

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.3

## КРАЕВАЯ ДИФРАКЦИЯ ЛАГЕРРОВА ПУЧКА СВЕТА

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

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

**При дифракции лагеррова пучка лазерного излучения на прямом остром крае плоского лезвия безопасной бритвы обнаружено явление поперечной диффузии лучевой амплитуды по двум главным ортогональным направлениям цилиндрической поверхности дифрагированной граничной волны.**

Известно [1, 2], что конструктивные особенности оптического резонатора лазера определяют закон изменения амплитуды светового поля на волновом фронте выходящего из резонатора пучка излучения. При распространении в свободном пространстве лазерного пучка — гауссова, эрмитова или лагеррова — изменяется радиус кривизны волнового фронта, увеличивается ширина пучка  $w$ , уменьшается амплитуда светового поля, однако форма распределения интенсивности  $I$  света в пучке остается неизменной. Поэтому для решения конкретных задач, которые возникают в различных приложениях, принято использовать наиболее подходящую форму пучка. К настоящему времени свойства гауссовых и эрмитовых пучков света изучены довольно подробно, а лагерровых — сравнительно мало [3–7].

В аксиально-симметричном лагерровом пучке с радиальным индексом  $p = 1$  и с азимутальным индексом  $l = 0$  распределение интенсивности света в плоскости, перпендикулярной к оси пучка, описывается простым соотношением [1, 2]

$$I(r) = I(0)[(1 - 2r^2/w^2) \exp(-r^2/w^2)]^2, \quad (1)$$

где  $I(0)$  — интенсивность света на оси пучка, а  $I(r)$  — интенсивность на расстоянии  $r$  от оси пучка.

Цель настоящей работы — исследовать изменения в структуре светового поля простого лагеррова пучка ( $p = 1, l = 0$ ) при его дифракции на прямом остром крае металлического клина.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М показана на рис. 1. Аргонный лазер  $I$  типа ЛГН-503 непрерывно генерирует лагерров пучок  $2$  линейно-поляризованного монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda = 514.5$  нм. Ось  $Ox$  правой декартовой системы координат  $Oxyz$  совмещена в плоскости рисунка с осью пучка  $2$ , ось  $Oy$  лежит в плоскости рисунка, а ось  $Oz$  перпендикулярна к ней. Электрический вектор светового поля пучка  $2$  колеблется параллельно оси  $Oz$ .

Набор нейтральных светофильтров  $3$  ослабляет интенсивность лазерного излучения до необходи-

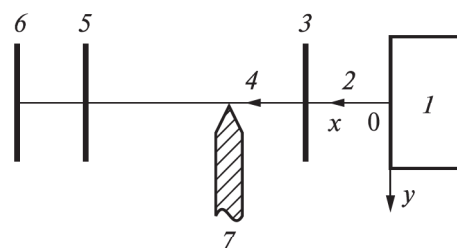


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема дифракционного эксперимента: 1 — лазер, 2 — лагерров пучок лазерного излучения, 3 — набор светофильтров, 4 — ослабленный лагерров пучок света, 5 — механический затвор, 6 — фотографическая рамка голографической установки, 7 — клиновидно заостренный край плоского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

мого уровня. Ослабленный пучок  $4$  падает на нормально закрытый механический затвор  $5$ , который управляет длительностью промежутка времени экспонирования лазерным излучением плоского листа фотобумаги в фотографической рамке  $6$  голографической установки. Рамка расположена на расстоянии 225 см от лазерного излучателя. Пучок  $4$  падает перпендикулярно на плоскость листа фотобумаги.

Типичная картина распределения освещенности на листе фотобумаги показана на рис. 2, а (негативное изображение). В центре изображения виден черный диск, который соответствует керну лазерного пучка с максимумом интенсивности света на его оси. Черный диск окружен черным кольцом, порожденным периферийной частью лазерного пучка со средней интенсивностью на порядок меньшей, чем в керне пучка. Колебания электрического вектора светового поля периферийной части пучка происходят в противофазе с колебаниями в керне пучка. Появление белого кольца между черным диском и черным кольцом обусловлено существованием в лагерровом пучке области с почти нулевой интенсивностью света, что согласуется с описанием формы лагеррова пучка соотношением (1).

В эксперименте обнаружены существенные изменения в структуре светового поля (рис. 2, б)

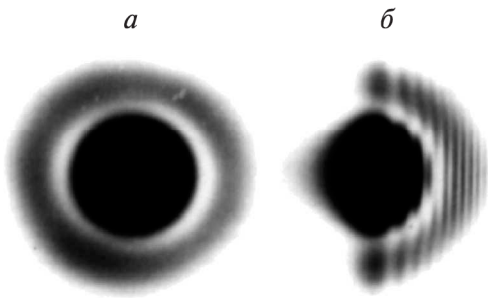


Рис. 2. Негативное изображение сформированной оптической картины на удаленном листе фотобумаги: (а) при свободном распространении лаггеррова лазерного пучка света, (б) при затенении половины лазерного пучка острым краем плоского лезвия безопасной бритвы

при размещении на пути пучка 4 перпендикулярно к его оси металлической пластины 7 — плоского лезвия безопасной бритвы — на расстоянии 30 см от фотографической рамки 6. Острый край лезвия совмещен с диаметром пучка 4. С помощью растрового электронного микроскопа установлено, что линию острия лезвия можно считать практически прямой линией. Она ориентирована параллельно оси  $Oz$  и описывается уравнением  $y = 0$ . Пример электронномикроскопического изображения профиля произвольно выбранного участка лезвия — на рис. 3 (микрофотография с увеличением  $\times 100$ ).

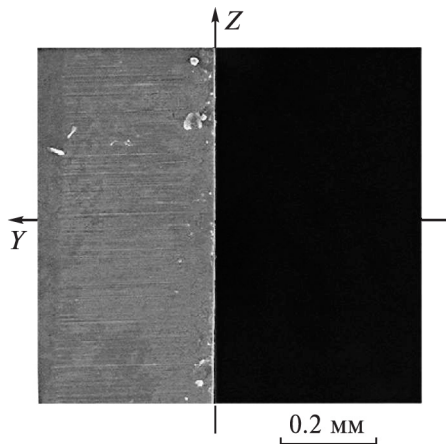


Рис. 3. Микрофотография произвольно выбранного участка края лезвия, полученная в растровом электронном микроскопе. Вид со стороны излучателя лазера

Визуальное сравнение двух изображений на рис. 2 подтверждает, что при затенении острым краем лезвия половины лаггеррова пучка света на регистрирующем экране видны дифракционные и интерференционные картины.

Во-первых, прошедший мимо лезвия незатененный полупучок света формирует на листе фотобумаги негативное изображение — черное полукольцо, окружающее половину черного диска. На полукольце видно семейство интерференционных полос, сгущающихся по мере удаления от границы геометрической тени в область возрастания

(по модулю) значений отрицательных координат точек полукольца на оси  $Oy$ . Это свидетельствует о существовании цилиндрической граничной волны, возникающей при дифракции лаггеррова пучка света на краю лезвия и когерентно взаимодействующей с волной прошедшего полупучка в плоскости листа фотобумаги.

Во-вторых, в белом промежутке между черным полукольцом и черным полудиском видны изломы интерференционных полос при переходе от полудиска к полукольцу. Причина этого явления — скачок фазы на  $\pi$  при переходе через область нулевых значений амплитуды в лаггерровом пучке.

В-третьих, в области геометрической тени на фотобумаге зарегистрировано появление клиновидного «светового крыла», вершина которого ориентирована в направлении положительной значений координатной оси  $Oy$ . Поперечные размеры светового крыла по оси  $Oz$  меньше диаметра всего лаггеррова пучка, но сравнимы с диаметром ядра пучка.

Совокупность обнаруженных явлений можно объяснить с помощью современных представлений о распространении узконаправленных монохроматических пучков в приближении параболического уравнения Леонтовича–Фока [2].

Применительно к нашему эксперименту параболическое уравнение для цилиндрических волновых фронтов имеет вид уравнения поперечной диффузии лучевой амплитуды  $A$  по двум главным ортогональным направлениям цилиндрического фронта, соответствующим изменению координаты  $z$  вдоль образующей цилиндра и изменению координаты  $\varphi$  вдоль окружности в сечении цилиндра перпендикулярной плоскости  $xOy$ :

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{i\lambda}{4\pi} \left( \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) = 0.$$

Здесь  $A$  — лучевая амплитуда граничной цилиндрической волны на расстоянии  $\rho$  от края лезвия в лучевой трубке под углом  $\varphi$  к границе геометрической тени за лезвием и на высоте  $z$  от середины участка лезвия, освещенного лаггерровым пучком;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $i$  — мнимая единица.

### Литература

1. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М., 1990.
2. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. М., 1989.
3. Гончаренко А.М. Гауссовы пучки света. М., 2005.
4. Малютин А.А. // Квант. электроника. 2004. **34**, № 10. С. 960.
5. Воляр А.В., Фадеева Т.А. // Оптика и спектроскопия. 2006. **101**, № 3. С. 477.
6. Малютин А.А., Илюхин В.А. // Квант. электроника. 2007. **37**, № 2. С. 181.
7. Seshadri S.R. // Opt. Lett. 2006. **31**, N 5. P. 619.

Поступила в редакцию  
20.03.07