

07

## Конверсия пучков Эрмита–Гаусса и Лагерра–Гаусса в астигматичной оптической системе: 1 эксперимент

© А.Н. Алексеев, К.Н. Алексеев, О.С. Бородавка,  
А.В. Воляр, Ю.А. Фридман

Симферопольский государственный университет

Поступило в Редакцию 26 января 1998 г.

Экспериментально проанализировано действие модового конвертера, обеспечивающего энергетически эффективное преобразование пучка Эрмита–Гаусса в пучок Лагерра–Гаусса и наоборот. Данный конвертер представляет собой астигматичный фурье-преобразователь, состоящий из системы двух цилиндрических линз с перпендикулярными главными плоскостями, помещенными между двумя сферическими линзами. Показано, что данное устройство обладает меньшей чувствительностью к согласованию астигматичных элементов.

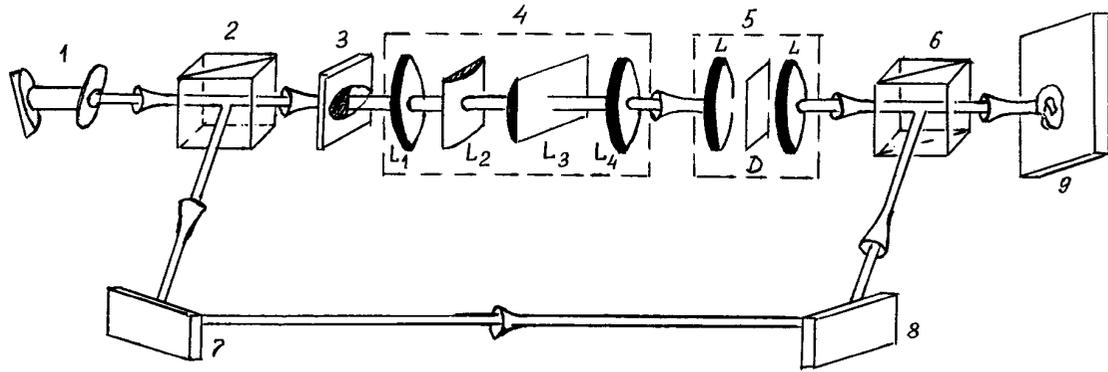
Способность пучков Лагерра–Гаусса переносить момент количества движения электромагнитной волны нашла широкое применение в устройствах улавливания, транспортировки [1,2] и раскрутки частиц [3] размерами от 1 до 20  $\mu\text{m}$ . Обычно электромагнитный момент количества движения связывают как с поляризационными [4], так и с орбитальными свойствами электромагнитной волны. Считается, что за орбитальные характеристики волны отвечает топологический заряд  $l$ , характеризующий особое состояние электромагнитного поля оптический вихрь [6] или волну с чисто винтовой дислокацией.

Лазерные источники света могут генерировать два типа параксиальных когерентных пучков: пучки Эрмита–Гаусса ( $HG_{mn}$ ) и азимутально симметричные пучки Лагерра–Гаусса ( $LG_{lg}$ ). Линейно поляризованные  $LG_{lg}$ -пучки являются носителями чисто винтовых дислокаций (оптических вихрей) и, следовательно, также переносят момент количества движения. Линейно поляризованные  $HG_{mn}$ -пучки имеют вырожденную краевую дислокацию волнового фронта и момент количества движения не переносят [7]. Для внутривибраторной селекции этих пучков необходимо использовать специальные диафрагмы и поглотители, что

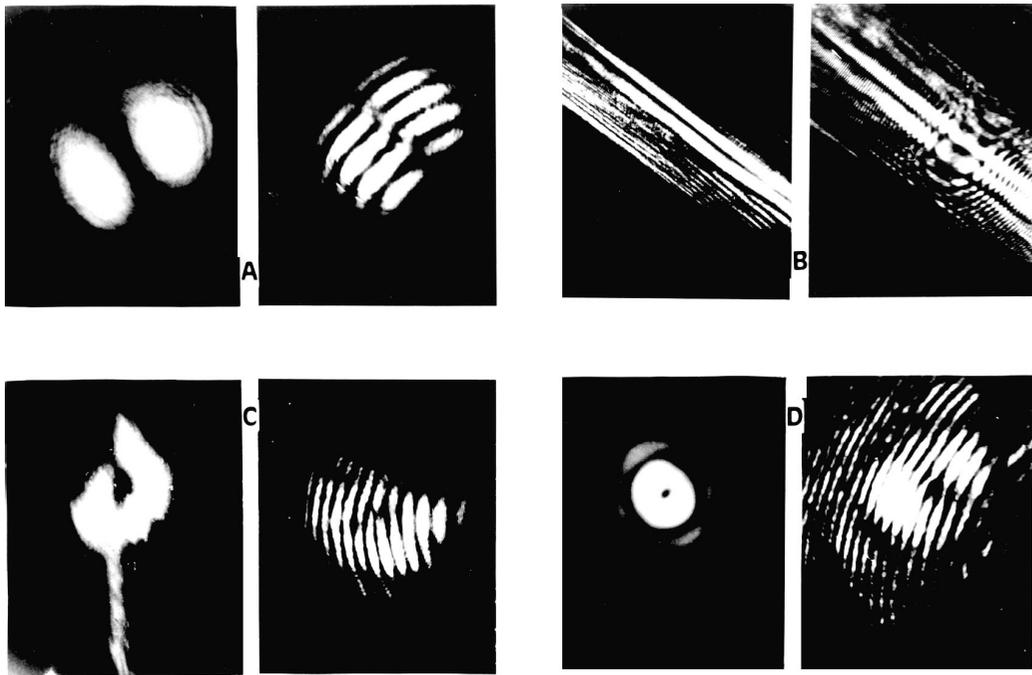
оказывается не всегда удобно в экспериментальной практике [8]. Использование голографических фильтров для формирования оптических вихрей с требуемой величиной и знаком топологического заряда [9] открыло широкие возможности практического использования пучков Лагерра–Гаусса. Однако большинство практически применяемых для этих целей голограмм обладают низкой дифракционной эффективностью.

Относительно недавно авторами работы [10] предложен и развит оригинальный способ преобразования пучков Эрмита–Гаусса в пучки Лагерра–Гаусса и наоборот. Конверсия различных симметричных групп пучков друг с другом осуществляется с помощью двух астигматических цилиндрических линз с совпадающими (параллельными) главными плоскостями. Преобразование пучков осуществляется вследствие различия фаз Гуи, приобретаемых пучками в пространстве между цилиндрическими линзами. Расстояние между линзами подбирается так, чтобы на выходной линзе в момент перекрытия волновых фронтов разность фаз была  $\pi/2$  или  $\pi$ . Разность фаз  $\pi/2$  соответствует конверсии пучка  $LG_{lg}$  в пучок  $HG_{ml}$  и наоборот.  $\pi$ -конверсия связана с преобразованием положительного топологического заряда ( $l > 1$ ) в отрицательный заряд ( $l < 1$ ) и наоборот. Такие преобразования возможны только при точном фазовом согласовании астигматических линз.

В настоящей работе экспериментально анализируется менее требовательный к условиям согласования способ конверсии различных симметричных групп пучков, основанный на фурье-преобразованиях в системе сферических и цилиндрических линз. Суть метода заключается в использовании двух цилиндрических линз с перпендикулярными главными плоскостями, помещенными между двумя сферическими линзами. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Излучение He–Ne лазера в виде фундаментального гауссового пучка на длине волны  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  и мощностью  $P = 1\text{mW}$  возбуждало интерферометр Маха–Цендера. В предметном плече интерферометра устанавливался модовый конвертер. На вход модового конвертера падал фундаментальный гауссовый пучок, который после фазового транспаранта преобразовывался в пучок Лагерра–Гаусса ( $LG_{lg}$ ). Фазовый транспарант был выполнен как композиционная фазовая пластинка  $\lambda/2$ , позволяющая вводить разность фаз  $\pi$  между волновыми фронтами только на половине поперечного сечения пучка. Полные потери на транспаранте составили 15–20%. Дальнейшая трансформация лазерного



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — He-Ne лазер, 2 и 6 — делительные кубики, 3 — фазовый транспарант (композиционная фазовая пластинка  $\lambda/2$ ), 4 — фазовый конвертер ( $L_1, L_4$  — сферические линзы,  $L_2, L_3$  — цилиндрические линзы), 5 — фурье-фильтр ( $L$  — две сферические линзы,  $D$  — диафрагма), 7 и 8 — зеркала, 9 — экран.



**Рис. 2.** Фотографии формул пучка: *A* — пучок Эрмита-Гаусса с вырожденной дислокацией; *A* — пучок Эрмита-Гаусса с вырожденной краевой дислокацией; *B* — деформированный гауссов пучок с вырожденной краевой дислокацией; *C* — две aberrации типа "кома", чисто винтовая дислокация; *D* — пучок Лагерра-Гаусса с чисто винтовой дислокацией.

пучка осуществлялась посредством фазового конвертера, состоящего из двух цилиндрических линз ( $L_2, L_3$ ), помещенных между двумя сферическими линзами ( $L_1, L_4$ ). Плоскости симметрии цилиндрических линз были перпендикулярны друг другу (рис. 1). Такая геометрия конвертера существенно изменяет его принцип действия по сравнению с аналогичным устройством работы [10]. Когда ось симметрии фазового транспаранта ориентирована под углом  $45^\circ$  и, если приблизительно выполнены соотношения длин между всеми четырьмя линзами, пучок Эрмита–Гаусса эффективно преобразовывается в пучок Лагерра–Гаусса. Для отсежки гармоник высших порядков использовался фурье-фильтр, состоящий из двух центрированных линз и диафрагмы. На рис. 2 представлены фотографии формы пучка в процессе последовательного преобразования на отдельных узлах конвертера. Рядом с каждой фотографией пучка приведена его интерферограмма, характеризующая тип дислокации волнового фронта. Как видно из рисунка, пучок Эрмита–Гаусса с вырожденной краевой дислокацией (рис. 2, *a*) после прохождения сферической линзы  $L_1$  и двух цилиндрических линз  $L_2$  и  $L_3$  представляет собой сильно деформированный астигматичный гауссов пучок с вырожденной краевой дислокацией (рис. 2, *b*). Однако после прохождения второй сферической линзы  $L_4$  возникает схлопывание пучка в композицию двух аберраций типа "кома" [11]. Для этого деформированного пучка характерна почти чисто винтовая дислокация (рис. 2, *c*). Подавление высших гармоник выполняется фурье-фильтром так, что формируется симметричный пучок Лагерра–Гаусса с чисто винтовой дислокацией (рис. 2, *d*).

Потери на линзовом конвертере и фурье-фильтре были 8–10%, так что полные энергетические потери составили 25–30%.

Изменение ориентации оси симметрии фазового транспаранта на входе конвертера с  $+45^\circ$  на  $-45^\circ$  соответствовало смене топологического заряда пучка на противоположный.

## Список литературы

- [1] Gahagan K.T., Swartzlander G.A., Jr. // Opt. Lett. 1996. V. 21. N 11. P. 827–829.
- [2] Hl H., Friese M.E.J., Heckenbers N.R., Rubinsztein Dunlop H. // Physic. Rev. Lett. 1995. V. 75. N 5. P. 826–829.
- [3] Simpson N.B., Dholakia K., Allen L., Padgett M.J. // Opt. Lett. 1997. V. 22. N 1.

- [4] *Richard A. Beth* // *Physic. Rev.* V. 50. 1995. P. 115–125.
- [5] *Van Enk S.J., Nienhuis G.* // *Optic. Comm.* 1992. V. 94. P. 147–158.
- [6] *Nye J.F., Berry M.V.* // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1974. V. 336. P. 165–190.
- [7] *Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P.* // *Optic. Rev.* 1992. V. 45. N 11. P. 45–49.
- [8] *Harris M., Hill C.A., Vaughan J.M.* // *Optic. Comm.* 1994. V. 106. P. 161–166.
- [9] *Basistiy J.V., Bazhenov I.V., Yu. Soskin M.S.* // *Opt. Comm.* 1993. V. 103. P. 422–428.
- [10] *Beijersbergen M.W., Allen L., van der Veen H.E.L.O., Woerdman J.P.* // *Opt. Comm.* 1993. V. 96. P. 123–132.
- [11] *Вольф Э., Борн М.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 856.