ортогональной поверхности распространения. В случае цилиндрических поверхностей необходима радиально поляризованная волна. В данной работе радиально поляризованный пучок Гауссовой моды трансформировался в вихревой бесселев пучок с помощью кремниевых бинарных аксиконов с закрученностями  $l$  [2]. С увеличением порядка топологического заряда пучка, увеличивается его диаметр. Данный факт ограничивает использование разных аксиконов для одного образца, обладающего фиксированным диаметром. В результате возникает необходимость в формировании пучков с заданным диаметром. Эта задача была решена формированием «идеальных» пучков, характеризующихся размером пучка, не зависящим от величины закрученности. В качестве образца использовался металлический цилиндр диаметром 10 мм, покрытый слоем диэлектрика ZnS.

### **Результаты и заключение**

Показаны результаты генерации поверхностных-плазмон поляритонов с закрученностями  $\pm 3$  и  $\pm 9$  на металлических цилиндрах с покрытием ZnS. Идеальный бесселев пучок диаметром 10 мм локализовался на входной торец образца. Ирисовая диафрагма на кончике цилиндра ограничивала соскальзывающее с образца излучение. На полученных результатах (рис.1 а, б, в) снятых в плоскости выходного торца видно, что размер внутреннего кольца не меняется даже при уменьшении диаметра диафрагмы до наименьшего размера  $D = 3,5$  мм. В таком случае попадание всех типов свободного излучения в кольцевое отверстие практически невозможно. Мы связываем это излучение с дифракцией плазмонов на краю цилиндра и образованием свободных волн. Решающим доказательством что наблюдаемый сигнал является плазмонами, была зависимость их интенсивности от поляризации освещающего излучения. При изменении поляризации входного пучка с радиальной на азимутальную, выходная интенсивность снижалась практически до нуля. Остаточная интенсивность объясняется частичным пропусканием радиальной поляризации полуволновой пластинкой.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для создания вихревых ППП на цилиндрическом образце. П- поляризатор, Л – киноформная линза с  $f=75$  мм, D – ирисовая диафрагма. Снизу: распределения интенсивности полученные с кончика образца при диаметре диафрагмы 3,5 мм (а), 5,5 мм (б) и 15 мм (в)

На изображениях полученных для  $l=+9$  видно, что количество максимумов равно 18, что соответствует количеству спиралей в «идеальном» пучке, освещающем цилиндр (рис. 1 а, б, в). Это означает, что плазмоны генерируются локально, в точках пересечения возбуждающего излучения с краем цилиндра, и распространяются вдоль своих траекторий, не перепутываясь с соседними плазмонами. Ранее, подобное поведение плазмонов исследовалось при их распространении по образующей цилиндрической поверхности [3].

Обнаруженное вне первого кольца излучение является вихревым пучком, прошедшим начало сужающейся части цилиндра. Он наблюдается на выходе цилиндра во втором кольце, состоящем из 18 спиральных «хвостов», закрученных влево или вправо в зависимости от знака топологического заряда. Эксперимент с пропусканием идеального пучка через щель перед входным торцом цилиндра, так же показал возбуждение и поворот плазмонов. ППП вращаются в том же направлении что и освещающий пучок, а величина угла растет с увеличением топологического заряда. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что пучки являются закрученными, и следовательно плазмоны так же обладают орбитальным угловым моментом [4].

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20202) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения».

### Список источников

- [1] **Dickson, R. M.** Unidirectional plasmon propagation in metallic nanowires / R. M. Dickson, L. A. Lyon // The Journal of Physical Chemistry B. – 2000. – Vol. 104. – №. 26. – P. 6095-6098. – DOI: 0.1021/jp001435b.

- [2] **Volodkin, B.** Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation / B. Volodkin, Y. Choporova, B. Knyazev, G. Kulipanov, V. Pavelyev, V. Soifer, N. Vinokurov // *Optical and Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 48. – № 4. P. 1-9. DOI: 10.1007/s11082-016-0496-z.
- [3] **Knyazev, B.** Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive bessel beams with orbital angular momentum / B. Knyazev, Y. Choporova, M. Mitkov, V. Pavelyev, B. Volodkin // *Physical review letters*. – 2015. – Vol. 115. – № 16. P. 163901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.
- [4] **Gerasimov, V. V.** / Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: generation, propagation, and diffraction / V. V. Gerasimov, O. E. Kameshkov, B. A. Knyazev, N. D. Osintseva, V. S. Pavelyev // *Journal of Optics*. – 2021. – Vol. 23. – №. 10. – P. 10LT01. DOI: 10.1088/2040-8986/ac1fc4

## **Generation and investigation of terahertz vortex surface plasmon polaritons on cylindrical surface**

*N. D. Osintseva<sup>1,2</sup>, Yu. Yu. Choporova<sup>1</sup>, B. A. Knyazev<sup>1,2</sup>, V. V. Gerasimov<sup>1,2</sup>, V. S. Pavelyev<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Budker Institute of Nuclear Physics SB RAN, Novosibirsk, Russia

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

<sup>3</sup> Samara National Research University, Samara, Russia

The terahertz (THz) range is a promising tool in the development of the information transmission field. One of the methods for using this type of radiation for telecommunications is the excitation of surface plasmon polaritons (SPPs). SPPs propagating along the "metall-insulator" medium interfaces play a big part in many optical phenomena and can be used in integrated optics systems as information and energy carriers. In this work for the first-time vortex THz SPPs on cylindrical surface were experimentally obtained. Bessel beams formed by phase axicons were used for its generation. The characteristics of the SPPs were studied, its rotation was demonstrated, as well as the ability to propagate along its own trajectory without interacting with neighboring plasmons.

*Keywords:* Terahertz radiation, Diffraction optical elements, Vortex beams, Surface plasmon-polaritons, Phase axicon.