

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.41

## ПОПЕРЕЧНО-ДИФФУЗИОННЫЕ КРАЕВЫЕ СПЕКЛЫ

Ю. В. Васильев, А. В. Козарь, А. Е. Лукьянов

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

**Экспериментально обнаружено явление возникновения спеклов нового типа при дифракции лазерного пучка на остром металлическом клине с неидеальным краем. Предложено объяснение этого явления на основе градиентного механизма Леонтовича.**

Известно [1], что при нормальном падении пучка лазерного излучения на плоскую металлическую пластину лезвия безопасной бритвы освещающее прямой острый край лезвия когерентное электромагнитное излучение дифрагирует и формирует на удаленном плоском экране систему кольцевидных спеклов (мысленное продолжение прямой линии острого края лезвия перпендикулярно к плоскости экрана).

Цель настоящей работы — исследовать оптические картины, возникающие на параллельном плоскости лезвия удаленном экране при малоугловом дифракционном рассеянии вперед лазерного пучка. Эти картины возникают из-за микронерегулярностей острого края лезвия.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М показана на рис. 1. Аргонный лазер 1 типа ЛГН-503 непрерывно генерирует гауссов пучок 2 монохроматического излучения. Длина волны излучения  $\lambda = 514.5$  нм, эффективный диаметр пучка  $D = 2.5$  мм, пространственная мода  $TEM_{00}$ . Ось  $Oz$  правой декартовой системы координат  $Oxyz$  совмещена с осью гауссова пучка, ось  $Ox$  лежит в плоскости рисунка, а ось  $Oy$  перпендикулярна ему. Колебания электрического вектора лазерной волны параллельны оси  $Oy$ .

Механический затвор 3 управляет временем экспонирования листа фотобумаги при регистрации дифракционных картин. Набор нейтральных светофильтров 4 ослабляет интенсивность лазерного пучка. Диафрагма 5 с круглым отверстием производит первичную пространственную фильтрацию лазерного пучка, падающего на симметричную двояковыпуклую собирающую сферическую линзу 6 с фокусным расстоянием 42 см. В фокальной плоскости линзы диаметр сжатого гауссова пучка  $d \approx 50$  мкм, т.е. выполняются условия критерия применимости приближения квазиоптики [2]. Диафрагма 7 с круглым отверстием производит окончательную пространственную фильтрацию гауссова пучка излучения.

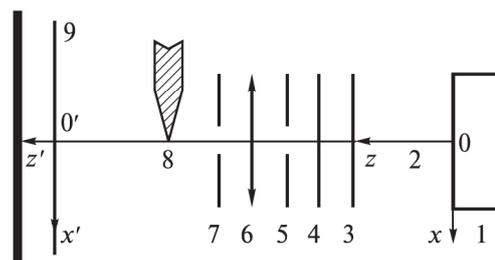


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента: 1 — лазер, 2 — гауссов пучок излучения, 3 — механический затвор, 4 — набор светофильтров, 5 — диафрагма с круглым отверстием, 6 — линза, 7 — диафрагма с круглым отверстием, 8 — лезвие, 9 — экран

Пластина 8 плоского лезвия безопасной бритвы с симметрично заточенным клиновидным острым краем перпендикулярна к оси гауссова пучка. Прямая линия острого края параллельна оси  $Oy$  и совмещена с диаметром гауссова пучка. В опытах с линзой 6 линия острого края совмещена с диаметром сжатого пучка в фокальной плоскости линзы.

Плоский экран 9 удален от лезвия вдоль перпендикулярной к экрану оси  $Oz$  на расстояние  $L = 1$  м. На экране визуально наблюдаем оптическую дифракционную картину. Фрагменты такой картины регистрируем на плоском листе фотобумаги в подвижной фотографической рамке голографической установки. Размеры входного окна рамки  $9 \times 12$  см.

Поскольку штрихованная система координат  $O'x'y'z'$  отличается от нештрихованной  $Oxyz$  несущественно — только сдвигом оси  $O'z'$  вдоль оси  $Oz$  на величину расстояния от лазера 1 до плоскости экрана 9, то далее по тексту величины, относящиеся к плоскости  $x'O'y'$  экрана 9, приведены без штриховки.

В начале эксперимента (без линзы) лазерный пучок сильно ослаблен светофильтрами. Незаслоненная лезвием половина пучка (полупучок) распространяется вперед и формирует на экране спе-

цифическую дифракционную картину. На экране видно центральное очень яркое «пятнышко», по обе стороны от которого видны два менее ярких, симметричных «световых крыла». Эти световые крылья имеют форму клиновидных фигур. Основания фигур примыкают к пятнышку, а их острые вершины удалены от пятнышка на некоторое расстояние в противоположных направлениях по оси  $Ox$ .

С возрастанием интенсивности освещающего пучка яркость как центрального пятнышка, так и световых крыльев увеличивается, причем протяженность световых крыльев по оси  $Ox$  становится больше. На экране выше и ниже пятнышка и световых крыльев появляются необычные спеклы [3]. Эти спеклы визуальнo воспринимаются как слабо освещенные, длинные и очень узкие полоски, параллельные оси  $Ox$ . Соседние спеклы хаотически смещены по оси  $Oy$  друг относительно друга. Так же случайно варьируется и их яркость. Условные границы семейства спеклов выглядят размытыми, но по оси  $Ox$  они нигде не выходят за пределы протяженности световых крыльев. При дальнейшем возрастании интенсивности пучка границы семейства спеклов удаляются друг от друга по оси  $Ox$ , т. е. ведут себя подобно световым крыльям.

Сжатие освещающего пучка с помощью линзы  $b$  увеличивает поперечные размеры спеклов  $\Delta y$  почти в 50 раз. Пример картины таких расширенных спеклов (зарегистрировано негативное изображение на фотобумаге) показан на рис. 2. При регистрации спеклов верхний край листа фотобумаги опущен на 15 мм ниже положения центрального яркого пятна и световых крыльев. Вдоль длины спеклов нет никакого резкого локального возрастания яркости какого-нибудь спекла ни под, ни над центральным ярким пятном на экране.

Среднестатистический поперечный размер расширенных спеклов  $\langle \Delta y \rangle \approx 2$  мм. Это примерно в пять раз меньше максимальной оценки величины  $\Delta y \sim \lambda L/d \approx 10$  мм, которую дает дифракционная теория для обычных спеклов от шероховатых поверхностей [3]. Поэтому ниже предложен один из возможных способов описания процесса формирования световых крыльев и краевых спеклов.

М. А. Леонтович [4] впервые предложил использовать приближенный, но мощный «метод параболического уравнения», который нашел широкое применение при решении задач о распространении электромагнитных волн [5], особенно в случае лазерных пучков [6].

Применительно к нашему эксперименту можно считать в первом приближении, что плоская лазерная волна порождает на остром крае идеального металлического клина цилиндрические волны, которые как будто бы расходятся от острого края. Поэтому в упрощенном двумерном случае параболическое уравнение для цилиндрических волновых фронтов принимает вид уравнения поперечной

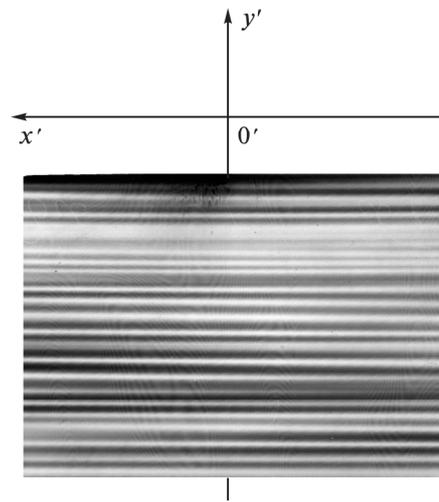


Рис. 2. Фрагмент картины спеклов на экране. Для сжатия поперечных размеров гауссового пучка, дифрагирующего на остром крае лезвия, использована длиннофокусная линза. Негативное изображение спеклов в виде длинных темных полосок (на фотобумаге после проявления)

диффузии лучевой амплитуды [5]:

$$\frac{\partial A}{\partial r} = \frac{i\lambda}{4\pi r^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2}.$$

Здесь  $A$  — лучевая амплитуда цилиндрической волны на расстоянии  $r$  от края лезвия в «лучевой трубке» под углом  $\varphi$  к границе геометрической тени за лезвием,  $i$  — мнимая единица,  $\lambda$  — длина волны.

Сильно градиентный (в направлении оси  $Ox$ ) край плоской волны полупучка оказывается источником поперечной диффузии лучевой амплитуды на границе геометрической тени за лезвием. Это и является главной причиной возникновения световых крыльев по обе стороны от границы геометрической тени. Световые крылья — это области эффективной диффузии лучевой амплитуды по цилиндрическим волновым фронтам через соседние лучевые трубки. Поперечная диффузия приводит к трансформации формы полупучка, к сглаживанию резких перепадов амплитуды на границе геометрической тени, т. е. к подавлению высокочастотных пространственных гармоник распространяющегося полупучка.

Этот механизм сглаживания пространственной модуляции электромагнитной волны проявляет себя и в более слабом эффекте возникновения специфических спеклов. Реальный острый край лезвия характеризуется хаотической высокочастотной пространственной модуляцией вдоль оси  $Oy$  (микрорельеф острого края лезвия с неоднородностями микронных размеров). Пример такой модуляции (микрорельефа острого края) показан на рис. 3 для произвольно выбранного фрагмента острого края лезвия. Микрофотография (рис. 3) получена в растровом (сканирующем) электронном микроскопе JSM-U3 (край лезвия — в центре снимка).

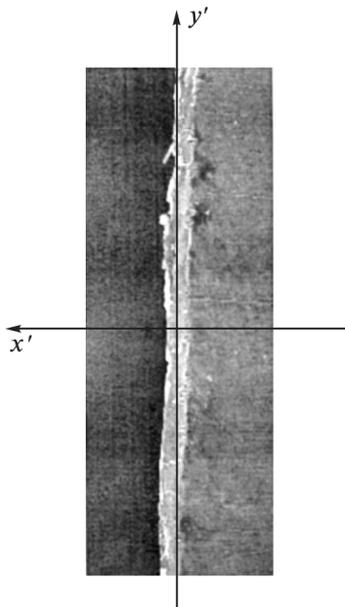


Рис. 3. Хаотическая пространственная модуляция (микрорельеф) фрагмента острого края лезвия безопасной бритвы. Микрофотография получена в растровом электронном микроскопе. Длина фрагмента края лезвия 100 мкм. Вид со стороны лазера на плоскость  $x'y'$  регистрационного экрана. Справа (при  $x' < 0$ ) он заслонен фрагментом полубесконечной плоскости лезвия с острым краем вдоль оси  $O'y'$

Слабые составляющие случайного пространственного спектра (микрорельефа) края лезвия модулируют по оси  $Oy$  сильно градиентный по оси  $Ox$  край полупучка. Эти высокочастотные составляющие градиентного края полупучка вносят дополнительные изменения волнового вектора — он меняется на величину  $\Delta k_y$  (по оси  $Oy$ ) в развивающемся процессе поперечной диффузии лучевой амплитуды по оси  $Ox$ . Так протекает физический процесс формирования очень слабых поперечно-диффузионных краевых спеклов.

#### Литература

1. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Курицына Е.Ф., Лукьянов А.Е. // ЖТФ. 1998. **68**, № 7. С. 139.
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М., 1998.
3. Франсон М. Оптика спеклов. М., 1980.
4. Леонтович М.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1944. **8**, № 1. С. 16.
5. Малюжинец Г.Д. Физический энциклопедический словарь. М., 1960. Т. 1. С. 606.
6. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М., 1985.

Поступила в редакцию  
09.10.06