

Наблюдение дифракционной многофокальной фокусировки излучения

Р.Р.Летфуллин, О.А.Заякин

Экспериментально показано, что если в дифракционное поле, образованное первой открытой зоной Френеля при дифракции плоской электромагнитной волны на экране с отверстием, поместить параллельно первому второй плоский экран с осевым отверстием меньшего диаметра, то в ближней зоне второго экрана наблюдается дифракционная многофокальная фокусировка излучения. При этом дифракционная картина в ближней зоне второго экрана в фокальных плоскостях представляет собой круговые нелокализованные полосы Френеля с ярким узким пиком в центре, интенсивность которого в 6–10 раз превышает интенсивность падающей волны.

Ключевые слова: дифракция волны, дифракционная фокусировка излучения, двухкомпонентная дифракционная система.

1. Введение

Дифракция электромагнитной волны на круглом отверстии в плоском экране достаточно хорошо описывается классической теорией дифракции Френеля – Кирхгофа [1], которая дает точное решение для двух предельных случаев – дифракции Фраунгофера и дифракции Френеля. В первом случае зависимость фазы волны от радиус-вектора, определяющего положение элементарного вторичного источника света, линейна, что определяет дифракционную картину в дальней зоне. В случае дифракции Френеля разложение фазы обычно обрывается на члене второй степени, описывающем дифракционное поле в ближней зоне. В экспериментальной оптике чаще используется простой случай дифракции Фраунгофера, когда на больших расстояниях от диафрагмы в отверстие укладывается небольшая часть первой зоны Френеля. При этом все колебания совершаются в плоскости отверстия и приходят в точку наблюдения практически в одинаковых фазах.

Однако интересен случай, когда в геометрических пределах отверстия укладывается вся первая зона Френеля или ее значительная часть. Тогда, как известно, наблюдается дифракционная фокусировка излучения в ближней зоне с максимальной пиковой интенсивностью, в 4 раза превышающей интенсивность начальной падающей волны I_0 при открытой первой зоне Френеля. В работах [2, 3] было предложено в дифракционное поле, образованное первой открытой зоной дифракции Френеля от экрана с отверстием, поместить параллельно первому второй плоский экран с осевым отверстием меньшего диаметра (рис. 1). В этом случае теоретически была возможна дальнейшая фокусировка излучения с многократным возрастанием пиковой интенсивности.

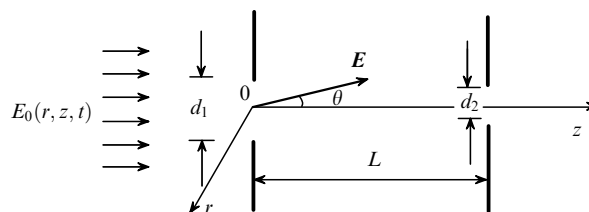


Рис.1. Геометрия задачи о дифракции плоской волны на двухкомпонентной дифракционной системе (L – расстояние на оптической оси между экранами с круглыми отверстиями заданных диаметров d_1 и d_2).

Дифракционная картина от второго экрана в фокальных плоскостях представляла собой круговые нелокализованные полосы Френеля с ярким узким пиком в центре, интенсивность которого в 6–10 раз превышала интенсивность падающей волны. Это оптическое явление было названо дифракционной многофокальной фокусировкой излучения (ДМФИ), а оптическая система из двух плоских экранов с осевыми отверстиями разных диаметров, выставленных на строго заданном расстоянии друг от друга, получила название двухкомпонентной дифракционной системы.

Из выполненных расчетов [2, 3] следовало, кроме того, что ДМФИ наблюдается в широких диапазонах длин волн $\lambda = 0.4 - 10^3$ мкм и диаметров входных диафрагм $d_1 = 2d_2 = (25 - 1000)\lambda$, а также устойчива к смене среды распространения волны. При больших диаметрах входных отверстий $d_1 = 2d_2 > 100\lambda$, а также для длин волн радиочастотной области спектра такая двухкомпонентная дифракционная система действует подобно длиннофокусной линзе, осуществляющей фокусировку излучения на относительно больших расстояниях $z = 1 - 50$ см от выходной апертуры.

Основной целью настоящей работы является экспериментальная проверка выводов теоретических исследований о возможности ДМФИ на двухкомпонентной дифракционной системе. ДМФИ, позволяющая осуществлять дифракционную фокусировку пучка без использования традиционных рефракционных элементов типа

Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; эл. почта: laser@fian.samara.ru

Поступила в редакцию 24 мая 2000 г., после доработки – 16 ноября 2000 г.

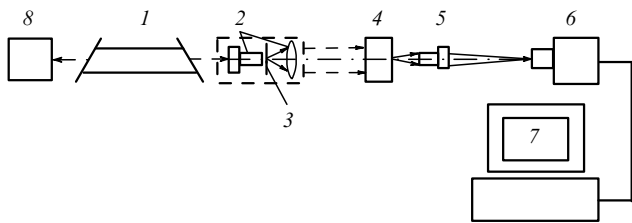


Рис.2. Схема экспериментальной установки для обнаружения оптической ДМФИ:

1 – He–Ne-лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – пространственный фильтр; 4 – исследуемая система диафрагм; 5 – микрообъектив; 6 – линейка ПЗС-фотоприемников; 7 – компьютер; 8 – фотодиодный измеритель мощности.

линз, призм и т. п., может найти применение в оптике, например для исправления и преобразования пространственных характеристик излучения инжекционных полупроводниковых лазеров с широким полосковым контактом (~ 100 мкм), и в атомной физике, например для фокусировки атомарных и молекулярных пучков, которые, как известно, проявляют волновые свойства.

2. Эксперимент

Для наблюдения ДМФИ плоской электромагнитной волны на двухапертурной дифракционной системе был поставлен эксперимент, схема которого показана на рис. 2. Излучение от He–Ne-лазера 1 проходило через расширитель 2 с пространственным фильтром 3 и попадало на исследуемую систему диафрагм 4. Микрообъектив 5 строил оптическое изображение дифракционной картины на линейке ПЗС-фотоприемников 6, сопряженной с компьютером 7. Мощность выходного излучения лазера контролировалось с помощью фотодиодного измерителя 8.

Согласование плоскости фотоприемника 6 и предметной плоскости в зоне дифракции исследуемой системы 4 проводилось путем смещения системы 4 вдоль главной оптической оси расширенного коллимированного пучка света.

Приведем параметры составных частей измерительной установки, которые важны, на наш взгляд, при интерпретации экспериментальных результатов. He–Ne-лазер ЛГ-52-1 излучал непрерывный пучок света с длиной волны 0.63 мкм, представлявший собой одну фундаментальную гауссову моду. После расширения пучок света имел диаметр (по уровню $1/e^2$ от интенсивности в максимуме) около 3 см и попадал на двухкомпонентную дифракционную систему.

Исследуемая дифракционная система состояла из двух круглых диафрагм, выполненных из алюминиевой фольги толщиной 20 ± 4 мкм для первого экрана и 10 ± 4 мкм для второго экрана, что во много раз превышает длину волны излучения. Алюминиевая фольга второй диафрагмы была помещена между двумя тонкими стеклянными плоскопараллельными пластинами. Диаметры диафрагм в эксперименте составляли: $d_1 = (365 \pm 10)\lambda$ и $d_2 = (80 \pm 10)\lambda$. На рис.3 представлены фотографии этих диафрагм, на которых видны неровности краев и форм отверстий.

Микрообъектив 5 имел фокусное расстояние 16 мм. В фотоприемном устройстве 6 была использована линейка фоточувствительных ПЗС типа K1200ЦЛ1 [4]. Эта мик-

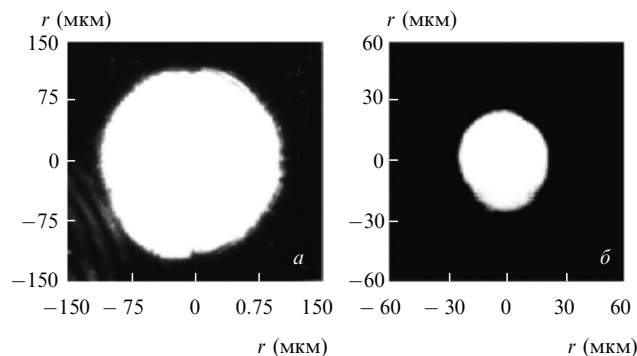


Рис.3. Фотографии исследуемых диафрагм с диаметрами $d_1 = (365 \pm 10)\lambda$ (a) и $d_2 = (80 \pm 10)\lambda$ (б).

росхема имела 1024 фоточувствительных элемента, расположенных в линию, каждый из которых имел длину 15 мкм. Согласно справочным данным [4], чувствительность микросхемы составляла 2.5 мВ/лк, динамический диапазон по напряжению – 60 дБ. По тем же данным разные фоточувствительные элементы микросхемы различаются по чувствительности на $\sim 8\%$ и по уровню шума – на $\sim 4\%$. В наших экспериментах измерения проводились на линейном участке зависимости напряжения на выходе ПЗС-фотоприемника от освещенности.

Показания сигналов с обоих фотоприемных устройств, снятые в каждой точке сканирования, обрабатывались на ЭВМ и представлялись в виде одномерных распределений интенсивности дифракционных волн, отнесенной к усредненной интенсивности входной волны.

3. Обсуждение результатов

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялась отладка экспериментальной установки и определялись погрешности измерений при регистрации хорошо известной дифракционной картины, получаемой от одного круглого отверстия в зоне Френеля. На втором этапе в дифракционное поле от первого отверстия, образованное одной зоной Френеля, помещался второй плоский экран с круглым отверстием меньшего диаметра. Результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов представлены на рис.4, 5.

Наличие острых максимумов на краях поперечного распределения интенсивности волны, прошедшей сквозь первую диафрагму с диаметром отверстия $d_1 = (365 \pm 10)\lambda$ и толщиной стенок 20 ± 4 мкм $\gg \lambda$ (рис.4,a), объясняется неизбежной дифракцией волны на внутренних стенках отверстия. То, что профиль в распределении интенсивности плоскопараллельного пучка выглядит таким изрезанным и неравномерным, можно объяснить интерференцией падающего излучения с волнами, отраженными от поверхности фоточувствительных элементов ПЗС-фотоприемника и его защитного стекла. На рис.4,a сплошной линией показан теоретический расчет средней интенсивности входной волны, относительно которой проводились сравнения всех последующих распределений интенсивностей дифракционных полей, полученных как от первого, так и от второго экрана.

Дифракция входной волны (рис.4,a) на первом отверстии в ближней зоне определяется открытыми зонами Френеля. На расстоянии $z = L = d_1^2/4\lambda$ от первого экрана в отверстии укладывается одна первая зона Френеля с

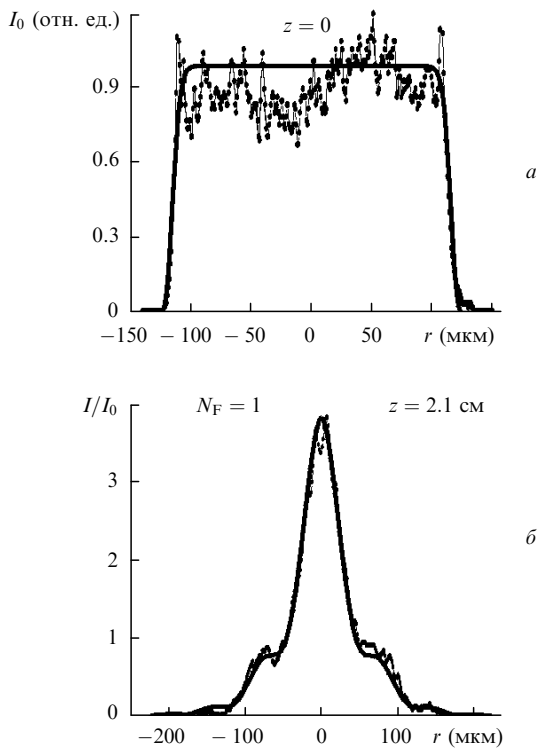


Рис.4. Распределения интенсивности плоской волны, прошедшей сквозь первую диафрагму с круглым отверстием диаметром $d_1 = (365 \pm 10)\lambda$ (а), и дифракционного поля, сформированного первой открытой зоной Френеля при дифракции прошедшей волны на этом отверстии (б). Сплошные кривые – теоретический расчет, кривые с точками – эксперимент.

максимальной интенсивностью $I = 4I_0$ в центре дифракционной картины (рис.4,б).

Помещенная в точку $z = L = 2.1$ см вторая диафрагма с диаметром отверстия $d_2 = (80 \pm 10)\lambda$ вырезает центральную часть в дифракционной картине, сформированной первым отверстием при одной открытой зоне Френеля (см. рис.5,а). Дифракция этой волны на втором отверстии показана на фотографии (см. рис.5,б), которая подтвердила вывод теории о том, что качественная картина дифракции плоской волны на двухапертурной системе подобна френелевской – наблюдается пять открытых зон Френеля с ярким узким пиком в центре. Дальнейшее распространение волны сопровождается падением пиковой интенсивности до некоторого минимума (темный центр дифракционной картины), что соответствует дифракционной картине при четном числе открытых зон Френеля $N_F = 4$ (см. рис.5,в). На расстоянии от второго экрана $z - L = 0.33$ мм дифракционная волна вновь фокусируется в центре (рис.5,з) с максимальной интенсивностью, превышающей в 6.5 раза в эксперименте (и в 8.5 раза в теории) интенсивность начальной падающей волны I_0 . При этом качественная картина распределения дифракционного поля аналогична дифракционной картине, формируемой тремя открытыми зонами Френеля. И наконец, в точке $z - L = 1.0$ мм открывается первая зона Френеля с максимальной дифракционной фокусировкой излучения, интенсивность которого в фокусе превышает в 10 раз в эксперименте (и в 11 раз в теории) интенсивность начальной волны I_0 на входе в оптическую систему (рис.5,е).

Таким образом, в ближней зоне второго экрана наблюдается качественная картина дифракции Френеля,

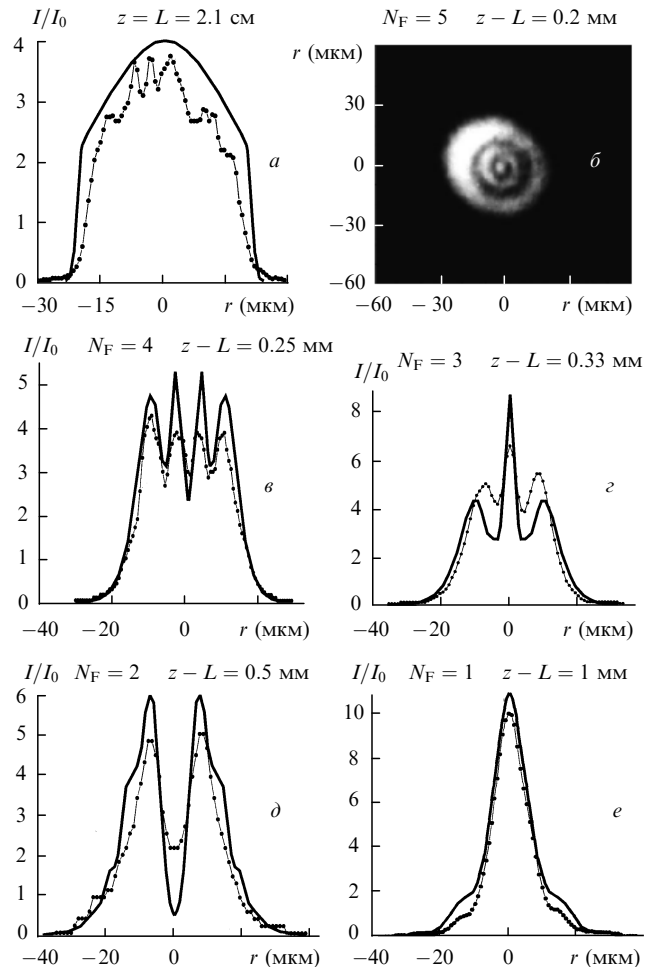


Рис.5. Дифракционная фокусировка плоской волны на двухкомпонентной дифракционной системе (диаметры отверстий $d_1 = (365 \pm 10)\lambda$ и $d_2 = (80 \pm 10)\lambda$): непосредственно на втором отверстии (а) и на разных расстояниях z от него (в–е), а также фотография дифракционной картины (б). Сплошные кривые – теоретический расчет, кривые с точками – эксперимент.

которая сопровождается многофокальной фокусировкой и еще большим увеличением первоначальной интенсивности волны при открытых нечетных зонах Френеля. Это и есть ДМФИ, наблюдаемая на двухкомпонентной дифракционной системе с малыми числами Френеля.

В табл.1 приведены расчетные абсолютные значения систематической и случайной составляющих и суммарной погрешности, а также статистическая оценка суммарной погрешности. Погрешности для каждой картины дифракции интегрально усреднены по действующей апертуре ПЗС-фотоприемника и приведены к средней интенсивности по этой апертуре. При статистической оценке погрешности перед усреднением определялось среднеквадратическое отклонение в каждой точке экспериментальных профилей интенсивности света.

Расчеты показали, что наибольший вклад в суммарную погрешность вносят погрешности из-за ограниченной пространственной разрешающей способности микрообъектива, интерференции на защитном стекле ПЗС-линейки и неэффективности переноса заряда в ней. Из табл.1 следует, что для картины дифракции с числом Френеля $N_F \leq 2$ суммарная погрешность достигала 10%, а для дифракционных картин с более высоким числом Френеля – 15%, что объясняется снижением контрастности картины на верхних пространственных частотах.

Табл.1. Интегрально-усредненные по апертуре систематическая, случайная и суммарная погрешности, а также статистическая оценка последней.

Конфигурация оптической системы	Число зон Френеля	Погрешность (%)			
		систематическая	случайная	суммарная	статистическая
Одна диафрагма	1	0.5	5	5	5
	2	1	10	10	5
	3	1.5	10	10	8
	4	3.0	8	10	10
Две диафрагмы	1	5	5	7	5
	2	5	10	10	5
	3	5	8	10	8
	4	7	15	15	10

4. Заключение

Таким образом, наблюдение предсказанной теорией ДМФИ на двухкомпонентной дифракционной системе с малыми числами Френеля показало, что дифракционная картина в фокальных плоскостях такой системы представляет собой круговые нелокализованные полосы Френеля с ярким узким пиком в центре, интенсивность которого в 6.5–10 раз превышает интенсивность падающей волны.

Теоретический расчет, выполненный в рамках квазиоптического приближения для идеально тонкого и проводящего экрана [2, 3], качественно и количественно согласуется с результатами экспериментов, в которых реальные экраны имели конечную толщину, много боль-

шую длины волны излучения. При этом наибольшее совпадение теории с экспериментом наблюдается в максимумах интенсивности дифракционной картины. Эксперименты показали, что дифракция Френеля на реальных объектах, линейный размер которых превышает длину волны излучения, устойчива по отношению к «грубым» внешним граничным условиям (толщине экрана, неровностям края и неидеальности формы отверстия), а также к неоднородности начального распределения интенсивности излучения падающей волны.

1. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М., Наука, 1973).
2. Летфуллин Р.Р. *Препринт ФИАН № 4* (М., 2000).
3. Letfullin R.R., George T.F. *Appl. Optics*, **39**, 2545 (2000).
4. Аксененко М.Д., Баранчиков М.Л. *Применки оптического излучения. Справочник* (М., Радио и связь, 1987).