

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Осинцевой Натальи Дмитриевны «**ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ВИХРЕВЫХ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ПЛАЗМОНИКЕ**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики**

Диссертационная работа Осинцевой Н.Д. посвящена формированию и исследованию вихревых бесселевых пучков ТГц-спектра, их свойств, а также особенностям распространения в свободном пространстве и при взаимодействии с препятствиями, возможности их мультиплексирования для потенциального применения в телекоммуникационных системах. В работе рассмотрены возможности генерации вихревых поверхностных плазмон-поляритонов на аксиально-симметричной поверхности в качестве альтернативы волноводам в миниатюрных интегральных оптических устройствах. В работе экспериментальные исследования были выполнены с использованием излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) – источника мощного квазимонохроматического излучения, перестраиваемого по частоте в диапазоне от 0,74 до 37,47 ТГц (8÷403 мкм).

Целью данной работы является исследование вихревых бесселевых пучков в терагерцовом диапазоне для генерации поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся по односвязному аксиально-симметричному волноводу.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы и изложена на 117 страницах, включая 53 иллюстрации, и содержит 109 наименований библиографии.

Во введении обсуждается актуальность поставленной научной задачи, которая определяет необходимость разработки новых методов, ставятся цель и задачи диссертации.

Первая глава диссертации практически обзорная и посвящена описанию экспериментальной станции Новосибирского ЛСЭ «Терагерцовая и инфракрасная фотоника» на которой проводились все эксперименты, а их результаты вошли в диссертационную работу. Рассмотрен принцип работы НЛСЭ и перечислены основные параметры его излучения.

Важным аспектом для проведения исследований в новом диапазоне электромагнитного спектра является наличие оптических элементов для управления данным видом излучения. В главе описаны пленочные светоделители, линзы, а также дифракционные оптические элементы (ДОЭ), примененные в экспериментах, позволяющие манипулировать ТГц излучением для формирования заданных пространственных распределений интенсивности модового состава мощных пучков Новосибирского лазера на свободных электронах. Довольно подробно описаны ДОЭ для получения вихревых пучков с бесселевой модой, а именно фазовые бинарные аксиконы и аксикон с кусочно-непрерывным по азимуту рельефом – голографический аксикон.

Вторая глава научной работы посвящена методам, применяемым в работе для формирования, так называемых, «совершенных» вихревых бесселевых пучков. Показаны

результаты формирования и исследования вихревых бесселевых пучков в свободном пространстве с помощью ДОЭ. Представлены экспериментальные и расчетные данные распределений интенсивности бесселевых пучков, полученных в результате трансформации ТГц излучения НЛСЭ с длиной волны $\lambda = 141$ мкм с помощью бинарных кремниевых фазовых аксиконов и алмазного аксикона с кусочно-непрерывным рельефом. С помощью имеющихся аксиконов были сформированы бесселевы пучки с топологическими зарядами $|l|=1, 2, 3, 4, 9$.

Известно, что исследуемые в работе вихревые бесселевы пучки обладают уникальными свойствами «бездифракционности» и «самовосстановления». «Бездифракционность» этих пучков проявляется в сохранении распределения интенсивности в поперечном сечении на определенном расстоянии при распространении, что отличает их от, например, вихревых лаггер-гауссовых пучков. Свойство «самовосстановления» означает способность этих пучков восстанавливать свое исходное распределение интенсивности после прохождения препятствия на некотором расстоянии от него и деформации волнового фронта. Данное свойство было продемонстрировано как с амплитудными (алюминиевые фольги), так и с фазовыми препятствиями (вспененный и гранулированный полипропилен). В обоих случаях после прохождения препятствия пучок сохранял бесселеву моду.

В третьей главе описан метод идентификации бесселевой моды пучка с помощью аксиконов аналогичных тем, которые были использованы для формирования. Подход основан на методе модовой селекции и ранее был применен в оптическом диапазоне для анализа модового состава когерентных пучков. Процесс такой селекции, фактически, фильтрации, сводился к корреляции между неизвестным и заранее определенным сигналом. В результате был показан положительный (светлое пятно в центре дифракционной картины) или отрицательный (радиально-симметрично расположенные лепестки с темным пятном в центре) отклик. В методическом плане важно, что этот используемый подход предварительно был апробирован для идентификации Эрмит-Гауссовых мод в терагерцовом пучке, а далее подход был перенесен на случай бесселевых пучков, сформированных с помощью бинарных аксиконов. В итоге идентификация моды Бесселя в ТГц пучке была продемонстрирована как для одномодового так и для многомодового случаев.

Четвертая глава посвящена применению вышеизложенных результатов для генерации и исследования распространения вихревых поверхностных плазмон-поляритонов по проводнику обладающего аксиальной симметрией. В первом разделе описан метод генерации ППП, примененный в работе – дифракции на краю, один из наиболее эффективных и простых в реализации методах захвата.

В заключении были изложены основные результаты, полученные в диссертации, среди которых я хотел бы выделить следующие:

1. Впервые сформированы и исследованы мощные терагерцовые бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, полученные с использованием фазового аксикона с кусочно-непрерывным профилем. Продемонстрированы свойства самовосстановления пучка, прошедшего через фазовое препятствие.
2. Показано, что бесселев пучок формируется с эффективностью более 20% даже при освещении бинарного аксикона излучением с длиной волны отличной от расчетной, а именно в диапазонах 28 – 42 и 102 – 178 мкм. Зона формирования бесселева пучка при длине волны излучения в три раза меньше расчетной

- увеличивается в три раза.
3. В терагерцовом диапазоне получены мощные вихревые пучки, диаметр которых не зависит от топологического заряда пучка, так называемые «совершенные» вихревые пучки.
 4. Впервые разработан и экспериментально апробирован метод идентификации бесселевой моды в мощном терагерцовом пучке, основанный на анализе Фурье-образа бесселева терагерцового пучка, прошедшего через бинарный дифракционный оптический элемент, установленный в зоне его формирования, с фазовой функцией, совпадающей с функцией формирующего заданную бесселеву моду элемента. Метод был реализован как в случае одномодового, так и многомодового пучка, включающего в себя комбинацию бесселевых пучков с топологическими зарядами -1 и -2.
 5. Реализованы на практике два метода создания радиальной поляризации в мощном пучке терагерцового диапазона.
 6. Впервые в мире сформированы вихревые поверхностные плазмон-поляритоны терагерцового диапазона на аксиально-симметричной поверхности. В качестве освещающего пучка использовался совершенный вихревой пучок, диаметр которого соответствовал диаметру входного торца образца.
 7. Показано, что плазмон-поляритоны распространяются по поверхности аксиально-симметричного образца вдоль спирали, направление вращения и питч-фактор зависят от топологического заряда освещающего пучка.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

Впервые был описан ряд особенностей присущий вихревым пучкам в зависимости от параметров формирующих дифракционных аксиконов. Показано, что отклонение от расчетной длины волны пучка, освещающего аксиконы (как с бинарным, так и с кусочно-непрерывным рельефом) приводят к регулярным вариациям интенсивности по азимуту в кольцах бесселева пучка и его Фурье-образа.

Мощные смешанные вихревые пучки Бесселя с различными комбинациями топологических зарядов терагерцового диапазона сформированы в интерферометрической схеме Маха-Цендера. Предложен и апробирован метод идентификации бесселевой моды в пучке терагерцового диапазона, основанный на анализе Фурье-образа пучка, прошедшего через кремниевый дифракционный оптический элемент, установленный в зоне его формирования, с фазовой функцией, совпадающей с функцией сформировавшего данный пучок элемента. Метод был реализован как в случае одномодового так и многомодового пучка, включающего в себя комбинацию бесселевых пучков с топологическими зарядами -1 и -2.

В терагерцовом диапазоне получены мощные вихревые пучки, диаметр которых не зависит от топологического заряда пучка, так называемые «совершенные» пучки.

Впервые сформированы поверхностные плазмон-поляритоны терагерцового диапазона на аксиально-симметричной поверхности. В качестве освещающего пучка использовался совершенный вихревой пучок, диаметр которого соответствовал диаметру входного торца образца.

Впервые показано, что направление вращения и питч-фактор вихревых плазмон-поляритонов зависят от топологического заряда освещающего пучка.

Результаты диссертационной работы обладают определенной научной и

практической значимостью. В этой связи можно отметить разработку технологий основанных на генерации вихревых плазмонов, которая полезна для применения во многих областях. Поскольку открывают новые возможности для манипуляции светом на наномасштабе, что может привести к разработке более эффективных оптических устройств, сенсоров и методов передачи информации. В частности, в области телекоммуникаций вихревые плазмоны могут значительно улучшить производительность и эффективность беспроводных систем связи, а также обеспечить стабильность сигнала при работе в сложных атмосферных условиях окружающей среды.

Достоверность полученных результатов и формулируемых выводов обеспечивается, тем, что экспериментальные результаты, полученные в работе с использованием терагерцового излучения Новосибирского лазера на свободных электронах – самого мощного в мире, перестраиваемого по частоте, источника квазимонохроматического излучения, совпадают с результатами численного моделирования. Дополнительно достоверность обеспечивается тем, что новые результаты для терагерцового диапазона соответствуют ранее получаемым в оптическом диапазоне длин волн.

Основные результаты диссертации опубликованы в 63 работах, из них 6 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 1 коллективная монография и 56 – в сборниках тезисов докладов научных конференций. Результаты докладывались на 20 международных и 6 российских конференциях.

Вместе с тем стоит отметить некоторые замечания по работе, в частности:

1. Известно, что способность к самовосстановлению Бесселевых пучков, в первую очередь, обнаруживается в условиях, когда имеем дело с неограниченным волновым пучком. В реальности мы имеем дело с урезанным пучком. В этой связи интересно понять насколько будет сохраняться его такая способность.

2. В экспериментах по восстановлению пучков, прошедших через препятствие, на некотором расстоянии от него анализировалась деформация волнового фронта. Как показано во второй главе данное свойство было продемонстрировано как с амплитудными (алюминиевые фольги), так и с фазовыми препятствиями (вспененный и гранулированный полипропилен). Интересно знать, насколько вспененный и гранулированный полипропилен действительно является только фазовым препятствием.

3. В экспериментах был использован интерферометр Маха-Цендера. При настройке такой техники важно подавление обратного потока энергии. Насколько это было выполнено в экспериментах из текста диссертации понять нельзя.

4. Известно, что эффективность ДОЭ зависит от спектральной чистоты (монохроматичности) излучения, а для ЛСЭ выделение узкой спектральной линии – проблема. В работе было отмечено, что «...зона формирования бесселева пучка при длине волны излучения в три раза меньше расчетной увеличивается в три раза». Считаю, что подобные оценки довольно неточны, необходим более углубленный анализ эффективности работы ДОЭ для широкополосного излучения, нежели сделанный в работе.

Сделанные замечания в целом не снижают научно-практической ценности выполненных исследований.

Автореферат диссертации с достаточной полнотой отражает ее содержание. Диссертация Осинцевой Н.Д. является завершенным научным исследованием и

полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней" от 24.09.2013 N 842 с изменениями в действующей редакции), а ее автор заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Сведения об официальном оппоненте:

Лукин Владимир Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории когерентной и адаптивной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,

адрес: 634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1;

тел: +7 (960) 977-76-25, E-mail: lukin@iao.ru;

докторская диссертация защищена по специальности 01.04.05 – Оптика.

Лукин Владимир Петрович

«28» января 2025 г.

Подпись Лукина В. П. заверяю
Ученый секретарь ИОА СО РАН, к.ф.-м.н.



Т.Е. Кураева