

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 лаггеррова 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 лаггеррова — 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 лаггерровых — сравнительно мало [3–7].

В аксиально-симметричном лаггерровом 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 лаггеррова 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 1 типа ЛГН-503 непрерывно генерирует лаггерров 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-

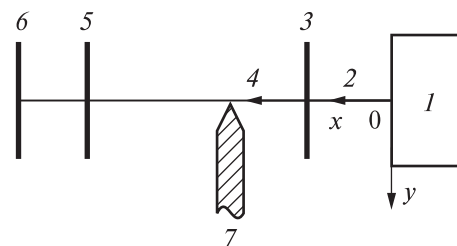


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема дифракционного эксперимента: 1 — лазер, 2 — лаггерров пучок лазерного излучения, 3 — набор светофильтров, 4 — ослабленный лаггерров пучок света, 5 — механический затвор, 6 — фотографическая рамка голографической установки, 7 — клиновидно заостренный край плоского 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 лаггерровом пучке области с почти нулевой интенсивностью света, что согласуется с описанием формы лаггеррова пучка соотношением (1).

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

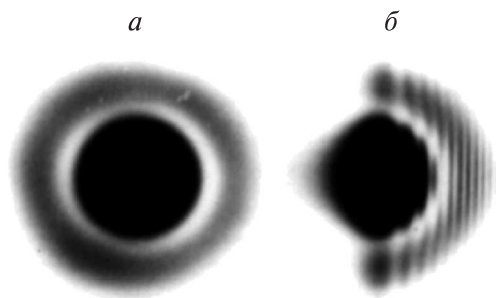


Рис. 2. Негативное изображение сформированной оптической картины на удаленном листе фотобумаги: (а) при свободном распространении лаггеррова лазерного пучка света, (б) при затенении половины лазерного пучка острым краем плоского лезвия безопасной бритвы

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 $\times 100$).

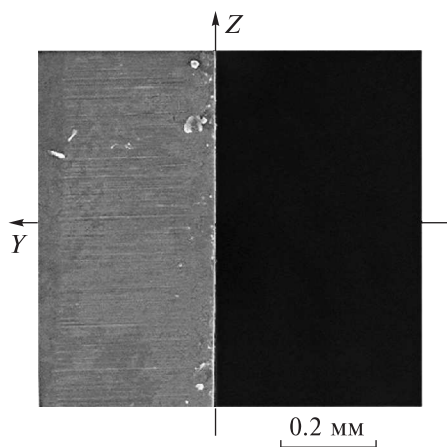


Рис. 3. Микрофотография произвольно выбранного участка края лезвия, полученная в растровом электронном микроскопе. Вид со стороны излучателя лазера

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 π 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 положительных 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 φ 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 ρ от края лезвия в лучевой трубке под углом φ к границе геометрической тени за лезвием и на высоте z от середины участка лезвия, освещенного лаггерровым пучком; λ — 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