

# Перестраиваемый астигматический $\pi/2$ -конвертер мод

А.А.Малютин

*Описана схема перестраиваемого астигматического  $\pi/2$ -конвертера мод, обеспечивающего использование входных пучков с изменяемой в два раза рэлеевской длиной. Вариации оптической длины самого конвертера при этом не превышают  $1/6$ .*

*Ключевые слова:*  $\pi/2$ -конвертер мод, астигматическая оптика, перестройка параметров.

## 1. Введение

Как известно, высококачественное преобразование мод Эрмита – Гаусса (ЭГ) в кольцевые моды Лагерра – Гаусса (ЛГ) осуществляется астигматическим  $\pi/2$ -конвертером при строгом согласовании параметров лазерного пучка с оптическими параметрами конвертера [1]. При нарушении этого условия в лучшем случае получают ЛГ-пучки эллиптического типа [2], свойства которых удовлетворяют практическим нуждам лишь в ограниченной области пространства. Параметром качества согласования исходной ЭГ-моды и конвертера можно считать длину распространения пучка, на которой снижение «барьера» интенсивности результирующей ЛГ-моды вокруг оси происходит не более чем на некоторую заданную величину [3]. Идеальным можно считать такой пучок, для которого означенная длина распространения равна одной или нескольким рэлеевским длинам  $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$  ( $w_0$  – радиус пучка,  $\lambda$  – длина волны излучения). Удовлетворить этому условию достаточно трудно, прежде всего с практической точки зрения, поскольку требуются как прецизионные измерения параметров исходного пучка, так и точное изготовление оптических элементов, особенно линз с цилиндрическими поверхностями.

Проблема усугубляется, если возникает необходимость изменения длины волны исходного лазерного пучка. Очевидно, что при изменении длины волны или размера пучка для схемы  $\pi/2$ -конвертера необходим другой набор оптических элементов. Голографические конвертеры [4] также имеют свой недостаток – необходимость использования специальной голограммы для каждого индекса  $l$  моды ЛГ. В значительной степени задача согласования была бы облегчена, если бы существовала возможность не дискретной (с помощью некоторого конечного числа доступных элементов), а непрерывной перестройки параметров необходимых компонентов. В принципе, существуют фотографические объективы с переменным фокусным расстоянием, которые могут исполь-

зоваться, в частности, для построения плавно перестраиваемых расширителей пучка (однако в случае достаточно мощного излучения встает вопрос о лучевой стойкости их склеенных компонентов). Упрощенный вариант такого объектива, состоящего из двух сферических линз, уже предлагался для использования в перестраиваемом фурье-преобразователе дробного порядка [5]. Это возможно также и в случае цилиндрических линз. Однако как для схемы астигматического  $\pi/2$ -конвертера работы [6], так и для других схем, рассмотренных в [7, 8], потребовались бы минимум три подобные составные линзы с переменным фокусом. В целом это решение приводит к значительному усложнению оптической схемы и ее юстировки. Заметным образом вырастает и ее оптическая длина.

В настоящей статье приведена схема перестраиваемого  $\pi/2$ -конвертера мод, в которой используется всего один составной дублет описанного в [5] типа. Для перестройки фокусного расстояния цилиндрических компонентов конвертера требуется только вращение некоторых из них вокруг его оптической оси. Это оказывается возможным в силу специфики выбранной оптической схемы  $\pi/2$ -конвертера.

## 2. Элементы перестраиваемого $\pi/2$ -конвертера мод

В качестве базовой схемы перестраиваемого  $\pi/2$ -конвертера мод предлагается использовать схему, приведенную на рис.1 [3]. Во входной и выходной опорных плоскостях такого конвертера установлены блоки из цилиндрических положительной и отрицательной линз со «скрещенной» оптической силой  $\pm 1/F$  (образующие цилиндрических поверхностей ортогональны). Расстояние между блоками равно  $\sqrt{2}F$ . Точно между ними установлена сферическая линза с фокусным расстоянием  $F/\sqrt{2}$ . В целом устройство представляет собой  $\pi/2$ -конвертер на основе дробного фурье-преобразования (ДФП) с порядками  $1/2$  и  $3/2$  во взаимно ортогональных плоскостях для пучка с  $z_R = F$  и плоским волновым фронтом на входе в устройство. Подробнее принцип действия конвертеров на основе ДФП дан в [8]. Для перестройки параметров конвертера, приведенного на рис.1, необходимо согласовано менять оптическую силу всех трех элементов.

А.А.Малютин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: (095) 135 03 27, факс: (095) 135 20 55, e-mail: amal@kapella.gpi.ru

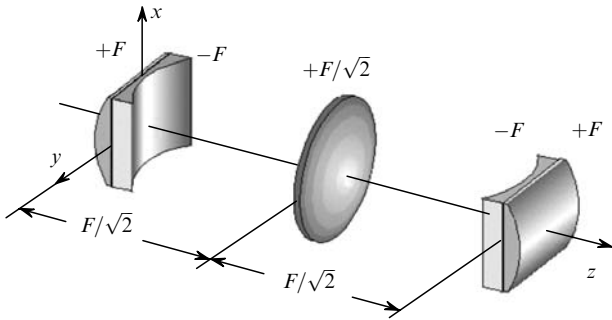


Рис.1. Оптическая схема перестраиваемого  $\pi/2$ -конвертера мод (положение линз соответствует рэлеевской длине входного пучка  $z_R = F$ ).

**2.1. Изменение параметров сферической линзы**

Как отмечено во Введении, сферическая линза с переменным фокусным расстоянием может быть выполнена в виде дублета, составленного из двух одинаковых (в простейшем случае тонких) линз  $L$  и  $L'$ . Эффективное фокусное расстояние дублета

$$F = \frac{f^2}{2f - d}, \tag{1}$$

где  $f$  – фокусное расстояние отдельной линзы;  $d$  – расстояние между линзами (рис.2). Положение передней ( $H$ ) и задней ( $H'$ ) главных точек относительно соответствующих тонких линз дается соотношением

$$s_H = s_{H'} = \frac{fd}{2f - d}. \tag{2}$$

Именно от этих главных точек должно отсчитываться расстояние до соответствующих входного и выходного цилиндрических элементов конвертера, схема которого приведена на рис.1. Полезным свойством составной линзы оказывается инвертированное расположение главных точек, т. е. по ходу луча находится сначала задняя, а затем передняя точка. В конечном счете это дает значительное уменьшение полной длины конвертера.

В нашем случае в соответствии со схемой рис.1 необходимо выбрать фокусное расстояние тонких линз  $f = f_{\text{sph}} = F\sqrt{2}$ .

**2.2. Изменение фокусного расстояния цилиндрических элементов**

Возьмем тонкую цилиндрическую линзу с оптической силой  $1/f$  и примыкающую к ней линзу с оптической силой противоположного знака  $-1/f$ , которая может вращаться вокруг оптической оси  $z$  (рис.3,а). Расчет этой системы линз удобно вести с помощью методов тензорной

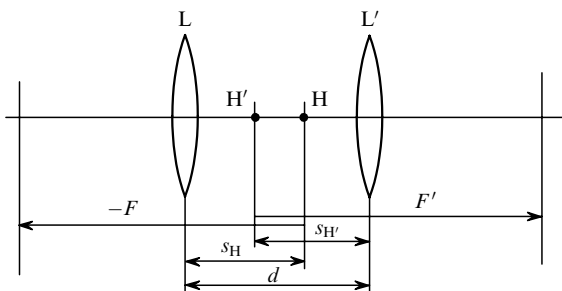


Рис.2. Схема перестройки фокусного расстояния сферической линзы (дублета) схемы  $\pi/2$ -конвертера.

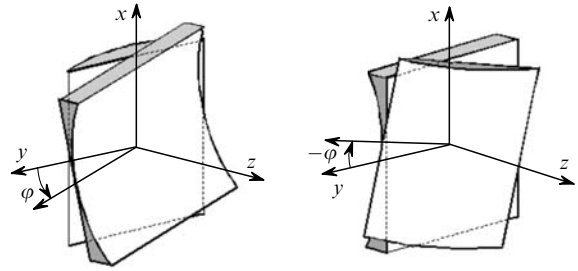


Рис.3. Компоненты астигматического устройства формирования седлообразной формы волнового фронта пучка с перестраиваемой кривизной. Каждый из компонентов имеет одну неподвижную и одну вращаемую вокруг оптической оси цилиндрические линзы; вращение подвижных линз осуществляется в противоположных направлениях.

$ABCD$ -оптики [9]. В этом случае для первой линзы с оптической силой  $1/f$ , действующей по оси  $y$ , имеем тензор

$$T_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где на главной диагонали субматриц  $A, B, C$  и  $D$  размерностью  $2 \times 2$  каждая стоят элементы, описывающие действие цилиндрической линзы в плоскостях  $xz$  и  $yz$ . Тогда для второй линзы с оптической силой  $-1/f$ , действующей по оси  $x$  и повернутой на угол  $\varphi$  относительно оси  $y$ , можно записать

$$T_2 = \begin{pmatrix} C & -S & 0 & 0 \\ S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & -S \\ 0 & 0 & S & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/f & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C & S & 0 & 0 \\ -S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ C^2/f & CS/f & 1 & 0 \\ CS/f & S^2/f & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где  $C = \cos \varphi$ ;  $S = \sin \varphi$ . Для последовательности двух цилиндрических линз получим тензор

$$T_{12} = T_2 T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ C^2/f & CS/f & 1 & 0 \\ CS/f & -C^2/f & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Возьмем теперь другую, похожую систему цилиндрических линз (рис.3,б), в которой неподвижная линза с оптической силой  $-1/f$  действует по оси  $x$ ; дополнительную к ней линзу с оптической силой  $1/f$  будем поворачивать в направлении, противоположном направлению поворота подвижной линзы первой системы. Для этой пары линз получим  $ABCD$ -тензор

$$T'_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ C^2/f & -CS/f & 1 & 0 \\ -CS/f & -C^2/f & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Поставив обе системы линз непосредственно друг за другом (в любом порядке), имеем в итоге тензор

$$T = T_{12}T'_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2C^2/f & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2C^2/f & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

который описывает устройство, регулирующее кривизну седлообразного волнового фронта от нуля до  $\pm 2/f$ . Иначе говоря, имеем аналог двух цилиндрических линз с переменным фокусным расстоянием  $f^*(\varphi) = \pm f/(2 \cos^2 \varphi)$  и ортогонально ориентированными оптическими силами (оптический квадруполь [10]). Чтобы блок из четырех цилиндрических линз, описываемый тензором (7), мог служить в качестве входного и выходного элементов схемы  $\pi/2$ -конвертера на рис.1, следует выбрать  $f = f_{\text{cyl}} = 2F$ .

### 3. Основные параметры перестраиваемого $\pi/2$ -конвертера мод

Расположение всех элементов перестраиваемого  $\pi/2$ -конвертера мод приведено на рис.4 в виде диаграммы. По одной оси ординат отложена рэлеевская длина  $z_R$ , выраженная в единицах  $F$  (константы для данного устройства), по другой – необходимый угол поворота  $\varphi$  вращаемых компонентов в блоках цилиндрических линз. Абсциссы точек на сплошных линиях (для каждой пары значений  $z_R/F$  и  $\varphi$ ) дают положения входного (В) и выходного (В') блоков цилиндрических линз относительно центра всего устройства; абсциссы точек на кривых с темными треугольниками и кружками соответствуют положениям элементов L и L' перестраиваемой сферической линзы. Кривые со светлыми треугольниками и кружками показывают положения ее передней (Н) и задней (Н') главных точек.

В исходном положении ( $\varphi = 0$ )  $z_R/F = 1$  и эквивалентная схема конвертера соответствует рис.1. Наибольшая оптическая длина  $\pi/2$ -конвертера достигается при  $z_R/F = \sqrt{2}$  ( $\varphi \approx 37.8^\circ$ ) и составляет  $\sim 1.66F$ . Отметим, что при максимальной рэлеевской длине  $z_R = 2F$  ( $\varphi = 45^\circ$ ), которая может быть реализована при перестройке, получаем схему наиболее компактного (по отношению к рэлеевской длине входного лазерного пучка) конвертера на основе ДФП. Его эквивалентная схема приведена в [9] на рис.2,б.

Хотя оценка погрешности при изготовлении элементов перестраиваемого конвертера мод не входит в задачу настоящей работы, отметим, что как для сферического дублета (см. п.2.1), так и для цилиндрических блоков (см. п.2.2) допустимы некоторые отклонения от условий  $f_{\text{sph}} = F\sqrt{2}$  и  $f_{\text{cyl}} = 2F$ . Главным, во всяком случае для блоков цилиндрических линз, является минимизация разброса параметров используемых элементов. Указанные условия не обязательно выполнять точно, поскольку необходимое согласование параметров лазерного пучка и

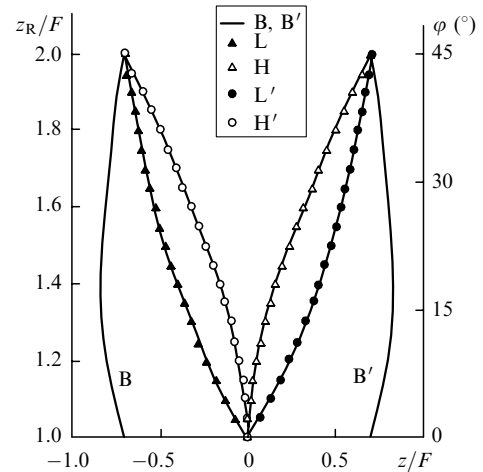


Рис.4. Диаграмма положения элементов перестраиваемого  $\pi/2$ -конвертера мод в зависимости от рэлеевской длины  $z_R$  и угла поворота  $\varphi$  цилиндрических линз (см. текст).

конвертера легко достигается либо увеличением (уменьшением) расстояния между элементами L и L', либо поворотом соответствующих элементов в блоках цилиндрических линз.

### 4. Заключение

Предложенный в настоящей статье перестраиваемый  $\pi/2$ -конвертер мод в значительной степени облегчает проблему согласования параметров устройства с параметрами входного лазерного пучка. Диапазон перестройки обеспечивает возможность вариации размеров пучка в  $\sqrt{2}$  раз (либо длины волны излучения в два раза) без замены оптических компонентов. При этом изменение полной относительной длины конвертера не превышает 1/6. Применение блока цилиндрических линз (см. п.2.2) в конвертере, описанном в работе [3], позволит получить сфокусированные лазерные ЛГ-пучки с рэлеевской длиной  $z_R \in [F, \infty]$ .

Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и физика сверхсильных лазерных полей» (Госконтракт № 66/03) и при поддержке РФФИ (грант № 02-02-17718).

1. Courtial J., Padgett M.J. *Opt. Commun.*, **159**, 13 (1999).
2. Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 235 (2003).
3. Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 1015 (2003).
4. Heckenberg N.R., McDuff R., Smith C.P., White A.G. *Opt. Lett.*, **17**, 221 (1992).
5. Lohmann A.W. *Opt. Commun.*, **115**, 437 (1995).
6. Beijersbergen M.W., Allen L., van der Veen H.E.L.O., Woerdman J.P. *Opt. Commun.*, **96**, 123 (1993).
7. Maljutin A.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4900**, 908 (2002).
8. Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 165 (2004).
9. Lin Q., Wang L. *Opt. Commun.*, **185**, 263 (2000).
10. Nemes G., Siegman A.E. *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 2257 (1994).