ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 535.3

ЛОКАЛЬНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФУЗИЯ СВЕТА ПРИ ДИФРАКЦИИ ЛАГЕРРОВА ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Ю. В. Васильев, А. В. Козарь, Д. А. Кувшинов, А. Е. Лукьянов, А. В. Селиверстов

(*кафедра общей физики; кафедра радиофизики; кафедра физической электроники*)

E-mail: aluk36@mail.ru

При затенении половины лагеррова лазерного пучка света полубесконечным металлическим экраном с неидеальным краем экспериментально обнаружено явление возникновения тонкой структуры в поперечной диффузии света «полупучка» и ее последующая эволюция в процессе распространения «полупучка» в пространстве.

Известно большое разнообразие форм монохроматических световых пучков: гауссовых, эрмитовых, лагерровых, бесселевых, спиральных, гибридных и т. д. Математически они описываются как решения поперечно-диффузионного, пучкового волнового уравнения Леонтовича–Фока [1]. Сохранение структуры гауссовых, эрмитовых и лагерровых пучков при их фокусировке и свободном распространении без вращения поля можно ассоциировать с однородными деформациями растяжения-сжатия [2].

В работах [3, 4] исследованы процессы, происходящие в распространяющейся электромагнитной волне в случае неоднородной деформации гауссова и лагеррова пучка без вращения поля (при затенении половины пучка полубесконечным дифракционным металлическим экраном). Распространяющийся за экраном «полупучок» света характеризуется сильной градиентностью края. Сильноградиентный край полупучка света вначале пространственно рандомизирован микронеровностями края дифракционного экрана. На удаленном регистрационном экране обнаружено появление световых крыльев клиновидной формы по обе стороны от границы геометрической тени.

Цель настоящей работы — исследовать в области тени изменения интенсивности светового крыла в зависимости от времени τ распространения полупучка света от исходного лагеррова лазерного пучка без вращения поля.

В нашем эксперименте использован аргоновый лазер ЛГН-503, в оптическом резонаторе которого при минимальной силе тока разряда в активной среде 14 А первой возбуждается пространственная осесимметричная мода ТЕМ_{00}. При токе 16 А вместо нее возбуждается более высокая осесимметричная мода ТЕМ_{10}, а при 18 А — следующая осесимметричная мода ТЕМ_{20}.

Согласно принятой в отечественной литературе [5] классификации, генерируемый лазером пучок оптического излучения в первом случае (мода ТЕМ_{00}) называется гауссовым пучком света, во втором (мода ТЕМ_{10}) — осесимметричным лагерровым пучком света с радиальным индексом $p = 1$ и с азимутальным индексом $l = 0$, а в третьем (мода ТЕМ_{20}) — лагерровым пучком света с индексами $p = 2$, $l = 0$.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М показана на рис. 1. Аргоновый лазер *1* типа ЛГН-503 непрерывно генерирует лагерров пучок *2* линейно-поляризованного монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 514.5$ нм. Максимум интенсивности света в осесимметричном лагерровом пучке с радиальным индексом $p = 2$ и с азимутальным индексом $l = 0$ находится на оси пучка, в центре его керна. Керн этого пучка ограничен окружностью первой нулевой амплитуды света диаметром 1.3 мм, за которой расположено первое световое кольцо пучка. Диаметр второго кольца света лагеррова пучка приблизительно равен

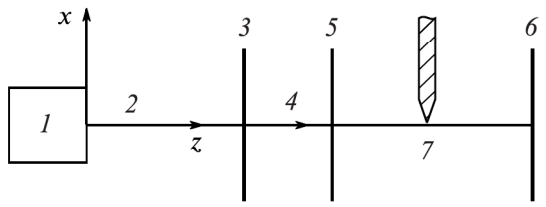

Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента: *1* — лазер, *2* — лагерров пучок лазерного излучения, *3* — набор светофильтров, *4* — ослабленный лагерров пучок света, *5* — механический затвор, *6* — фотографическая рамка голографической установки, *7* — клиновидно заостренный край плоского лезвия безопасной бритвы

3.5 мм (в локальном максимуме интенсивности света в кольце).

Ось z правой декартовой системы координат xyz совмещена в плоскости рисунка с осью пучка *2*, ось x лежит в плоскости рисунка, а ось y перпендикулярна к ней. Электрический вектор светового поля лазерного пучка *2* колеблется параллельно оси y.

Набор нейтральных светофильтров *3* ослабляет интенсивность лазерного пучка *4*, и он падает на нормально закрытый механический затвор *5*. Затвор управляет длительностью времени экспонирования лазерным излучением плоского листа фотобумаги в подвижной фотографической рамке *6* голографической установки (ось пучка *4* перпендикулярна плоскости листа фотобумаги). На расстоянии 150 см от излучателя лазера установлена перпендикулярно к оси пучка *4* тонкая металлическая пластина *7* с клиновидным краем — плоское лезвие безопасной бритвы для технических целей. Прямой острый край лезвия совмещен с диаметром пучка *4*, причем линия острия ориентирована вдоль оси y.

Реальный, микроскопический профиль края лезвия существенно отличается от прямой линии. Исследования в растровом электронном микроскопе с увеличением $\times 1000$ показывают, что локальные выступы, впадины или ступеньки микронных размеров разбивают профиль кончика края лезвия на множество кусочно-линейных отрезков. Отрезки практически параллельны друг другу, причем их длина хаотически варьируется в среднем в диапазоне от единиц до нескольких десятков микрометров (рис. 2).

Опыт показывает, что за малый промежуток времени τ распространения полупучка света за лезвием, в области геометрической тени (в параксиальной области пространства, размеры которой по оси y ограничены величиной диаметра лагеррова пучка, а по оси x — в несколько раз больше этого диаметра), возникает необычное световое крыло с тонкой структурой.

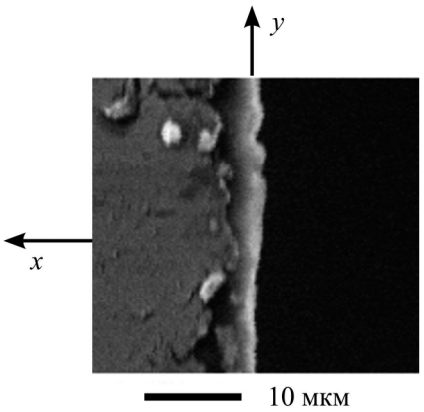

Рис. 2. Микрофотография произвольно выбранного участка края лезвия, полученная в растровом электронном микроскопе при увеличении $\times 1000$. Вид со стороны излучателя лазера

В качестве примера на рис. 3, *а* приведено негативное изображение светового крыла, зарегистрированного на листе фотобумаги при удалении от плоскости лезвия на расстояние $L = 50$ мм ($\tau = 0.17$ нс). Нижняя часть изображения (сплошное черное поле) примыкает к диаметру полупучка на границе геометрической тени. Ее форма напоминает сглаженный график изменения интенсивности света по оси x в зависимости от смещения вдоль диаметра лагеррова пучка ($p = 2$, $l = 0$) по оси y. Визуально контур сглаженного графика похож на центральный холм с двумя парами сателлитов, высота которых убывает при удалении от середины холма к периферии.

Выше холма и его сателлитов на фотобумаге видны локализованные совокупности весьма узких и длинных черных полосок клиновидной формы, вершины которых ориентированы в глубь геометрической тени, вдоль положительного направления оси x. Клиновидные полоски хаотически смещены относительно друг друга по оси y. Как длина, так и ширина соседних полосок существенно различаются. В среднем поперечный размер таких полосок по оси y порядка нескольких десятков микрометров (на рис. 3, *а* показаны лишь наиболее интенсивные и широкие полоски).

С увеличением времени τ узкие полоски размываются, так что происходит полное исчезновение тонкой структуры в строении светового крыла. Например, на рис. 3, *б* видно, что на расстоянии $L = 500$ мм ($\tau = 1.7$ нс) в средней части изображе-

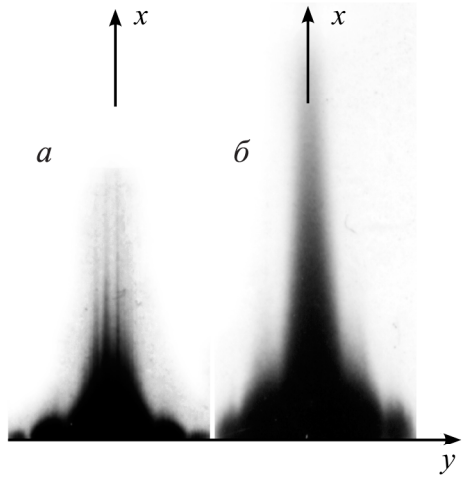

Рис. 3. Характерные примеры негативного изображения картины распределения освещенности листа фотобумаги в параксиальной области геометрической тени при дифракции лагеррова пучка на краю полубесконечного металлического экрана: вблизи от этого экрана (лист фотобумаги на расстоянии $L = 50$ мм от экрана) (*а*) и вдали от экрана ($L = 500$ мм) (*б*). Каждой картинке (*а* и *б*) этого рисунка на листе фотобумаги соответствует прямоугольная площадка размера 8×4 мм в координатной плоскости xy

ния возникает привычное, монолитное, клиновидное световое крыло, которое выходит из края керна лагеррова полупучка света (как и в работе [4], где параметры $p = 1$, $l = 0$).

Физически эволюцию тонкой структуры светового крыла можно интерпретировать как результат трансформации полупучка в процессе его распространения [3]. Установлено, что за время $\tau \approx 1$ нс происходит сглаживание резких перепадов амплитуды на границе геометрической тени. При этом за время τ в несколько сотен пикосекунд происходит подавление высокочастотных пространственных гармоник вдоль оси y в полупучке, у которого исходный, сильноградиентный по оси x край был вначале пространственно хаотически модулирован по оси y (в момент $\tau = 0$).

Литература

1. *Киселёв А.П.* // Оптика и спектроскопия. 2007. **102**, № 4. С. 661.
2. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* // УФН. 2004. **174**, № 12. С. 1273.
3. *Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 4. С. 69.
4. *Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е., Селиверстов А.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 57.
5. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и лазерные пучки. М., 1990.

Поступила в редакцию
15.02.2008