

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОРРЕКЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

М.С.Соскин, М.Д.Бондаренко, А.В.Гназовский

Одной из основных проблем квантовой электроники является получение максимальной осевой яркости вынужденного излучения, для чего необходимы близкий к плоскому волновой фронт и однородное амплитудное распределение по сечению пучка. Как известно, этому условию приближенно удовлетворяет лишь нижайший поперечный тип колебаний TEM_{00} , однако он занимает минимальный объем в активной среде. Моды с высокими поперечными индексами обладают существенно большим объемом и позволяют получить большую мощность излучения. При этом, однако, усложняется амплитудная (модовые пятна) и фазовая (скачки фазы на π между соседними пятнами) структура пучков. В результате осевая яркость излучения даже падает по сравнению с модой TEM_{00} .

Представляется заманчивым и практически чрезвычайно важным создание способа преобразования излучения на модах с произвольными поперечными индексами (в общем случае – пучков со сложным нерегулярным фронтом) с минимальными потерями в плоский гауссов пучок¹⁾. Это позволит существенно повысить осевую яркость излучения реальных лазеров, особенно на несовершенных средах.

Принципиальное решение рассматриваемой проблемы может быть получено с помощью голографических принципов, которые позволяют осуществлять амплитудно-фазовые преобразования с когерентными пучками любой сложности. Записывая на голограмме результат ин-

¹⁾ В рамках обычной оптики по сути возможны только компенсация сферической составляющей фазового фронта и выделение соответствующей регулярной части пучка, что сопряжено со значительными потерями.

терференции пучка излучения лазера и когерентной с ним плоской волны и используя на стадии реконструкции для освещения голограммы исходный пучок, мы получим в одном из дифракционных порядков волну с плоским фронтом [1]. В настоящей работе предлагается способ полного амплитудно-фазового преобразования лазерных пучков в пучки с плоским фронтом и гауссовым распределением амплитуды. На примере He-Ne-лазера осуществлена такая коррекция с высокой эффективностью и показано, что она приводит к существенному возрастанию осевой яркости излучения.

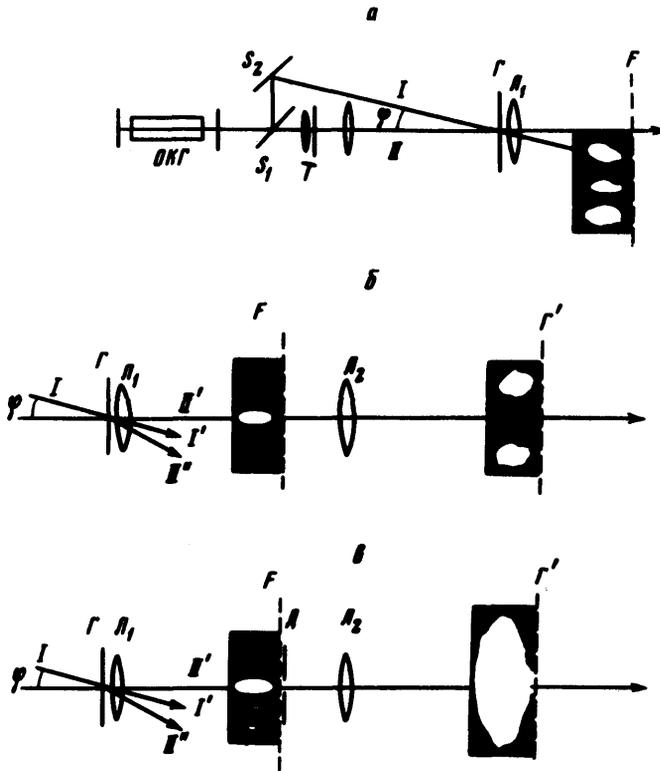


Рис.1. *a* – принципиальная оптическая схема записи, *б* – фазовой, *в* – амплитудно-фазовой коррекции лазерных пучков: Z_1 – полупрозрачное зеркало; Z_2 – зеркало с $R \approx 1$. Картина дальней зоны наблюдается в фокальной плоскости F линзы L_1 , ближней – в плоскости Γ' , сопряженной с плоскостью голограммы линзами L_1 и L_2 . Приведен пример преобразования излучения моды TEM_{02}

Принципиальная оптическая схема метода приведена на рис.1. На фотопластинке Γ (рис. 1, *a*) записывается интерференция лазерного пучка I с распределением в плоскости голограммы $u_1(x) = A_1(x) \exp[i\theta(x)]$ (для простоты рассматривается одномерный случай) и пучка II с плоским волновым фронтом и однородной ам-

плитудой $u_2'(x) = A_2(x) \exp [ikx \sin \phi]$, сформированного из части излучения лазера при помощи телескопа T с диафрагмой в фокальной плоскости. На стадии реконструкции обработанная голограмма помещается в прежнее положение, расщепляющее устройство убирается и все излучение лазера направляется на голограмму (рис.1,б).

Амплитудно-фазовое распределение в главных дифракционных пучках Π' и Π'' непосредственно за голограммой соответственно имеет вид:

$$\begin{aligned} u_2'(x) &= \alpha A_1^2(x) A_2(x) \exp [ikx \sin \phi], \\ u_2''(x) &= \beta A_1^2(x) A_2(x) \exp [i(2\theta - kx \sin \phi)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты α и β определяются свойствами регистрирующей среды, условиями облучения и последующей обработки.

Из (1) следует, что пучок Π' , совпадающий по направлению с пучком Π , имеет плоский фронт, а в пучке Π'' , составляющем угол $-\phi$ с пучком Π' все фазовые неоднородности удваиваются. Последнее означает, что все модовые скачки фаз становятся кратными 2π , т.е. исчезают. Остается лишь общая кривизна волнового фронта, которая также удваивается. Исключая ее с помощью корректирующей линзы, и в случае пучка Π получим плоский волновой фронт (очевидно, что сказанное выше относится и ко всем другим нечетным порядкам).

Согласно (1) коррекции по схеме рис.1,б не является полной, так как амплитудная структура восстановленных пучков остается сложной. Как известно, дальняя зона таких пучков наряду с главным корреляционным, соответствующим гауссову пучку с плоским фронтом, содержит добавочные пики меньшей яркости. Устранение последних с помощью, например, оптической системы с диафрагмой D в фокальной плоскости (рис.1,в) и будет соответствовать полному амплитудно-фазовому преобразованию лазерного пучка¹⁾.

Экспериментальное осуществление коррекции проводилось по схеме рис.1, которая собиралась на оптической скамье ОСК-3. Источником излучения служил He - Ne лазер ЛГ-75. Устойчивая генерация на изолированных поперечных модах достигалась с помощью малых разъюстировок резонатора. Угол интерференции $\phi = 2 \div 5^\circ$, что позволяло использовать фотоматериалы с разрешающей способностью до 300 штрих/мм. Фотоленка обрабатывалась стандартным проявителем Д-19 и кислым фиксажем. Для повышения эффективности преобразования голограмма отбеливалась 1,5-процентным раствором красной кровяной соли. Восстановление положения голограммы на стадии реконструкции обеспечивалось специальным держателем.

¹⁾ Операцию амплитудной коррекции можно осуществить также голографически, используя для записи голограммы дальние зоны преобразованного по фазе пучка и пучка Π .

На рис.2 приведено распределение энергии в дальней зоне пучка Π' для моды TEM_{02} до и после коррекции фазы. Главный максимум исправленного пучка содержит $\sim 75\%$ всей энергии и обладает расходимостью в ~ 4 раза меньшей, чем исходный пучок. Амплитудная коррекция по схеме рис.1,б завершила преобразование сложного пучка в гауссов пучок с плоским фронтом (рис.3). Аналогичные результаты были получены для пучка Π'' при исключении сферической составляющей исправленного фронта.

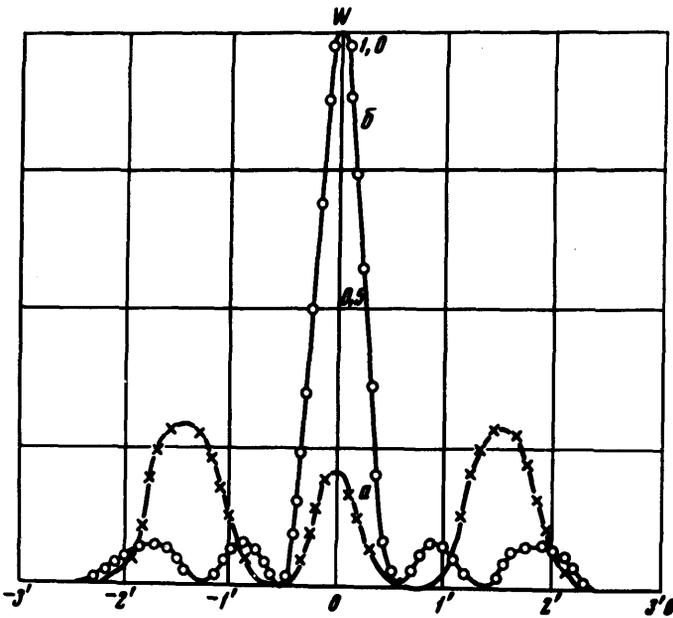
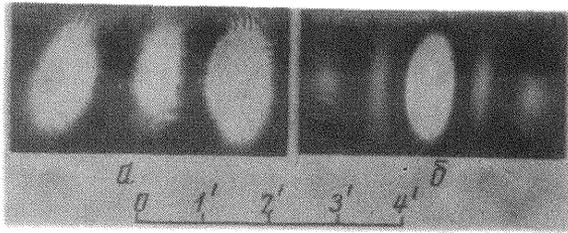


Рис.2. Дальняя зона моды TEM_{02} (а – до фазовой коррекции и б – после нее) и соответствующие фотометрические кривые, нормированные к одинаковой энергии

Наиболее прямым показателем эффективности методов коррекции пучков может служить коэффициент увеличения осевой яркости

$$\eta = \left(\frac{\Delta W}{W} \right)_{\text{испр}} / \left(\frac{\Delta W}{W} \right)_{\text{исх}}$$

где $(\Delta W/W)_{\text{испр}}$ и $(\Delta W/W)_{\text{исх}}$ — доля энергии исправленного и исходного пучков, идущая в заданный телесный угол. Для моды TEM_{02} амплитудно-фазовая коррекция привела в пределах главного максимума углового распределения к увеличению осевой яркости более чем в 4 раза. С ростом поперечных индексов η возрастает еще больше, причем для двумерных мод как произведение соответствующих одномерных коэффициентов. Поэтому даже при сравнительно невысокой эффективности голограммы (в описанных опытах она составляла $\sim 30\%$) метод представляет практический интерес.

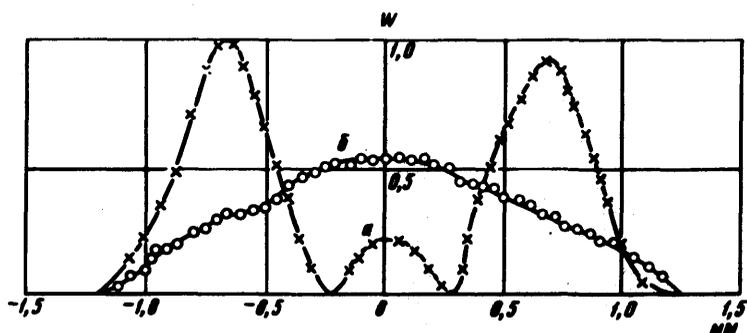
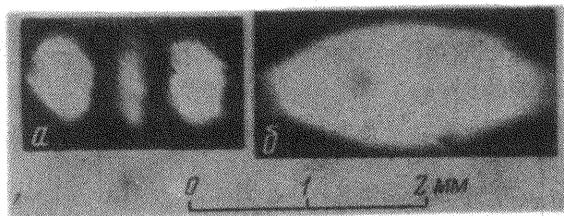


Рис.3. Ближняя зона моды TEM_{02} (а — до амплитудно-фазовой коррекции и б — после нее) и соответствующие фотометрические кривые с учетом того, что площадь под кривой б составляет $\sim 75\%$ от площади под кривой а

В заключение остановимся на возможных энергетических коэффициентах преобразования и перспективах развития метода. Использование толстослойных фазовых голограмм [2] либо голографических решеток с заданным профилем штрихов [3,4] позволяет получить 100-процентное преобразование лазерного пучка в один дифракционный порядок. Для целей голографии, в частности, полезным окажется создание решеток, преобразующих исходный пучок в два пучка первого порядка, т.е. играющих роль не только корректора, но и расщепителя пучков. В случае импульсных лазеров наиболее перспективно создание динамических корректоров на нелинейных средах. Наконец, интересные

результаты должно дать помещение голограммы в резонатор [5], так как при этом она будет одновременно служить и фазовым корректором и дисперсионным элементом генераторах с перестраиваемой частотой.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.М.Прохорову и участникам семинара за полезные обсуждения.

Институт физики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 мая 1971 г.

Литература

- [1] М.Д.Бондаренко, А.В.Гнатовский. ДАН СССР, 187, 538, 1969.
 - [2] H.Kogelnik. *Microwaves*, Nov.1967, p. 68.
 - [3] N.K.Sheridan. *Appl. Phys. Lett.*, 12, 316, 1968.
 - [4] O.Briugdahl. *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 140, 1970.
 - [5] М.Д.Бондаренко, А.В.Гнатовский, М.С.Соскин. *Укр. физ.ж.*, 14, 1930, 1969.
-