

УДК 621.375.85

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫЙ ПУЧОК

В. Л. Величанский, А. К. Чернышов

*Предлагается метод преобразования эллиптического астигматического гауссова пучка в круглый с заданным размером и положением перетяжки в пространстве. Метод основан на использовании двух цилиндрических и одной сферической линз. Описан алгоритм расчета согласующей системы и результаты эксперимента по вводу излучения лазерного диода в кольцевой резонатор, с фактором согласования мод  $M = 0,85$ .*

В большинстве типов инжекционных лазеров (ИЛ), за исключением ИЛ, излучающих с поверхности, поперечное сечение активной области не имеет аксиальной симметрии: боковой (в плоскости  $p$ - $n$  перехода) и поперечный (перпендикулярно  $p$ - $n$  переходу) размеры отличаются в 5 – 10 и более раз. Поэтому пучок, излучаемый такими лазерами, имеет эллиптическое поперечное сечение. В то же время многие применения предполагают преобразование эллиптического пучка ИЛ в аксиально-симметричную фундаментальную моду внешнего оптического элемента с максимальной эффективностью. В противном случае возбуждаются многочисленные поперечные моды высших порядков, что, как правило, ведет к потерям. Подобная задача традиционно возникает при использовании неконфокальных интерферометров с резкостью  $10^3$  и выше для контроля спектральных характеристик лазеров [1] и при их стыковке с одномодовым волокном [2]. Недавно появилась еще одна область, где очень важно точное согласование мод. Это генерация второй гармоники  $GaAlAs$  лазеров нелинейными кристаллами во внешнем накопительном резонаторе (build-up cavity) [3]. Эффективность преобразования во вторую гармонику при этом достигает 36% [4] и ограничивается рядом причин,

в том числе эффективностью ввода излучения ИЛ в фундаментальную моду резонатора. Эффективность ввода в свою очередь определяется согласованием мод лазера и накопительного резонатора.

В известной авторам литературе описано несколько схем согласования на основе: анаморфотной призматической пары [4]; сферических линз (для пучка сечения круглого) [5]; сферического вогнутого зеркала с наклонным падением лучей [6]. Поскольку, пространственное распределение излучения ИЛ может иметь сложную форму, предварительный расчет согласующей оптики трудно выполним, поэтому при синтезе подобных систем параметры элементов и их относительное положение часто определяют экспериментально. Такой подход не гарантирует, что оптимальное согласование мод будет получено. Однако, если ограничиться нормальными лазерами, излучение которых хорошо описывается эллиптическим астигматическим гауссовым пучком, то расчет согласующей системы линз выполнить относительно просто. Это позволяет быстро ответить на два практических вопроса: 1) можно ли получить эффективное согласование мод с помощью доступных линз, если размеры системы можно изменять в широких пределах; 2) какие элементы необходимы для того, чтобы размеры системы не превышали заданных.

В статье предлагается согласующая система, состоящая из двух цилиндрических линз со взаимно ортогональными осями и сферической линзы. Она позволяет трансформировать эллиптический астигматический гауссов пучок в круглый с заданным размером и положением перетяжки в пространстве. Описывается алгоритм расчета параметров и положения элементов оптической схемы. Приводятся результаты экспериментальной проверки предлагаемого метода согласования.

При рассмотрении трансформации пучка ИЛ линзовой системой сведем задачу к двум одномерным пучкам в боковой и поперечной плоскостях. Преобразование круглого гауссова пучка двумя сферическими линзами было рассмотрено в [5]. Метод расчета и выражения, полученные в [5], могут быть применимы и к указанным одномерным пучкам.

На практике лазерные диоды используются с коллимирующим микрообъективом, который и формирует входной пучок для согласующей системы. В общем случае он имеет неодинаковые по размеру одномерные перетяжки (эллиптичность), локализованные в различных точках оптической оси (астигматизм). Используя две цилиндрические линзы, можно трансформировать одномерные пучки так, чтобы в пространстве изображений их перетяжки совпадали по размеру и находились в одной поперечной плоскости.

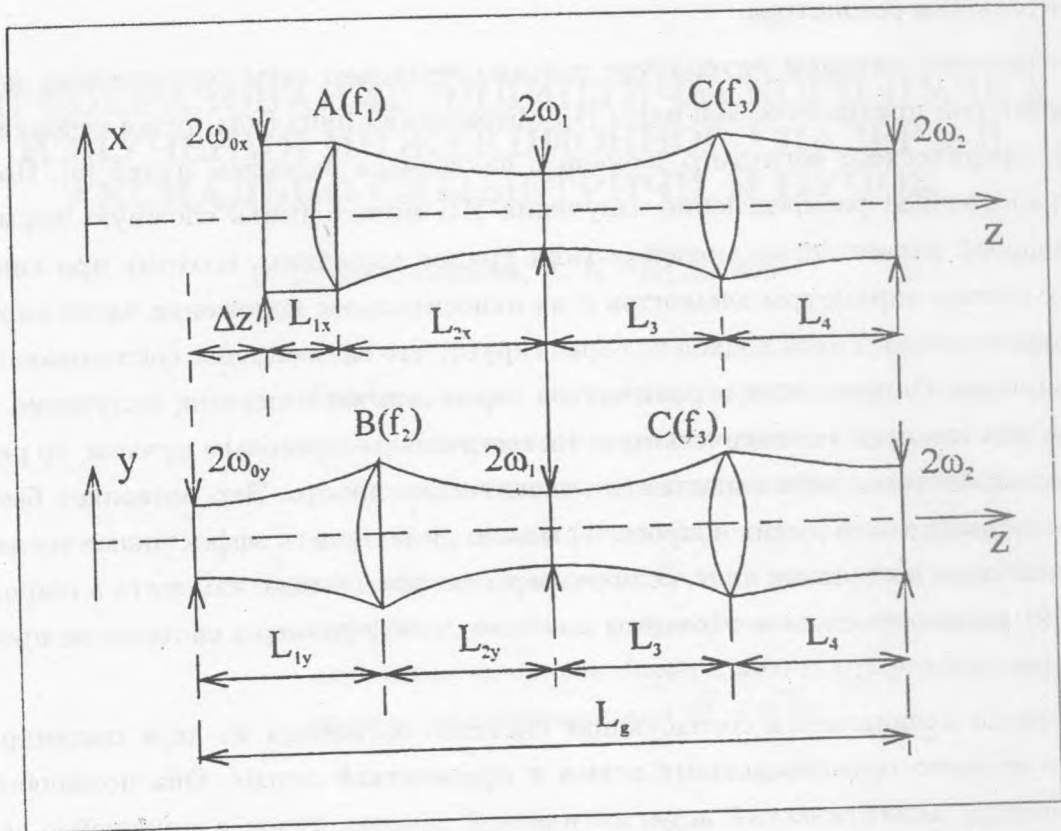


Рис. 1. Сечения согласующей системы в главных плоскостях; цилиндрические линзы *A* и *B* показаны только в одном сечении. Для данного эксперимента:  $\omega_{0x} = 0,328$  см;  $\omega_{0y} = 0,033$  см;  $\omega_2 = 0,06$  см;  $\Delta z = 3$  см;  $f_1 = 47$  см;  $f_2 = 16$  см;  $f_3 = 9$  см;  $L_{1x} = 112,5$  см;  $L_{1y} = 144,5$  см;  $L_4 = 49,5$  см;  $L_g = 221,4$  см.

Полученный круглый пучок, с помощью сферической линзы преобразуется в собственную моду внешнего элемента. На рис. 1 показано сечение предлагаемой согласующей системы в рассматриваемых плоскостях. В приближении тонкой линзы, для одномерного гауссова пучка, распространяющегося вправо через цилиндрическую линзу *A*, можно написать [5]

$$L_{2x} - f_1 = (L_{1x} - f_1)f_1^2 / [(L_{1x} - f_1)^2 + (\pi\omega_{0x}^2/\lambda)^2], \quad (1)$$

$$\omega_1 = \omega_{0x} |f_1| [(L_{1x} - f_1)^2 + (\pi \omega_{0x}^2 / \lambda)^2]^{-1/2}, \quad (2)$$

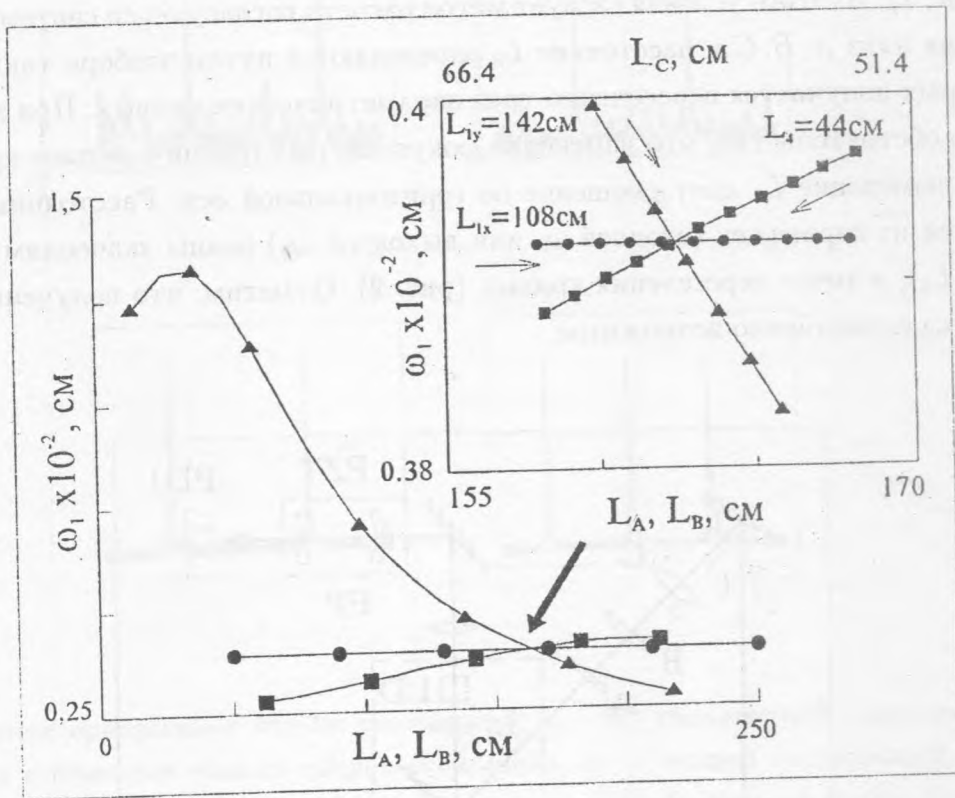


Рис. 2. Параметрические кривые  $[L_A(L_{1x}), \omega_1(L_{1x})]$  —  $\bullet$ ;  $[L_B(L_{1y}), \omega_1(L_{1y})]$  —  $\blacktriangle$ ;  $[L_C(L_4), \omega_1(L_4)]$  —  $\blacksquare$ . Кривая  $[L_C(L_4), \omega_1(L_4)]$  строится из точки  $(L_g, 0)$  справа налево. На вставке показана область пересечения в увеличенном масштабе. Здесь  $L_{1x}, L_{1y}, L_4$  изменяются с шагом 1 см.

где  $\lambda$  — длина волны в вакууме, а остальные величины указаны на рис. 1. Аналогичные выражения справедливы и для преобразования пучка в ортогональной плоскости цилиндрической линзой  $B$ . В соответствии с [5] построим параметрические кривые  $[L_A(L_{1x}), \omega_1(L_{1x})]$  и  $[L_B(L_{1y}), \omega_1(L_{1y})]$ , где  $L_A = L_{1x} + L_{2x}$ ,  $L_B = L_{1y} + L_{2y}$ . Для воображаемых пучков, распространяющихся влево из перетяжки  $\omega_2$  через сферическую линзу  $C$ , также можно ввести параметрическую кривую  $[L_C(L_4), \omega_1(L_4)]$ , где  $L_C = L_3 + L_4$ . Если входной пучок точно трансформируется в выходной, то одномерные пучки, распространяющиеся влево и вправо (рис. 1), имеют одинаковую промежуточную перетяжку  $\omega_1$ .

Тогда три указанные параметрические кривые, построенные на одном графике, должны пересекаться в одной точке с ординатой, равной величине  $\omega_1$  для случая полного согласования (рис. 2). Из этого условия следует метод расчета согласующей системы. Фокусные расстояния линз  $A, B, C$  и расстояние  $L_8$  определяются путем подбора таких значений, при которых получается пересечение трех параметрических кривых. При этом используется то обстоятельство, что изменение фокусных расстояний смещает кривые вдоль оси  $\omega_1$ , а изменение  $L_8$  дает смещение по горизонтальной оси. Расстояния от линз до ближайшей из перетяжек (входной  $\omega_0$  или выходной  $\omega_2$ ) равны значениям параметров ( $L_{1x}, L_{1y}, L_4$ ), в точке пересечения кривых (рис. 2). Отметим, что полученное решение не является единственно возможным.

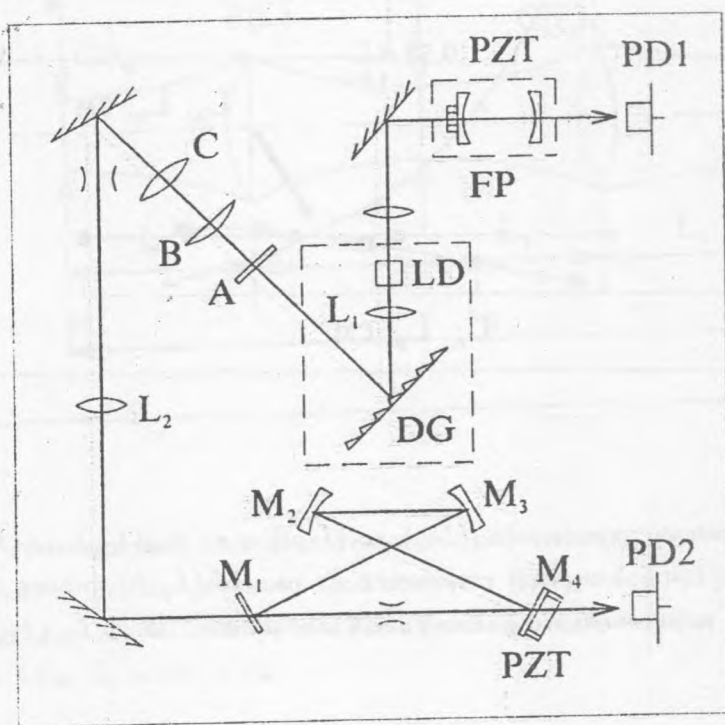


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: LD – лазерный диод; DG – дифракционная решетка 1200 штр/мм; FP – конфокальный интерферометр Фабри-Перо; PZT – пьезокерамика; PD – фотодиод; A, B – цилиндрические линзы, C – сферическая линза согласующей системы. Коэффициенты отражения зеркал равны 98%(M1) и 99,5%(M2 – M4).

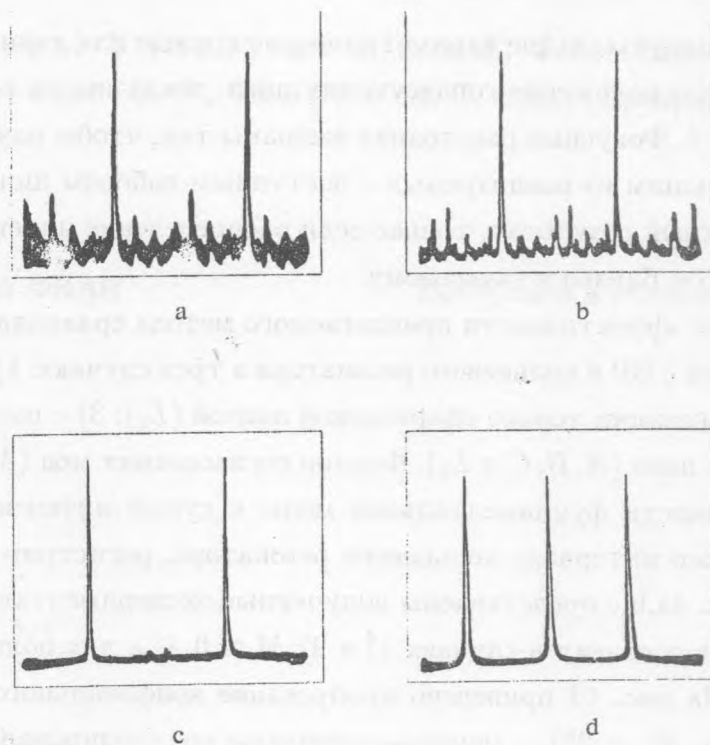


Рис. 4. Сигнал пропускания bow-tie резонатора: а – без согласующей системы, б – при согласовании с помощью только сферической линзы, с – с полной согласующей системой; д – сигнал пропускания контрольного конфокального интерферометра Фабри-Перо.

В экспериментах использовался лабораторный образец  $GaAlAs$  лазерного диода с GRIN структурой. Размеры перетяжек пучка ИЛ оценены из расходимости в дальнем поле ( $\omega_{\parallel} = 5 \text{ мкм}$ ,  $\omega_{\perp} = 0,5 \text{ мкм}$ ), астигматическое расстояние ( $-7 \text{ мкм}$ ) измерено по методике [7], длина волны ( $\lambda = 0,86 \text{ мкм}$ ) определена монохроматором МУМ-2. По этим данным рассчитаны параметры пучка после коллимирующего микрообъектива  $L_1 (F = 6 \text{ мм}, NA = 0,65)$ . Внешний резонатор (ВР) образован гранью лазерного диода и дифракционной решеткой DG 1200  $\text{шт}/\text{мм}$  (рис. 3). Нулевой порядок отражения решетки вводился в кольцевой резонатор bow-tie типа с двумя вогнутыми зеркалами ( $M2, M3$ ) и двумя плоскими ( $M1, M4$ ). Радиус кривизны вогнутых зеркал равнялся  $50 \text{ мм}$ , промежуток между ними  $d_1 = 52 \text{ мм}$ , а оптический путь через плоские зеркала  $d_2 = 72 \text{ мм}$ . Большая из двух перетяжек фундаментальной моды резонатора (между зеркалами  $M1$  и  $M4$ ) имела радиус  $300 \text{ мкм}$ . Линза  $L_2 (F = 64 \text{ см})$  трансформировала моду резонатора в пучок с перетяжкой радиусом  $600 \text{ мкм}$ , с которым и согласовывалось из-

лучение лазера. Упомянутые выше параметрические кривые для данных эксперимента, по которым определено положение согласующих линз, показаны на рис. 2, а результаты расчета – на рис. 1. Фокусные расстояния выбраны так, чтобы размер согласующей системы был наименьшим из реализуемых с доступным набором линз. Напомним, что методика дает надежный результат, только если распределение интенсивности излучения ИЛ в дальнем поле близко к гауссовому.

Для демонстрации эффективности предлагаемого метода сравнивались факторы согласования мод лазера с ВР и кольцевого резонатора в трех случаях: 1) без согласующей оптики; 2) при согласовании только сферической линзой ( $L_2$ ); 3) с полной согласующей системой из четырех линз ( $A, B, C$  и  $L_2$ ). Фактор согласования мод ( $M$ ) оценивался как отношение интенсивности фундаментальной моды к сумме интенсивностей всех мод из одного межмодового интервала кольцевого резонатора, регистрируемых по сигналу пропускания. На рис. 4a,b,c представлены полученные экспериментальные результаты. Фактор согласования составил в случаях 1) и 2)  $M \approx 0,4$ , а для полной системы (случай 3)  $M = 0,85$ . На рис. 4d приведено пропускание конфокального интерферометра ФР ( $FSR = 1,5$  ГГц,  $F^* = 25$ ), с помощью которого контролировался одночастотный режим работы лазера.

Таким образом, в работе представлено обобщение методики согласования [5] на случай эллиптического гауссова пучка с астигматизмом. Продемонстрирована эффективность ее использования при вводе излучения инжекционного лазера с ВР в кольцевой резонатор. Полученный фактор согласования мод  $M = 0,85$  в 2 раза больше по сравнению с фактором согласования при использовании только сферической линзы. Авторы выражают благодарность Якуткину В. В. и Чернышовой Г. Н. за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (95-02-05882).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Repasky K. S., Watson L. E., and Caristen J. L. Appl. Opt., **34**, 2615 (1995).
- [2] Kawano K., Mitomi O. et al. Appl. Opt., **24**, 984 (1985).
- [3] Nam D. W., Waarts R. G. Laser Focus World. aug., 49 (1994).
- [4] Zimmermann C., Vuletic V. et al., Appl. Phys. Lett., **66**, 2318 (1995).
- [5] Keijzer F., Lahaye R. J., and Stolte S. Appl. Opt., **31**, 7537 (1992).
- [6] Zimmermann C., Hansch T. W. Appl. Phys. Lett., **61**, 2741 (1992).

- [7] Velichanskii V.L., Zibrov A.S. et al., J. Sov. Laser Res., **12**, 341 (1991),  
Величанский В. Л., Зибров А. С. и др., Препринт ФИАН N 198, М.,  
1991.

Самарский филиал ФИАН

Поступила в редакцию 9 января 1996 г.