

07

Вторичная дифракция излучения дифрагированного гауссова пучка

© Ю.В. Васильев, А.В. Козарь, А.В. Матюнин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: physphak@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2011 г.

Узкий гауссов пучок лазерного излучения дифрагирует на взаимно перпендикулярных острых краях пары лезвий, наложенных одно на другое в скрещенном положении. На плоском экране за парой лезвий видна дифракционная картина. В центре картины — очень яркое световое пятно со структурой некоторой „световой сетки“ с прямоугольными ячейками. От световой сетки расходятся к периферии картины четырьмя группами узкие световые полосы, формируя изображение прямоугольного креста. Можно управлять пространственной частотой модуляции светового поля на экране, изменяя расстояние от экрана до пары лезвий.

Остронаправленное электромагнитное излучение, дифрагирующее на конечных структурах, стало широко использоваться с середины прошлого века. Практические потребности локации способствовали быстрому развитию метода геометрической оптики на базе уравнений Максвелла и ряда эффективных методов асимптотической теории дифракции, в которых полагают, что реальный край металлического препятствия и ближайшая к нему область пространства играют основную роль в дифракционном рассеянии излучения. В этих методах принято считать, что рассеянное электромагнитное поле является локально плоским и распространяется от края препятствия вдоль лучей, которые в пространстве перпендикулярны к соответствующей поверхности эйконала.

Обобщение принципа Ферма в геометрической теории дифракции Келлера [1,2] (ГТД) позволило использовать представление о дифракционных лучах и лучевых трубках. Обмена энергии между лучевыми трубками в ГТД не предполагается. Поэтому в ГТД при анализе эйконала за полубесконечным препятствием, на которое нормально падает плоская волна, обнаружилась принципиальная трудность вблизи

границы геометрической тени [3]. Для ее устранения потребовалось учесть обмен энергией между соседними лучевыми трубками. Это стало возможным после разработки в 1944–1946 гг. [4,5] метода параболического уравнения Леонтовича–Фока (МПУ), который теперь широко используется при теоретическом описании свойств лазерных пучков [6]. Малюжинец [7,8] на основе МПУ теоретически исследовал процессы обмена энергией между смежными лучевыми трубками вблизи границы геометрической тени (здесь лучевые амплитуды в смежных лучевых трубках существенно разнятся). Малюжинец в этом случае предложил использовать для описания обмена энергией в смежных лучевых трубках новый научный термин — „поперечная диффузия лучевой амплитуды“. В работах [9,10] экспериментально исследованы в параксиальной области пространства особенности процесса поперечной диффузии лучевой амплитуды при дифракции на остром крае лезвия лагеровых пучков лазерного излучения.

Как в ГТД, так и в методе краевых волн в физической теории дифракции Уфимцева (ФТД) [11] (современное изложение ФТД — в монографии [12]) используется представление о многократной дифракции: возмущение, возникшее на одном крае препятствия от падающей на него волны, рассматривается уже как падающее поле для другого края или ребра тела. Известно, что „аналогичная процедура для теории Кирхгофа невозможна“ [13].

Уфимцев [12] на основе МПУ теоретически показал, что за дифракционное рассеяние излучения вперед при краевой дифракции плоской электромагнитной волны на полубесконечном металлическом препятствии со стелс-покрытием ответственна поперечная диффузия. В дифракционном рассеянии излучения вперед краем препятствия без стелс-покрытия принимают участие и другие механизмы, создавая при этом так называемый „дифракционный фон“. В настоящее время для некоторых приложений возникла потребность исследовать дифракцию электромагнитного излучения на группе из двух и более металлических тел, с самой различной ориентацией их краев.

Цель данной работы — исследовать развитие трансформаций в высокоинтенсивной части светового поля, распространяющегося вперед при последовательной дифракции узкого, кругового гауссова пучка лазерного излучения на острых краях двух плоских лезвий, которые плотно наложены одно на другое в скрещенном положении.

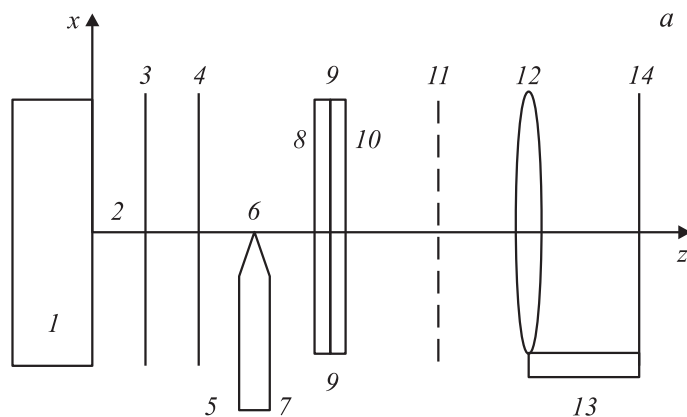


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема эксперимента. *a*: 1 — лазер, 2 — ось кругового гауссова пучка лазерного излучения, 3 — набор светофильтров, 4 — механический затвор, 5 — передняя, освещаемая сторона стальной пластины фрагмента первого лезвия безопасной бритвы, 6 — клиновидно заостренный край лезвия, 7 — задняя, неосвещенная сторона первого лезвия, 8 — передняя сторона второго лезвия группы, 9 — линия острого края второго лезвия, 10 — задняя, неосвещенная сторона второго лезвия, 11 — подвижный, съемный экран на столе голографической установки, 12 — тонкая линза на переднем конце подвижного оптического рельса, 13 — подвижный оптический рельс на столе голографической установки, 14 — фотографическая рамка на заднем конце подвижного оптического рельса. *b*: вид со стороны экрана 11 на группу препятствий из двух плоских лезвий, плотно наложенных одно на другое в скрещенном положении.

Принципиальная оптическая схема эксперимента на голографической измерительной установке УИГ-22М с аргоновым лазером типа ЛГН-503 показана на рис. 1, *a*. Лазер 1 непрерывно генерирует круговой гауссов пучок монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 514.5 \text{ nm}$ и с эффективным радиусом 1.25 mm. Ось 2 лазерного пучка совмещена в плоскости рисунка с осью z правой декартовой системы координат xuz . Электрический вектор линейно поляризованной лазерной волны колеблется вдоль оси x . Ось x лежит в плоскости рисунка, а ось y перпендикулярна к ней. Интенсивность пучка лазерного излучения ослабляется набором светофильтров 3.

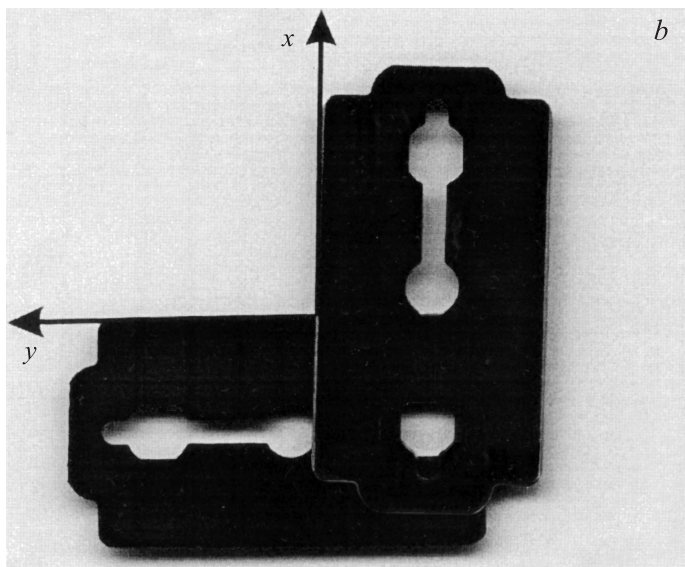


Рис. 1 (продолжение).

Механический затвор 4 управляет длительностью освещения лазером острых краев пары плоских лезвий безопасной бритвы. Длина лезвия 43 мм, ширина 22 мм и толщина 0.1 мм. Плоскости лезвий (рис. 1, *b*) параллельны координатной плоскости xu . Лезвия в скрещенном положении наложены одно на другое, но на рис. 1, *a* они для удобства зрительного восприятия условно показаны как бы раздвинутыми вдоль оси z . Падающий пучок освещает переднюю сторону 5 пластины первого лезвия и ее прямой острый край 6. Острие края 6 параллельно оси y и совмещено с диаметром гауссова пучка. В эксперименте теневая сторона 7 первого лезвия совмещена с нижней частью передней стороны 8 второго лезвия. Средняя линия 9–9 соответствует прямолинейному острию второго лезвия. Острие второго лезвия параллельно оси x и касается оси z на расстоянии 0.1 мм от острия первого лезвия. На столе голографической установки, за теневой стороной 10 второго лезвия, располагается подвижный плоский экран 11, на котором визуально наблюдаем дифракционную оптическую

картину. На столе голографической установки максимальное удаление экрана от пары лезвий составляет 200 см.

На экране *11*, удаленном на расстояние 200 см, видна дифракционная картина с очень ярким, центральным световым пятном, к которому примыкают четыре „световых крыла“. Последние формируют на экране прямоугольный крест, в котором средняя освещенность экрана монотонно убывает с продвижением к периферии креста, вдоль координатных осей x и y . Каждое световое крыло состоит из узких, длинных полосок света зеленого цвета, расходящихся от центрального пятна в виде параллельных стратов. Эти световые страты напоминают „световые нити“, из которых как бы соткана в центральном световом пятне картины „световая сетка“, в прямоугольных ячейках которой освещенность экрана весьма мала. Экспериментально обнаруженная световая сетка и стратификация четырех световых крыльев крестообразной дифракционной картины показывают, что вторичная дифракция гауссова пучка на группе лезвий со скрещенными краями приводит к формированию на экране качественно новой оптической картины. Она существенно отличается от картины [14], которая наблюдается при первичной дифракции гауссова пучка лазерного излучения на одном крае лезвия.

Для исследования в деталях причины формирования световой сетки и крестообразной дифракционной картины на столе установки заменяем экран *11* вспомогательной оптической системой. Она состоит из тонкой собирающей линзы *12* с фокусным расстоянием $f = 7$ см на переднем конце подвижного оптического рельса *13* длиной 150 см и фотографической рамки *14* с входным окном 9×12 см на заднем конце рельса. На листе контрастной фотобумаги в рамке *14* формируется перевернутое и двадцатикратно увеличенное изображение распределения освещенности, которое соответствует световому полю в передней сопряженной плоскости оптической системы (на расстоянии около 3.5 мм перед передней фокальной плоскостью линзы). После освещения дифрагированным лазерным излучением фотобумаги и проявления листа на нем возникает негативное (черное) изображение только тех участков светового поля из передней сопряженной плоскости, в которых интенсивность поля превышает пороговое значение.

На рис. 2, *a* показано, что свободно распространяющийся гауссов пучок, на пути которого нет лезвий, формирует на листе фотобумаги

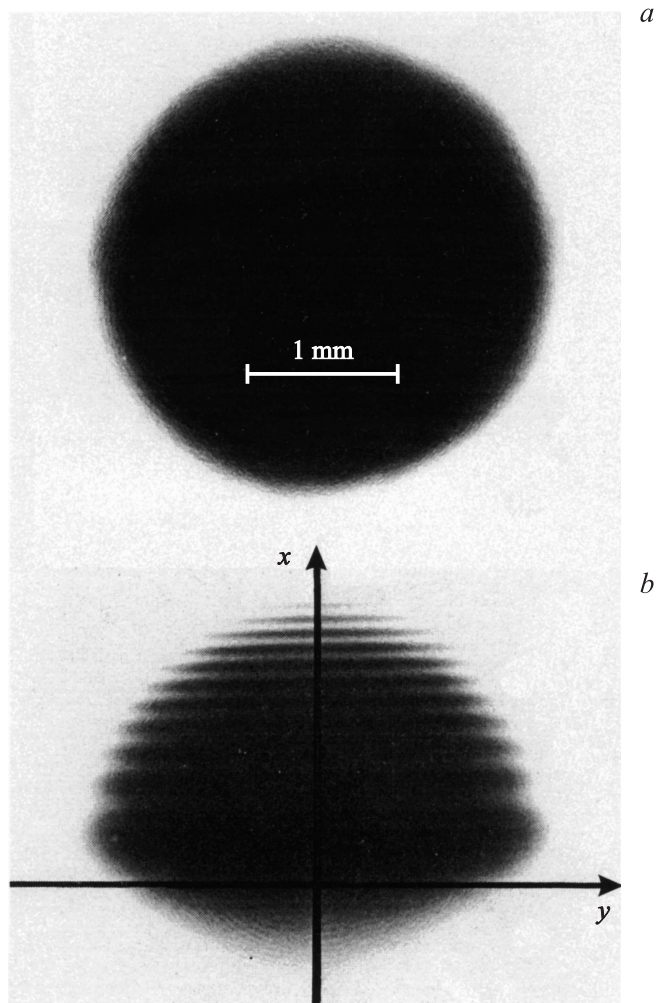


Рис. 2. Примеры зарегистрированного на листе фотобумаги негативного изображения распределения высокоинтенсивной части светового поля: *a* — в плоскости поперечного сечения кругового гауссова пучка, *b* — в плоскости на расстоянии $L = 30$ см за одним первым лезвием.

ограниченный след. Согласно классическим представлениям геометрической оптики, при установке на пути распространения лазерного пучка только первого лезвия, за ним в свободном пространстве может распространяться незатененная половина кругового гауссова пучка („полупучок“). Но опыт показывает, что при распространении светового поля за лезвием на расстоянии 30 см глаз наблюдателя на листе бумаги в фотографической рамке *14* видит иную картину. В центре увеличенной картины — крупное, очень яркое световое пятно, от которого вверх и вниз расходятся два слабоинтенсивных „световых крыла“. Согласно современным представлениям электромагнитной теории [15], вдали от границы геометрической тени слабоинтенсивная составляющая дифрагированного светового поля обязана своим существованием дифракционными лучам Келлера.

Наш эксперимент с фотографической регистрацией негативного изображения позволил зарегистрировать на контрастной фотобумаге (в режиме „недодержки“ для дифракционных лучей Келлера) картину, на которой видно только изображение высокоинтенсивной части поля дифрагированного гауссова пучка (рис. 2, *b*). Изображение демонстрирует, что в параксиальной области пространства, поперечный размер которой определен диаметром лазерного пучка, вследствие первичной дифракции, во-первых, вблизи границы геометрической тени имеет место гладкое проникновение высокоинтенсивного светового поля в область геометрической тени ($x < 0$). Во-вторых, в „освещенной“ области пространства ($x > 0$) интенсивность $I(x, y)$ „полупучка“ дополнительно пространственно промодулирована. На поверхности интенсивности $I(x, y)$ обнаруживается существование двух семейств кривых линий, состоящих из точек гладких локальных максимумов (гребней) и гладких локальных минимумов (впадин) интенсивности. Здесь реальным физическим источником появления очень мощной краевой дифракционной волны, которая пространственно модулирует интенсивность „полупучка“ в освещенной части параксиальной области пространства, является не само острие лезвия, а сильно градиентный край распространяющегося вперед лазерного „полупучка“. Именно от этого градиентного края происходит поперечная диффузия комплексной амплитуды по цилиндрическим волновым фронтам, которые как бы расходятся от острого края лезвия. В затененной части параксиальной области пространства подобная модуляция, естественно, не наблюдается.

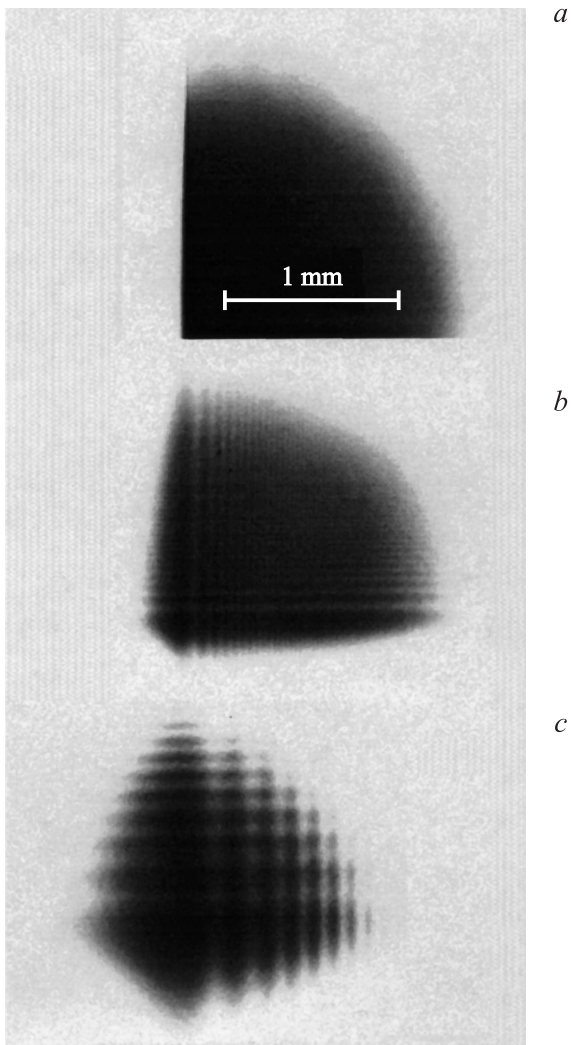


Рис. 3. Примеры зарегистрированного на листе фотобумаги негативного изображения распределения высокоинтенсивной части светового поля в плоскости за группой дифракционных препятствий при удалении от линии острия заднего лезвия на различные расстояния L : a — $L = 0$ см, b — $L = 3$ см, c — $L = 30$ см.

Дополнительным экспериментальным подтверждением такого положения дел вблизи границы геометрической тени служат результаты, полученные при вторичной дифракции излучения дифрагированного гауссова пучка на остром крае второго, скрещенного лезвия. На рис. 3, *a* показано, что в плоскости острого края заднего лезвия зарегистрировано существование фрагмента лазерного пучка, негативное изображение которого на плоскости (x, y) листа фотобумаги напоминает одну четверть черного круга. Фотографическая регистрация трансформаций только высокоинтенсивной части дифрагированного светового поля лазерного пучка за плоскостью заднего лезвия на расстоянии $L = 3$ см (3, *b*) и на расстоянии $L = 30$ см (3, *c*) показывает, во-первых, возникновение в „освещенной“ параксиальной области пространства сложной структуры с пространственной модуляцией поверхности интенсивности $I(x, y)$. Устройство этой структуры напоминает некоторую сетку с прямоугольными ячейками. Во-вторых, в двух областях геометрического затенения, из лазерной световой сетки как бы выходят ее продолжениями, „световыми нитями“, два семейства параллельных гребней интенсивности I . Протяженность этих горизонтальных и вертикальных гребней убывает с удалением от оси z . В-третьих, обнаружено гладкое проникновение высокоинтенсивного светового поля внутрь области последовательного затенения исходного лазерного пучка двумя лезвиями. В этой области на фотоснимке не видно никаких намеков на формирование каких-либо интерференционных картин. Все описанное есть результат поперечной диффузии лучевой амплитуды при вторичной дифракции излучения дифрагированного гауссова пучка, происходящей на краю второго лезвия.

Сравнение вида картин на рис. 3, *b* и 3, *c* показывает, что пространственной частотой модулированного высокоинтенсивного светового поля дифрагированного излучения можно управлять изменением расстояния от группы скрещенных лезвий до экрана.

Список литературы

- [1] Keller J.B. // J. Appl. Phys. 1957. V. 28. N 4. P. 426–444.
- [2] Keller J.B. // J. Opt. Soc. Am. 1962. V. 52. N 2. P. 116–130.
- [3] Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 248 с.
- [4] Леонтович М.А. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1944. Т. 8. № 1. С. 16–22.

- [5] *Леонтович М.А., Фок В.А.* // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. № 7. С. 557–573.
- [6] *Гончаренко А.М.* Гауссовы пучки света. Изд. 2-е. М.: КомКнига, 2005. 144 с.
- [7] *Маложинец Г.Д.* // УФН. 1959. Т. 69. № 2. С. 321–334.
- [8] *Маложинец Г.Д.* // Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1960. Т. 1. С. 606–609.
- [9] *Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е., Селиверстов А.В.* // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 5. С. 57–58.
- [10] *Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е., Кувишинов Д.А., Селиверстов А.В.* // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2008. № 4. С. 59–61.
- [11] *Уфимцев П.Я.* Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Сов. радио, 1962. 244 с.
- [12] *Уфимцев П.Я.* Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 366 с. (*Ufimtsev P.Ya.* Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics. Encino. California: Tech Sciences Press, 2003).
- [13] *Нефёдов Е.И., Фиалковский А.Т.* Асимптотическая теория дифракции электромагнитных волн на конечных структурах. М.: Наука, 1972. 204 с.
- [14] *Васильев Ю.В., Козарь А.В., Лукьянов А.Е.* // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 4. С. 69–71.
- [15] *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1970. 520 с.