

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Дифракция гауссова пучка света на краях прямого угла пластины и картина интерференции в области тениЮ. В. Васильев¹, А. В. Козарь², А. В. Матюнин^{1,а}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
¹кафедра общей физики; ²кафедра фотоники и физики микроволн. Россия, 119991, Москва,
 Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
 E-mail: ^аphysphak@mail.ru

Статья поступила 20.01.2010, подписана в печать 17.02.2010

Круговой гауссов пучок монохроматического лазерного излучения нормально падает на плоскость тонкой металлической пластины с прямым углом и дифрагирует на краях угла пластины. Обнаружено, что в области тени за пластиной интерферируют два основных фрагмента сложной дифрагированной волны, с цилиндрическими волновыми фронтами, оси которых взаимно ортогональны. Это установлено по характерному виду интерференционной картины, которая на плоском экране за пластиной состоит из интенсивных, криволинейных, клиновидных полос, расположенных попарно симметрично относительно биссектрисы прямого центрального угла кругового сектора тени.

Ключевые слова: дифракция на лезвии, интерференция в поле тени.

УДК: 535.4. PACS: 42.25.-р.

Известно [1], что в случае монохроматического светового поля в вакууме с длиной волны λ в параксиальном приближении на основе метода параболического уравнения

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial z} \right) A = 0$$

можно получить математическое описание обширного многообразия форм закона распределения комплексной амплитуды A в узких, структурно устойчивых лазерных пучках, распространяющихся с волновым числом $k = 2\pi/\lambda$ вдоль оси z декартовой системы координат xuz . В лазерном эксперименте целесообразно выбирать форму закона распределения амплитуды A , соответствующую достижению конкретно поставленной цели исследования [2]. В экспериментальной работе [3] наиболее удобной оказалась фундаментальная круговая гауссова мода линейно поляризованного, монохроматического лазерного пучка. Острое, плоское лезвие безопасной бритвы затеняло в лазерном пучке один круговой сектор с центральным углом $\alpha = 180^\circ$. Представляется интересным исследовать поведение дифрагированного светового поля в параксиальной области пространства, когда дифракционное препятствие затеняет круговой сектор лазерного пучка с другим значением центрального угла α , например $\alpha = 90^\circ$.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать структуру распределения интенсивности монохроматического светового поля в области геометрической тени за непрозрачной, плоской металлической пластиной с прямым углом, на краях которого дифрагирует нормально падающий на пластину лазерный круговой гауссов пучок.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М с аргоновым лазером типа ЛГН-503 показана на рис. 1.

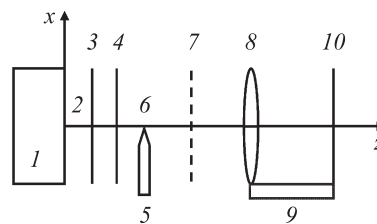


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента: 1 — лазер, 2 — ось кругового гауссова пучка лазерного излучения, 3 — набор светофильтров, 4 — механический затвор, 5 — поперечное сечение стальной пластины узкого лезвия безопасной бритвы, 6 — клиновидно заостренный край лезвия, 7 — съемная фотографическая рамка голографической установки, 8 — тонкая собирающая линза на переднем конце подвижного оптического рельса, 9 — подвижный оптический рельс на столе голографической установки, 10 — фотографическая рамка на заднем конце подвижного оптического рельса

Лазер 1 непрерывно генерирует круговой гауссов пучок монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 514.5$ нм и с эффективным радиусом 1.25 мм. Ось 2 лазерного пучка совмещена в плоскости рисунка с осью z правой декартовой системы координат xuz . Ось x лежит в плоскости рисунка, а ось y перпендикулярна ей. В реальном трехмерном пространстве ось x ориентирована вертикально вверх, а оси y и z ориентированы горизонтально, параллельно плоскости стола голографической установки. Колебания электрического вектора линейно поляризованной лазерной волны происходят вдоль оси x .

Интенсивность пучка лазерного излучения ослабляется до требуемого уровня набором светофильтров 3. Механический затвор 4 управляет длительностью времени освещения непрозрачного дифракционного пре-

пятствия 5 ослабленным пучком. Дифракционным препятствием служит узкое лезвие безопасной бритвы. Лезвие имеет вид прямоугольной стальной полосы длиной 37 мм, шириной 7 мм и толщиной 0.1 мм, в полотно которой пробито несколько сквозных отверстий. Один длинный край стальной полосы лезвия заострен клиновидно. В нашем эксперименте плоскость металлической пластины лезвия установлена параллельно координатной плоскости xu таким образом, что длинный, острый край лезвия 6 параллелен оси y , короткий край лезвия параллелен оси x , а вершина прямого угла пластины лезвия 5 совмещена с осью 2 кругового гауссова пучка. Лезвие затеняет в лазерном пучке только один его круговой сектор — с центральным углом $\alpha = 90^\circ$. Остальная часть лазерного пучка свободно проходит мимо лезвия и нормально падает на плоскость входного окна подвижной фотографической рамки 7.

Фотографическую рамку 7 можно плавно перемещать по столу голографической установки вдоль оси z и удалять от плоскости лезвия на произвольное расстояние L вплоть до максимального значения $L = 200$ см. При этом на плоском экране — обычном листе белой бумаги во входном окне фотографической рамки — видны изменения, которые происходят в дифракционной картине при удалении экрана от плоскости лезвия. Фоторегистрация наиболее интересных дифракционных картин производится путем замены в фотографической рамке листа обычной бумаги листом фотобумаги.

При необходимости проведения исследований тонкой структуры дифракционных картин на столе голографической установки размещаем взамен рамки 7 вспомогательную оптическую систему. Она состоит из тонкой собирающей линзы 8 с фокусным расстоянием $f = 7$ см, которая с помощью рейтера закреплена на переднем конце стандартного оптического рельса 9 длиной 150 см, и фотографической рамки 10 голографической установки с входным окном 9×12 см, которая закреплена на заднем конце рельса. В плоскости входного окна фотографической рамки 10 формируется перевернутое и двадцатикратно увеличенное изображение распределения интенсивности светового поля из передней сопряженной плоскости оптической системы, находящейся на расстоянии 3.5 мм перед передней фокальной плоскостью линзы. Оптический рельс 9 можно плавно перемещать по столу голографической установки вдоль оси z и совмещать переднюю сопряженную плоскость оптической системы с любой интересующей нас плоскостью светового поля на расстоянии L за плоскостью дифракционного препятствия 5. При этом лист фотобумаги в фотографической рамке 10 в течение времени $\tau = 10$ с подвергается освещению лазерным излучением. После стандартной процедуры проявления освещенного листа фотобумаги на листе возникает негативное изображение сфотографированного распределения светового поля. В виде примера на рис. 2 показаны три наиболее характерных случая в распределении светового поля в дифракционном эксперименте.

Если передняя сопряженная плоскость оптической системы совмещена с плоскостью дифракционного препятствия ($L = 0$ см), то, как видно на рис. 2, а, не наблюдается никаких интерференционных картин внутри параксиальной области пространства, размер которой

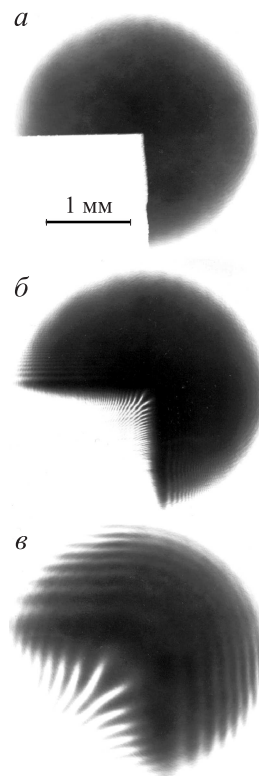


Рис. 2. Примеры негативного изображения распределения светового поля в трех плоскостях за дифракционным препятствием при удалении от препятствия на различные расстояния L : $L = 0$ см (а), 3 см (б) и 30 см (в)

ограничен поперечным размером кругового гауссова пучка. При удалении сопряженной плоскости оптической системы из этого исходного положения на малое расстояние $L > 0$ видно возникновение интерференционных полос как в освещенной, так и в затененной части параксиальной области. В эксперименте проводилось последовательное ступенчатое удаление оптической системы от лезвия вдоль оси z . При этом удалении передняя сопряженная плоскость оптической системы перемещалась из начального, исходного положения ($L = 0$ см) к своему конечному положению ($L = 30$ см) с шагом $\Delta L = 3$ см между двумя последовательными положениями.

Опыт показывает, что в картинах дифракции видимые качественные изменения быстро происходят вблизи обоих краев прямого угла дифракционного препятствия 5, когда расстояние L измеряется всего несколькими сантиметрами. На рис. 2, б представлено негативное изображение распределения светового поля на расстоянии $L = 3$ см за препятствием. На фотоснимке видно, что в периферической части освещенной параксиальной области пространства формируется система чередующихся черных и белых интерференционных полос. Черные полосы фотоснимка соответствуют местам локальных максимумов светового поля, а белые — локальных минимумов. Полосы параллельны ближайшим прямым отрезкам, которые являются сторонами кругового сектора геометрической тени за дифракционным препятствием, с центральным углом $\alpha = 90^\circ$.

На этом же фотоснимке (рис. 2, б) видна картина интерференционных полос, возникших внутри области

геометрической тени. Черные интерференционные полосы, расположенные вдали от вершины прямого угла области тени, имеют вид коротких прямых отрезков. Они перпендикулярны к ближайшей прямой линии, которая является стороной кругового сектора геометрической тени. По мере приближения к вершине прямого центрального угла сектора тени черные интерференционные полосы удлиняются и искривляются. Только средняя черная полоса системы имеет форму симметричной клиновидной фигуры, ось которой совмещена с линией биссектрисы центрального угла сектора тени. Другие близкие к ней черные полосы интерференционной картины имеют вид искривленных клиньев. Последние не являются симметричными фигурами, но расположены попарно симметрично относительно биссектрисы центрального прямого угла сектора тени. Установлено, что в этой интерференционной картине локальная пространственная частота чередования черных и белых полос, измеренная вдоль обеих, взаимно перпендикулярных границ геометрической тени, быстро возрастает по мере удаления от вершины центрального угла сектора тени к его периферии.

Вся описанная совокупность обнаруженных нами особенностей строения картин интерференции (как в освещенной, так и в затененной части параксиальной области пространства) убеждает в том, что с краями угла дифракционного препятствия совпадают оси цилиндрических фронтов двух фрагментов единой, сложной дифракционной волны, которая распространяется вперед за плоскостью дифракционного препятствия.

При последующем ступенчатом увеличении расстояния L был экспериментально обнаружен эффект накопления интенсивности светового поля, дифрагированного в область сектора тени, и существенного изменения внутри сектора тени локальной пространственной частоты чередования черных и белых интерференционных полос. С помощью серии из 10 фотоснимков установлено, что с ростом расстояния L последовательно происходит увеличение площади негативного изображения светового поля, зарегистрированного на фотоснимках в виде среднего прямого черного клина, и его ближайших соседей, имеющих вид искривленных клиньев. Увеличение размеров клиновидных полос интерференционной картины с ростом расстояния L говорит о возрастании глубины проникновения дифрагированного электромагнитного поля в секторе тени. В виде примера на рис. 2, в показано негативное изображение распределения светового поля в параксиальной области пространства при $L = 30$ см.

Доминирующим элементом в этой интерференционной картине в области тени является средняя интерференционная полоса, которая имеет форму симметричной клиновидной фигуры. Эта полоса существует всегда, даже когда на очень больших расстояниях L она практически теряет всех своих криволинейных соседей — других участников процесса формирования интерференционной картины в секторе тени. Такое поведение криволинейных полос симметричной в целом интерференционной картины обусловлено одновременным уменьшением величины кривизны цилиндрических фронтов этих двух фрагментов сложной, дифракцион-

ной краевой волны, которое происходит при увеличении расстояния L .

Экспериментально обнаруженная симметрия интерференционной картины и эффект накопления интенсивности дифрагированного светового поля внутри параксиальной области геометрической тени является прямым подтверждением того, что механизм дифракционного рассеяния вперед электромагнитного излучения не зависит от того, является ли нормально падающая на прямой край препятствия волна E -поляризованной или H -поляризованной. Оба интерферирующих фрагмента единой волны дифрагированного поля в нашем эксперименте оказываются полностью равноправными. Глубина их проникновения в область тени одинаково увеличивается при росте величины удаления (на расстояние L) от плоскости дифракционного препятствия. Такое поведение фрагментов сложной дифрагированной лазерной волны согласуется с выводами, которые были теоретически получены еще в 1896 г. в классической работе Зоммерфельда [4]. В строгой теории Зоммерфельда в одном случае на краю идеально проводящей, непрозрачной полуплоскости дифрагирует E -поляризованная плоская монохроматическая волна, а в другом случае H -поляризованная волна. Однако условия проведения нашего эксперимента оказываются более сложными, чем это было рассмотрено в теории Зоммерфельда. Результаты нашего лазерного эксперимента, в котором падающая электромагнитная волна лазерного пучка считается на одном краю прямого угла препятствия как E -поляризованная, а на другом краю уже как H -поляризованная, требуют самостоятельного теоретического обсуждения с позиций современных представлений, опирающихся на возможности использования в параксиальном приближении метода параболического уравнения.

Важные для практических применений выводы были получены в физической теории дифракции Уфимцева, в которой проведено исследование дифракции электромагнитной волны на клине методом параболического уравнения [5, гл. 5]. Уфимцев теоретически доказал, что энергия дифрагированного электромагнитного поля проникает в окружающее пространство от границы света и тени, которая существует за любым типом дифракционного препятствия. Такое проникновение энергии дифрагированного электромагнитного поля является общим правилом для дифракционного препятствия произвольной формы, причем изготовленного из материала как идеально отражающего, так и абсолютно поглощающего падающее на препятствие электромагнитное излучение. Расширение современных представлений о процессах дифракции связано с доказанными Уфимцевым теоремами о теневом контуре. И чем дальше приемное устройство, расположенное за дифракционным препятствием, будет удалено на расстояние L от границ контура препятствия при падении на него электромагнитного излучения, тем все более глубоким становится проникновение дифрагированного электромагнитного поля в область геометрической тени за препятствием. Это положение теории, хорошо согласующееся с результатами нашего лазерного эксперимента, представляет определенный интерес для некоторых важных практических приложений.

В заключение авторы выражают благодарность профессору А. М. Салецкому за помощь, оказанную при выполнении экспериментального исследования.

Список литературы

1. Киселев А.П. // Оптика и спектроскопия. 2007. **102**, № 4. С. 661.

2. Гончаренко А.М. Гауссовы пучки света. 2-е изд. М., 2005.

3. Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 4. С. 69.

4. Зоммерфельд А. Оптика. М., 1953.

5. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. М., 2007.

Diffraction of the Gaussian light beam on edges of the right angle of the plate and the pattern of the interference in the field of the shade

Yu. V. Vasil'ev¹, A. V. Kozar'², A. V. Matyunin^{1,a}

¹Department of General Physics; ²Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^aphysphak@mail.ru.

The circular Gaussian beam of monochromatic laser radiation normally impinges on a plane of a thin metal plate with a right angle and diffracts on edges of a corner of a plate. It is revealed that in the field of a shade behind a plate interfere two basic fragments of the composite diffracted wave, with the cylindrical wavefronts which axes are crossly orthogonal. It is found by the characteristic view of an interference pattern on the flat screen behind the plate. Interference pattern consists of the intensive, curvilinear, wedge-shaped strips symmetrized in pairs concerning a bisector of a direct central corner of circular sector of a shade.

Keywords: edge diffraction, interference in the field of the shade.

PACS: 42.25.-p.

Received 20 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2010).

Сведения об авторах

1. Васильев Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-42-08.

2. Козарь Анатолий Викторович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-55-16.

3. Матюнин Андрей Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр.; тел.: (495) 939-41-88, e-mail: physphak@mail.ru.