

А. В. ГНАТОВСКИЙ, А. П. ЛОГИНОВ, Н. В. МЕДВЕДЬ,  
член-корреспондент АН УССР М. Т. ШПАК

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВЫХ МАСОК

В сообщении исследуется возможность расширения области применения фазосдвигающих корректирующих масок [1, 2] для случая формирования лазерных пучков с заданным распределением энергии по сечению. Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Ближняя и дальняя зоны когерентного светового пучка однозначно связаны друг с другом через преобразование Фурье и характеризуются строго определенными распределениями амплитуды и фазы по сечению. Помещая в фурье-плоскость транспарант, сдвигающий по фазе колебания одних участков поля по отношению к другим, эту однозначную связь можно нарушить и тем самым вызвать при обратном преобразовании Фурье перераспределение энергии между некоторыми его участками. Величина такого воздействия может варьироваться в широких пределах, так как она определяется многими факторами: размерами и конфигурацией фазовых участков, глубиной фазового рельефа маски, распределением поля в преобразуемом пучке и др. Кроме того, поскольку такое преобразование происходит за счет дифракции на непоглощающих фазовых структурах, то потери энергии при этом могут быть сведены до минимума.

Наиболее общее решение такой задачи выходит за рамки настоящего сообщения, поэтому мы ограничимся рассмотрением практически важного случая преобразования гауссовых пучков (соответствующих простым поперечным модам конфокального резонатора) в поле с равномерным распределением энергии по сечению.

Приведем пример, качественно объясняющий принципы конструирования необходимых для этого случая фазовых масок. Для этого рассмотрим фурье-образ пучка с круглым сечением и равномерным

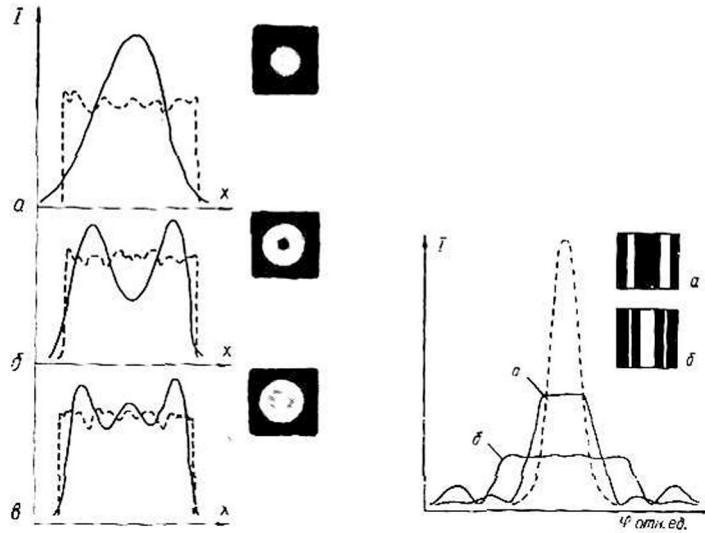


Рис. 1. Изменение прямоугольного распределения интенсивности по сечению пучка (штриховая линия) при выделении диафрагмой в его фурье-плоскости: *a* — центрального пятна диска Эйри; *б* — центрального пятна и первого кольца; *в* — центрального пятна и двух колец.

Рис. 2. Схематический вид одномерных фазовых масок и распределение интенсивности в дальней зоне при дифракции моды  $TEM_{00}$  на этих масках (*a*, *б*). Штриховая линия — гауссовое распределение интенсивности в пучке при отсутствии масок.

распределением интенсивности, имеющий форму диска Эйри [3], в котором выделим диафрагмой центральный участок. После обратного преобразования Фурье этот участок сформирует поле с приведенным на рис. 1, *a* распределением интенсивности (сплошная линия). Если расширить диафрагму и выделить из диска Эйри центральный участок и первое кольцо, то распределение интенсивности в пучке изменится. Это связано с тем, что поля центрального участка и первого кольца находятся в противофазе. В результате их интерференции суммарное поле будет иметь распределение с более крутыми крыльями и провалом в центре (рис. 1, *б*). Если же диафрагмой выделить центральный участок и два кольца, то получим распределение интенсивности с еще более крутыми крыльями и сглаженным провалом в центре картины (рис. 1, *в*), так как поля второго кольца и центрального участка синфазны и т. д. Учитывая сравнительную легкость расчетов, а также простоту изготовления соответствующих фазовых масок, воспользуемся таким принципом наложения участков поля, колеблющихся в противофазе, для решения поставленной задачи. Ниже приведены расчеты фазовых масок для трех гауссовых пучков: одномерных мод  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$  и аксиально-симметричной моды  $TEM_{00}$ .

Рассмотрим случай преобразования одномерной симметричной моды  $TEM_{00}$  с распределением поля по сечению  $E(x) \sim \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ . При

расчете фазовая маска разбивается на некоторое количество полос равной ширины, в пределах которых поле, падающее на эти полосы, можно считать постоянным. Вследствие симметричности моды фазовая маска также должна быть симметрична относительно центра моды. Дифракция на паре полос, симметричных относительно центра моды, аналогична дифракции плоской волны на двух щелях [3]. Поле такой дифракции  $U_i(\varphi)$  в точке  $\varphi$  фурье-плоскости описывается выражением

$$U_i(\varphi) = c_i \frac{\sin A\varphi}{A\varphi} \cos d_i\varphi, \quad (1)$$

где  $d_i$  — половина расстояния между центрами полос,  $A$  — полуширина полосы,  $c_i$  — постоянная, определяемая средней величиной преобразуемого поля, падающего на выделенные полосы.

Дифракция от всей маски рассчитывается как алгебраическая сумма полей дифракции от всех пар полос, на которые была разбита маска. Поле от каждой пары полос будет входить в сумму со знаком «+», если свет, проходя через них, не изменяет фазу, и со знаком «-», если фаза света, прошедшего через эти полосы, изменится на  $\pi$ . Оптимальные параметры маски определялись в процессе перебора различных вариантов суммирования полей от каждой пары полос, на которые была разбита маска. Эти вычисления проводились на ЭВМ, причем в программу вводились жесткие краевые условия, обеспечивающие получение требуемого профиля распределения интенсивности с заданной точностью. Расчеты позволили определить несколько возможных структур фазовых масок, т. е. возможных сочетаний фазовых полос, дифракция гауссового пучка на которых имеет в дальней зоне распределение интенсивности, близкое к прямоугольному. Результаты расчета таких фазовых масок приведены на рис. 2, а их структура схематически изображена в виде сочетания черных и белых полос, причем изменение цвета этих полос соответствует скачку фазы на  $\pi$  света, прошедшего через соседние участки. Для каждой из этих фазовых масок приведено рассчитанное распределение интенсивности по сечению преобразованного пучка.

Структура фазовой маски для преобразования гауссового пучка типа моды  $TEM_{01}$ , имеющего антисимметричное распределение поля  $E(x) \sim x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$ , будет отличаться от предыдущего случая. Эту маску можно разбить на набор таких пар полос, у которых одна из полос имеет скачок фазы на  $\pi$ , а другая нет. Поле дифракции на паре щелей, в одной из которых расположена пластинка, сдвигающая фазу на  $\pi$ , в фурье-плоскости описывается выражением

$$U_i(\varphi) \sim c_i \frac{\sin A\varphi}{A\varphi} \sin d_i\varphi, \quad (2)$$

где обозначения те же, что и в (1). Суммарное дифракционное поле находится при алгебраическом суммировании составляющих  $U_i(\varphi)$ . Возможный вариант такой антисимметричной маски и результат ее действия показан на рис. 3, б. Интересно отметить, что этот результат эквивалентен одновременному действию симметричной маски, описанной выше, и фазовой маски, корректирующей расходямость излучения за счет устранения скачков фазы между модовыми пятнами [1, 2, 4], результат действия которой показан на рис. 3, а. Наконец, применение фазовой маски, состоящей из подходящей комбинации симметричных и антисимметричных пар полос, дает результат, показанный на рис. 3, в. Полученное распределение энергии напоминает сильно деформированную моду  $TEM_{01}$ , у которой энергия в одном из пятен

возросла за счет второго и одновременно приобрела более равномерное распределение.

Аналогично рассчитывались маски для аксиально-симметричных пучков. Так, в случае моды  $TEM_{00}$ , у которой распределение поля имеет вид  $E[(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}] \sim \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right)$ , маска разбивалась на кольцевые зоны таких размеров, чтобы поле в пределах каждой зоны можно было считать

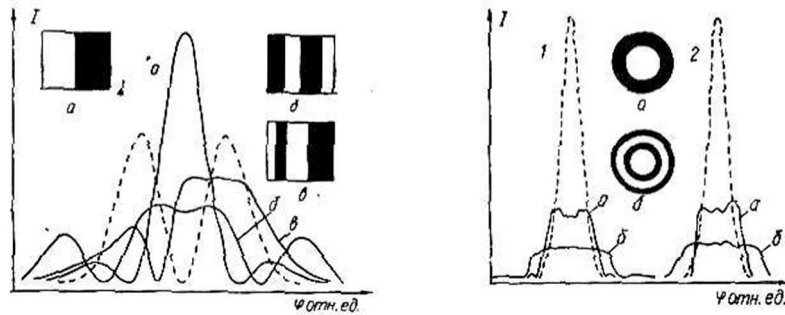


Рис. 3. Схематический вид одномерных фазовых масок и распределение интенсивности в дальней зоне при дифракции на них моды  $TEM_{01}$ . Штриховая линия — распределение интенсивности по сечению пучка при отсутствии масок.

Рис. 4. Распределение интенсивности в дальней зоне при дифракции аксиально-симметричной моды  $TEM_{00}$  на двух различных фазовых масках (а, б):

1 — расчет; 2 — эксперимент.

приблизительно постоянным. Дифракция плоской волны на кольцевом отверстии описывается выражением [3]

$$U_i(\varphi) \sim c_i \pi a_i^2 \left[ \frac{2J_1(a_i \varphi)}{a_i \varphi} \right] - c_i \pi \epsilon^2 a_i^2 \left[ \frac{2J_1(\epsilon a_i \varphi)}{\epsilon a_i \varphi} \right], \quad (3)$$

где  $a_i$  и  $\epsilon a_i$  — радиусы концентрических окружностей, ограничивающих кольцевое отверстие,  $\epsilon$  — некоторое положительное число, меньшее единицы,  $J_1(\varphi)$  — функция Бесселя первого порядка,  $c_i$  — определяет среднюю величину поля в пределах выделенного кольцевого отверстия. Требуемая точность в распределении интенсивности дифракционной картины также обеспечивалась при переборе различных вариантов суммирования дифракционных полей от различных кольцевых структур, составляющих маску. На рис. 4, 1 показаны результаты расчета дифракции на аксиально-симметричных фазовых масках, а также схематический вид этих масок.

Проведенные расчеты были подтверждены экспериментально. Для этого согласно расчетам были изготовлены фазовые маски с бинарной структурой фазы  $(0, \pi)$ . Для изготовления масок черно-белые транспаранты (фотошаблоны) переснимались на фотопленку ФПГВ с уменьшением, обеспечивающим требуемые размеры фазовых участков. Время экспозиции выбиралось таким, чтобы после отбеливания фотопленки соседние участки создавали сдвиг фазы, равный  $\pi$ . Величина сдвига фазы контролировалась двухлучевым интерферометром. Распределение энергии в полученных пучках регистрировалось на самописце с фотоэлектрической приставкой. На рис. 4, 2 приводятся распределения энергии для аксиально-симметричных пучков. Измеренная эффективность преобразования моды  $TEM_{00}$  в пучок с равномерным распределением интенсивности в дальней зоне для используемых ма-

сок составляла  $\sim 60-80\%$  при условии, что из полученного пучка выделяется та его часть, где колебания в распределении энергии по сечению не превышают  $\sim 10-15\%$ .

Простота описанных фазовых масок позволяет сравнительно легко их изготовить методами фотолитографии и прецизионной механической или химической обработки и позволяет рассчитывать на их широкое практическое применение.

Отметим, что рассмотренный подход легко может быть обобщен для синтеза когерентных пучков с другими распределениями энергии по сечению и предполагает использование фазовых масок с несколькими грациями фазы.

#### Литература

1. Гнатовский А. В. Голографический метод коррекции волнового фронта излучения оптических квантовых генераторов. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Киев, 1974.— 22 с.
2. Гнатовский А. В., Селезнёв В. В., Шпак М. Т. Голографический метод уменьшения расходимости излучения ОКГ.— В кн.: Квантовая электроника.— Киев: Наук. думка, 1977, вып. 13, с. 36—53.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.— 720 с.
4. Гнатовский А. В., Зубрилин Н. Г., Логинов А. П. Использование фазовых масок для уменьшения расходимости гауссовых пучков.— УФЖ, 1978, 23, № 12, с. 1961—1964.

Институт физики  
АН УССР

Поступило  
28.VII 1979 г.

A. V. GNATOVSKY, A. P. LOGINOV, N. V. MEDVED,  
M. T. SHPAK, Corr. Member Academy of Sciences, Ukrainian SSR

#### TRANSFORMATION OF SPACE-ANGULAR CHARACTERISTICS OF THE GAUSSIAN BEAMS BY MEANS OF PHASE MASKS

#### Summary

The paper deals with the method to form laser light beams into the beams with required intensity distribution over the section. Its main point consists in utilization of the phase correcting masks. The calculation results of such phase masks for three Gaussian beams: unidimensional modes  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$  and axisymmetric mode  $TEM_{00}$  as well as some experimental results are presented.