

В.А. Данилов, М.В. Дубов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСВЕЩАЮЩЕГО ПУЧКА НА РАБОТУ ФОКУСАТОРОВ

Фокусатор позволяет преобразовать лазерный пучок так, чтобы создать заданное распределение интенсивности вдоль фокальной кривой. Фокусировка осуществляется за счет создания сложной поверхности, форма которой зависит от формы фокальной кривой, распределения интенсивности вдоль нее и параметров освещающего пучка (фазы и интенсивности). Поэтому возмущение освещающего пучка создает изображение, отличное от заданного.

Для практического использования фокусаторов необходимо определить требования к юстировке элемента, чтобы отклонения изображения не превосходили допустимых. Для решения этой задачи надо ввести характеристики погрешностей изображения и исследовать зависимость этих характеристик от величины возмущения параметров падающего пучка. Таким образом, требуется ввести понятие аберраций для широкого класса элементов.

Некоторые характеристики фокусаторов близки к аналогичным характеристикам классических линз, особенно при небольшом относительном отворстии. Например, это относится к глубине фокуса, фокальному сдвигу, смещению изображения при изменении угла расходимости освещающего пучка.

Другие характеристики фокусаторов требуют специального исследования, среди них – влияние искажений интенсивности освещающего пучка.

Если изменяется только распределение интенсивности освещающего пучка, то фокусировка в требуемую фокальную линию сохраняется, а возмущение изображения состоит в искажении распределения интенсивности вдоль кривой. Рассмотрим влияния искажений амплитуды, обусловленных изменением ширины пучка и такими погрешностями юстировки, как сдвиги центра освещающего пучка относительно центра элемента, то есть перпендикулярно оптической оси. Рассматривается случай нормального падения излучения на элемент, когда оптическая ось проходит через центр элемента и перпендикулярна ему.

Характер возмущения распределения интенсивности вдоль фокальной кривой и его величина зависят от формы кривой, параметров фокусатора и характера возмущений освещающего пучка. В общем случае эта зависимость очень сложна, однако численный эксперимент на модельной задаче позволяет выявить ее основные закономерности. При заданной форме кривой величина возмущений определяется параметрами фокусатора. Более устойчивым является фокусатор, у которого отклонения интенсивности на фокальной кривой от расчетной меньше при том же возмущении интенсивности падающего пучка. Для уменьшения требований к точности юстировки целесообразно повышать устойчивость фокусатора. Одним из способов повышения устойчивости фокусатора является разбиение его на части, каждая из которых фокусирует излучение во всю кривую. Наложение нескольких изображений приводит к компенсации энергетических искажений вдоль каждого из них. Численно исследованы фокусаторы, состоящие из двух частей, и показана их большая устойчивость по сравнению с фокусатором из одной части.

Расчет поверхности фокусатора производится в приближении геометрической оптики. Все лучи освещающего пучка после отражения от фокусатора проходят через фокальную кривую $\mathcal{L}$ [1, 2]. Таким образом, фокусатор определяет отображение области G , занимаемой им в плоскости OUV , на кривую $\mathcal{L}$. А именно, луч, отраженный от некоторой точки области G , определяет образ этой точки на кривой – точку, в которой он пересекает эту кривую. Пусть l – нормальный параметр на кривой $0 < l < L$, где L – длина кривой, $M(l)$ – точка на кривой, соответствующая значению l параметра. Обозначим через $\Gamma(l)$ прообраз точки $M(l)$, то есть $\Gamma(l)$ – кривая в области G (называемая слоем), а через $G(\Gamma(l+\Delta l), \Gamma(l))$ – прообраз дуги $M(l)M(l+\Delta l)$ (рис. 1).

Если распределение интенсивности освещающего пучка равно $J(u, v)$, то под распределением интенсивности $I(l)$ на фокальной кривой понимаем величину [2]

$$I(l) = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \iint_{G(\Gamma(l+\Delta l), \Gamma(l))} J(u, v) du dv / \Delta l.$$

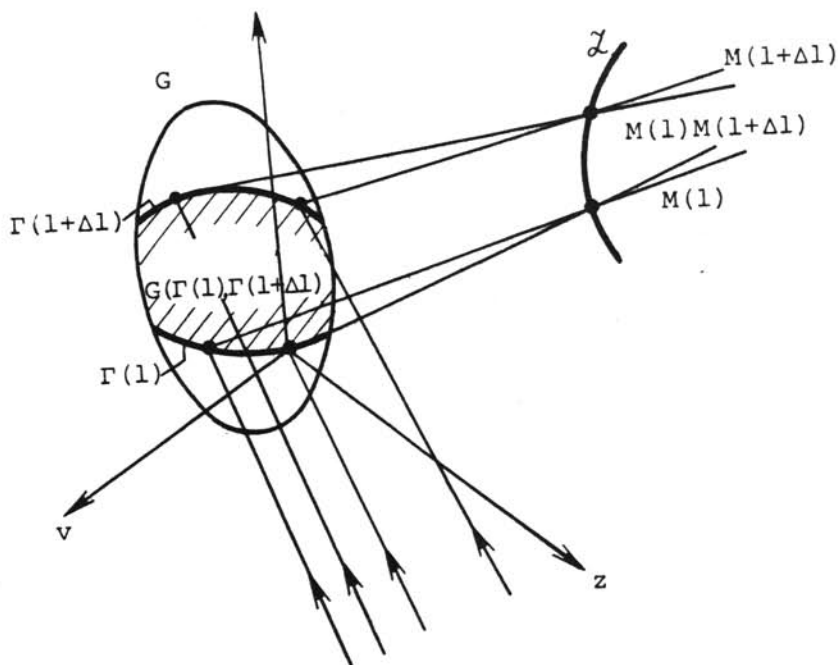


Рис. 1. Отображение области G на кривую $\mathcal{L}$

Замена расчетной величины $J(u, v)$ на возмущенную $\tilde{J}(u, v)$ приведет к перераспределению энергии, падающей на различные слои фокусатора, и, следовательно, к замене заданного распределения интенсивности $I(l)$ на возмущенное распределение $\tilde{I}(l)$. Характер возмущения $I(l)$ зависит от вида фокальной кривой и от структуры отображения области G на кривую. Структура отображения области G на кривую — это фактически структура семейства слоев. В общем случае все слои $\Gamma(l)$ — кривые второго порядка [2]. Характер поведения $\tilde{I}(l)$ в точке $M(l)$ зависит от того, как расположен слой $\Gamma(l)$ в области G, например, проходит ли слой через центральную часть области G, как направлен сдвиг пучка относительно слоя и т.д. Закономерности такого рода, исследованные на модельной задаче, обобщаются и на случай произвольной кривой.

Величину искажений будем характеризовать средней $\epsilon_{\text{ср}}$ и максимальной ϵ_{max} погрешностями

$$\epsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \int_0^L |I(l) - \tilde{I}(l)| dl / I_{\text{ср}} L;$$

$$\epsilon_{\text{max}} = \max_{l \in (0, L)} |\tilde{I}(l) - I(l)| / I_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \int_0^L I(l) dl$.

В качестве модели возьмем фокусатор, преобразующий плоский пучок с гауссовым распределением интенсивности в параллельный оси OU отрезок с равномерным распределением интенсивности $I(l) = I_0$. Такой фокусатор

характеризуется четырьмя параметрами L, f, ω_0, R , где R - радиус фокусатора (то есть G - круг $u^2+v^2 < R^2$).

$$J(u, v) = \frac{P}{\pi \omega_0^2} \exp \left(- \frac{u^2+v^2}{\omega_0^2} \right), \quad (2)$$

где

P - мощность лазера;

ω_0 - параметр, характеризующий ширину пучка.

Рассмотрим три типа погрешностей: сдвиг центра освещающего пучка относительно центра фокусатора в двух перпендикулярных направлениях и изменение ширины гауссова пучка. Сдвиг вдоль оси OU , то есть параллельно отрезку, будем характеризовать величиной Δu , вдоль оси OV - величиной Δv , $\Delta \omega = \omega - \omega_0$, где ω - параметр возмущенного пучка:

$$\tilde{J}(u, v) = \frac{P}{\pi \omega^2} \exp \left(- \frac{(u-\Delta u)^2 + (v-\Delta v)^2}{\omega^2} \right). \quad (3)$$

Необходимо исследовать вид возмущенного распределения интенсивности $\tilde{I}(l)$ и поведение функций $\epsilon_{\text{ср}}(\Delta \omega, \Delta u, \Delta v, L, f, \omega_0, R)$ и $\epsilon_{\text{max}}(\Delta \omega, \Delta u, \Delta v, L, f, \omega_0, R)$.

В длиннофокусном случае, то есть при $R \ll f, L \ll f$, кривые $\Gamma(l)$ можно аппроксимировать прямыми, перпендикулярными $\mathcal{L}$. В этом случае структура отображения области G на отрезок $\mathcal{L}$ очень простая: слои параллельны друг другу, в края отрезка отображаются слои, проходящие через края фокусатора, в центр отрезка - через центр фокусатора. Структура слоев $\Gamma(l)$ определяется одной функцией (так как слои параллельны оси OV) $u = u_0(l)$, расчет которой производился на ЭВМ согласно [1]. Тогда искаженное распределение интенсивности на отрезке определяется из выражения

$$\tilde{I}(l) = I(l) \int_{\Gamma(l)} \tilde{J}(u, v) dv / \int_{\Gamma(l)} J(u, v) dv, \quad (4)$$

где

$$u = u_0(l).$$

Физический смысл выражения (4) состоит в том, что излучение в точку отрезка $M(l)$ собирается со слоя $\Gamma(l)$, поэтому интенсивность $\tilde{I}(l)$ пропорциональна интегралу вдоль слоя от распределения интенсивности падающего пучка.

Можно показать, что в длиннофокусном случае ϵ_{max} и $\epsilon_{\text{ср}}$ не зависят от L и f , поэтому в рассматриваемой ситуации "абберации" фокусатора характеризуются одной безразмерной величиной R/ω_0 . Обычно из практических соображений значения R и ω_0 выбираются так, чтобы на фокусатор приходилось не меньше 90-95% энергии пучка, поэтому достаточно исследовать один конкретный фокусатор. Величина $\tilde{I}(l)$ определялась численно по выражениям (4), (2) и (3), после чего, согласно (1), находились $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} .

Расчет проводился независимо для каждого типа искажений, поскольку для малых значений $\Delta\omega$, Δu , Δv погрешность, обусловленная возмущением всех параметров пучка, равна сумме погрешностей, вносимых возмущением каждого из этих параметров в отдельности. Участок линейной зависимости величины погрешности от параметра возмущения и характеризует те значения $\Delta\omega$, Δu или Δv , для которых ошибки складываются. Для численного исследования взят фокусатор с $R=2$ см, $\omega_0=1,6$ см, $L=1,2$ см, величины $\Delta\omega$, Δu , Δv изменились до 1 см. Такие величины характерны для оптики ИК-диапазона. На графиках величина интенсивности безразмерна и нормирована так, что $I_0=1$ для расчетного значения $\omega_0=1,6$ см, величины $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} даны в процентах.

На рис. 2 показано распределение интенсивности вдоль отрезка для различных возмущений ω . При уменьшении ω интенсивность в центре отрезка увеличивается, а на краях уменьшается, при увеличении ω — наоборот. Такой характер $I(l)$ обусловлен структурой отображения области G на отрезок $\mathcal{L}$. В рассматриваемом случае на края отрезка отображаются края фокусатора, а падающая на последние энергия растет с ростом ω . Поэтому с ростом ω интенсивность на краях отрезка растет, а в центре — падает. Полученную зависимость $I(l)$ можно качественно перенести на случай произвольной кривой, считая основной характеристикой поведения функции $I(l)$ расстояние от слоя $\Gamma(l)$ до центра фокусатора. Отметим, что с увеличением ω снижается падающая на фокусатор энергия, что приводит к уменьшению средней интенсивности на отрезке. На рис. 3 показана зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от ω . Видно, что $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} линейно зависят от ω в довольно широком диапазоне (порядка 0,5 см).

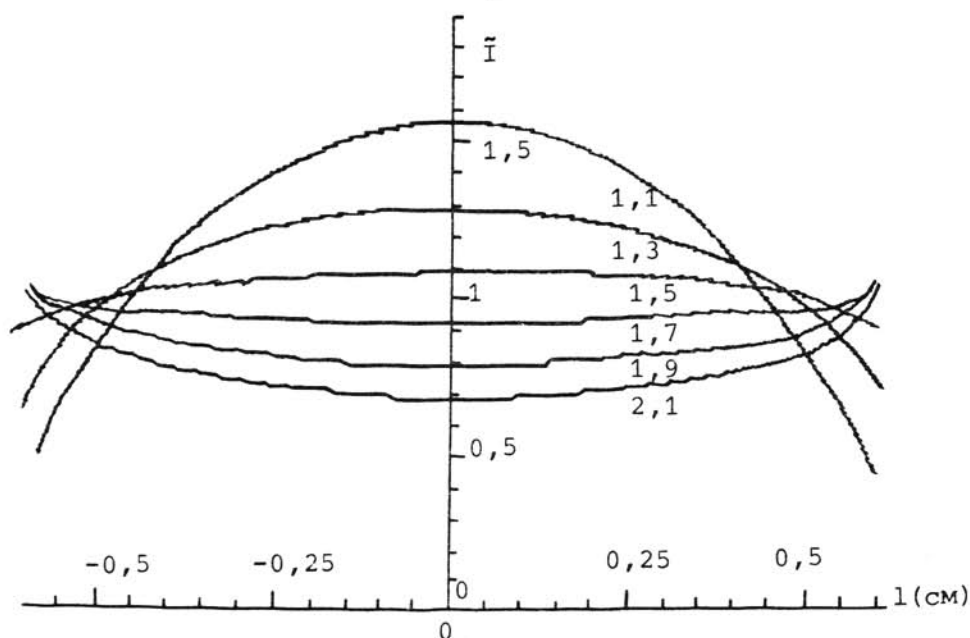


Рис. 2. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\omega=1,1 \div 2,1$ см

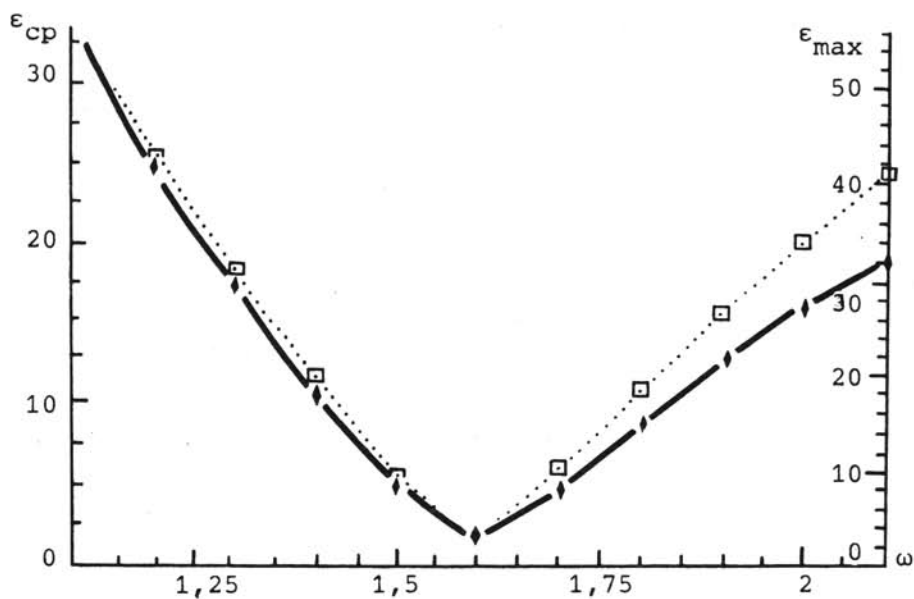


Рис. 3. Зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от ω (♦ и □ соответственно)

На рис. 4 показано распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ вдоль отрезка при сдвиге пучка в направлении, параллельном отрезку (на величину Δu вдоль оси OU), то есть перпендикулярно слоям.

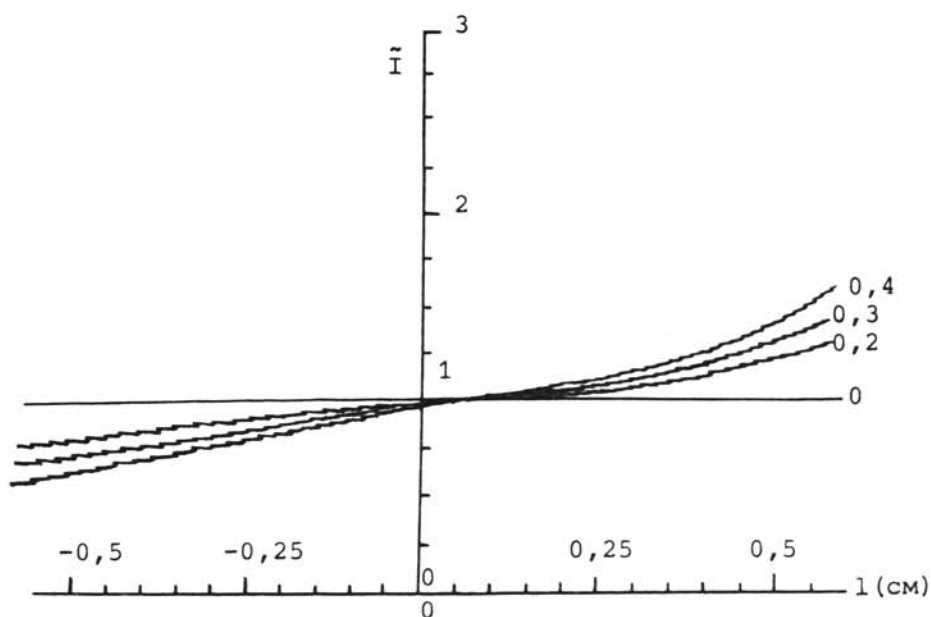


Рис. 4. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\Delta u = 0,2 \div 0,4$ см

Средняя интенсивность на отрезке уменьшается, но структура отображения в рассматриваемом случае приводит к тому, что на том краю отрезка, к которому сдвигается центр пучка, интенсивность растет, а на другом краю снижается. На рис. 5 показана зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от Δu , которая близка к линейной. Повышенная неустойчивость фокусатора к этому типу возмущения вызвана тем, что гауссов пучок сдвигается в направлении тех слоев, которые были рассчитаны для работы в условиях экспоненциально малого излучения, причем сдвиг происходит перпендикулярно слоям, то есть компенсации искажений при интегрировании вдоль слоя не происходит. В случае произвольной кривой наибольшие искажения $\tilde{I}(1)$ происходят в тех точках, слое которых перпендикулярны направлению сдвига.

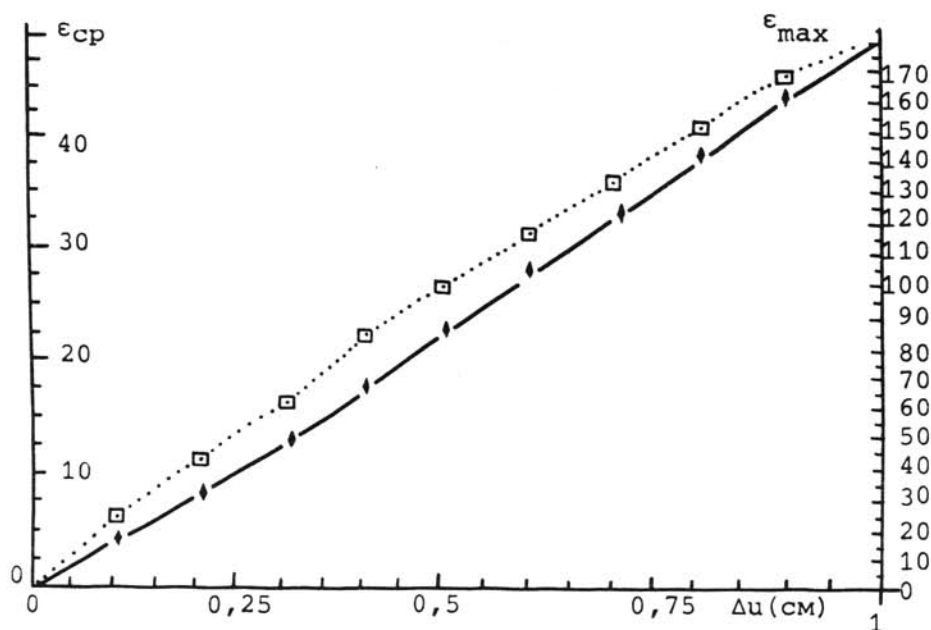


Рис. 5. Зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от Δu
(♦ и □ соответственно)

На рисунках 6 и 7 показана соответственно зависимость $\tilde{I}(1)$ и $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от сдвига центра пучка на величину Δv в направлении, перпендикулярном отрезку, то есть параллельном слоям. К сдвигу вдоль оси OV фокусатор более устойчив, чем к сдвигу вдоль оси OU. Например, значение $\epsilon_{\text{max}}=10\%$ достигается при $\Delta u=0,06$ см или при $\Delta v=0,6$ см. Это объясняется тем, что при сдвиге пучка параллельно слоям происходит компенсация искажений при интегрировании вдоль каждого слоя. Для произвольной кривой наименьшие искажения $\tilde{I}(1)$ происходят в тех точках, слое которых параллельны направлению сдвига.

Сравнение приведенных графиков показывает, что характер $\tilde{I}(1)$ различен для различных типов возмущений пучка, поэтому по виду искажения

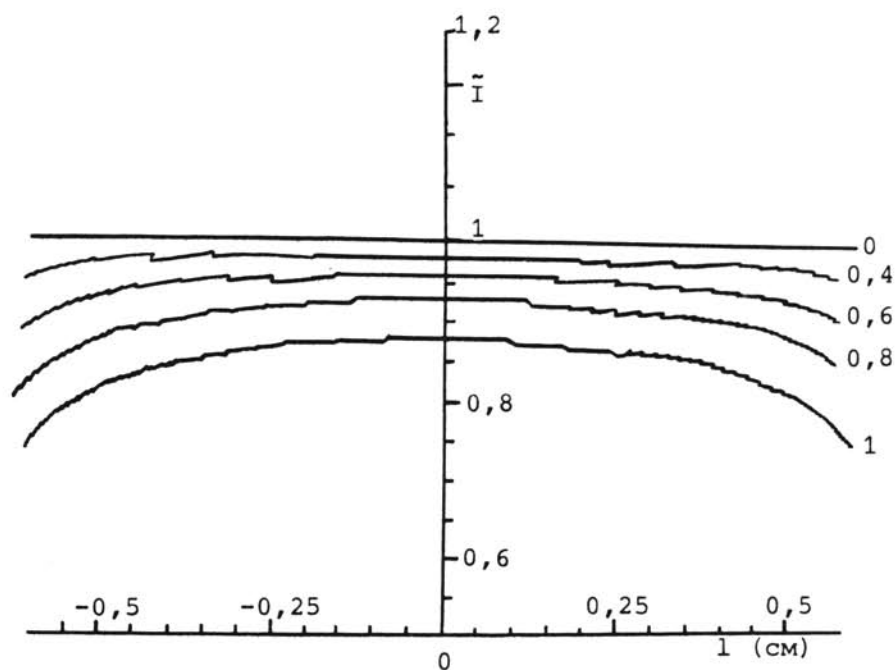


Рис. 6. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\Delta v = 0,4 \div 1$ см

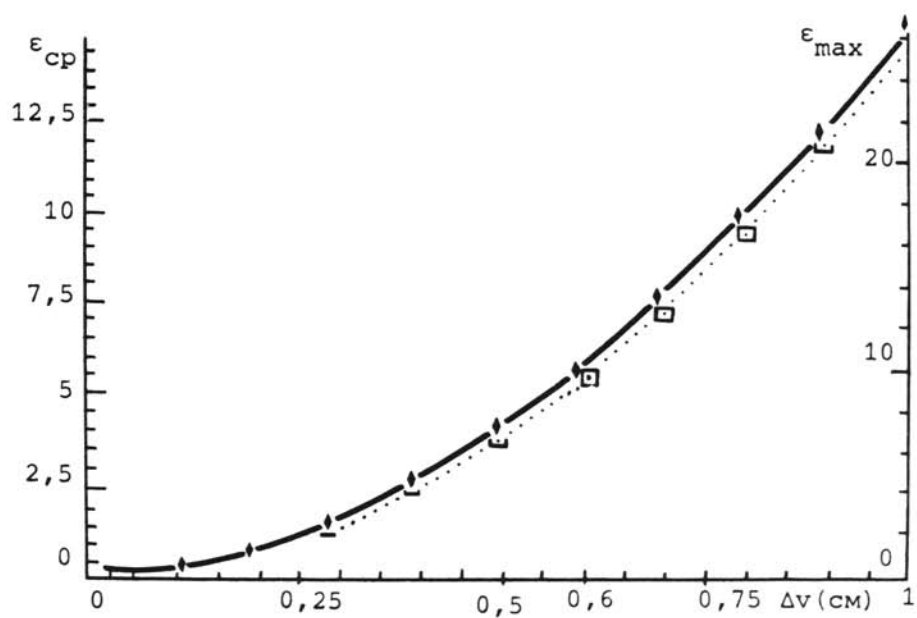


Рис. 7. Зависимость ϵ_{cp} и ϵ_{max} от Δv
(◆ и ◻ соответственно)

можно выбрать тип коррекции (сдвиг, расширение пучка), необходимый для устранения отличия $\tilde{I}(l)$ от I_0 . Повышение устойчивости фокусаторов по отношению к возмущениям интенсивности освещающего пучка возможно при помощи изменения структуры отображения области G на фокальную кривую. Например, построить отображение так, чтобы в края отрезка отображались не только края, но и область из центра фокусатора. Ясно, что при помощи гладкого отображения это сделать невозможно. (В классе гладких функций задача фокусировки в отрезок имеет ровно два решения). Однако фокусатор можно разбить на части, каждая из которых независимо фокусирует излучение во всю кривую $\mathcal{L}$. Наложение нескольких изображений приводит к взаимной компенсации энергетических искажений вдоль каждого из них, однако при этом на изображении возникает интерференционная структура.

В рамках рассматриваемой модели фокусировки гауссова пучка в отрезок с равномерным распределением интенсивности исследовано разбиение фокусатора на две равные части. Фокусатор разделен вдоль оси OV , из двух возможных решений выбрано отображение, симметричное относительно оси OV . В этом случае верхний край фокусатора и часть центра под осью OV отображаются в верхний край отрезка, а нижний край фокусатора и часть центра над осью OV - в нижний край отрезка.

На рисунках 8-13 показана зависимость $\tilde{I}(l)$, $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} для тех же типов возмущений, что и на рис. 2-7. Характер зависимости $\tilde{I}(l)$ от типа возмущения сохраняется, а величина погрешности уменьшается. Например, $\epsilon_{\text{max}} = 10\%$ достигается при $\Delta u = 0,12$ см, или $\Delta v = 0,66$ см, или $\Delta \omega = 0,16$ см. Наибольшее повышение устойчивости достигается по отношению к сдвигу вдоль оси OU , так как здесь лучше происходит компенсация искажений интенсивности каждого из двух изображений, создаваемых двумя частями фокусатора. Возможна и другая структура отображения области G на отрезок $\mathcal{L}$ при том же разбиении фокусатора на части, при которой верхний и нижний края фокусатора отображаются в верхний край отрезка, а центр фокусатора - в нижний край отрезка. Однако при таком отображении увеличение устойчивости меньше, чем в первом случае.

Изготовлены фокусаторы для CO_2 - лазера ($\lambda = 10,6$ мкм), состоящие из одной и двух частей ($f = 40$ см, $L = 1,2$ см). Фокусаторы изготовлены по стандартной технологии создания вымывного рельефа [1, 2]. Амплитудные маски фокусаторов, на которых плотность почернения соответствует высоте рельефа, приведены на рисунках 14 и 15. В качестве регистрирующей среды было выбрано органическое стекло, хорошо поглощающее УК-излучение и имеющее невысокий коэффициент теплопроводности. Фокусатор был рассчитан для одномодового лазера, однако эксперимент проводился для одномодового и многомодового лазеров. Время экспозиции для одномодового лазера составляло несколько минут, для многомодового - десятки секунд. Глу-

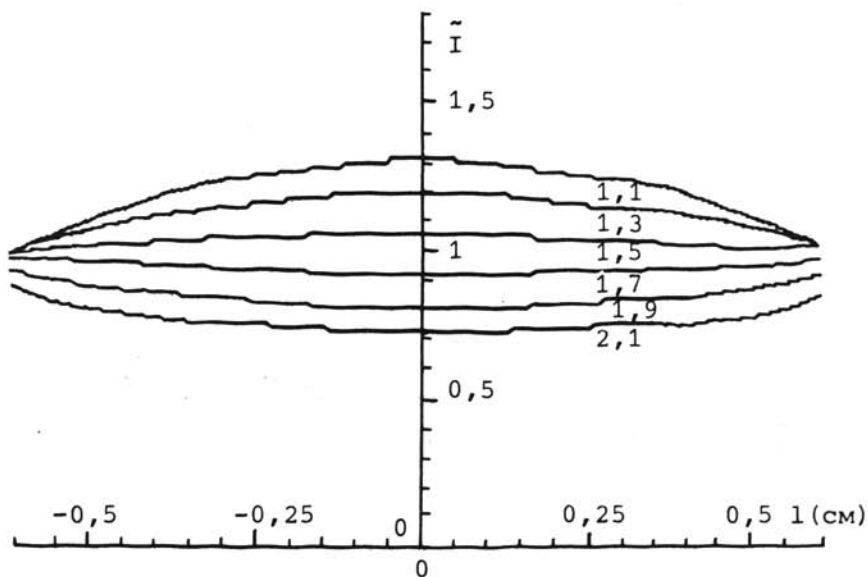


Рис. 8. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\omega=1,1 \div 2,1$ см для фокусатора из двух частей

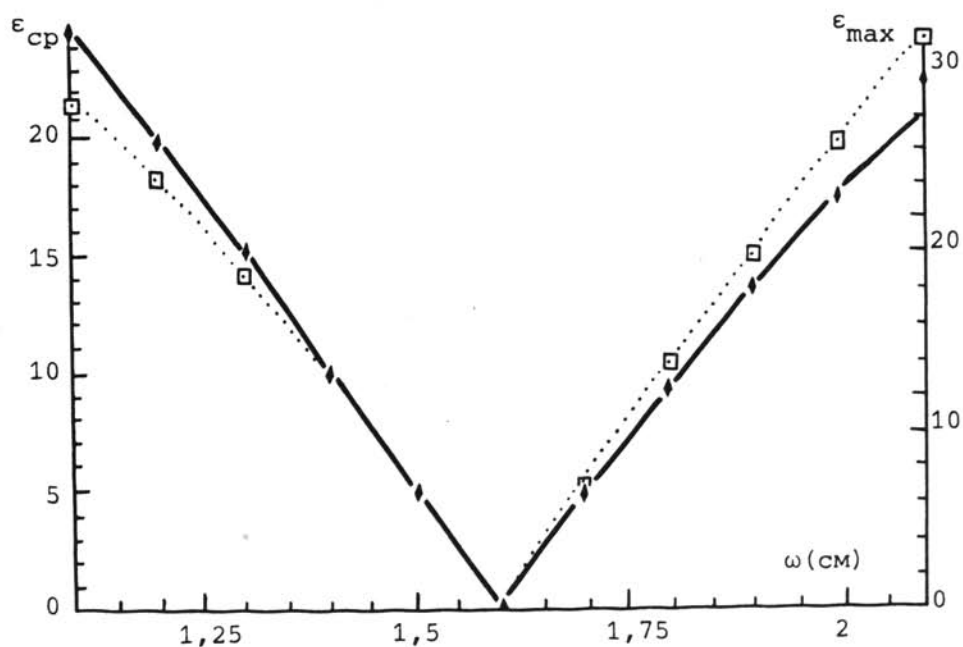


Рис. 9. Зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от ω для фокусатора из двух частей ($\blacklozenge$ и $\square$ соответственно)

бина проплавления стекла качественно характеризует распределение интенсивности вдоль фокального отрезка и дает количественную оценку интерференционного периода при наложении двух изображений. Регистрировалось распределение интенсивности вдоль отрезка для пучка, направленного по

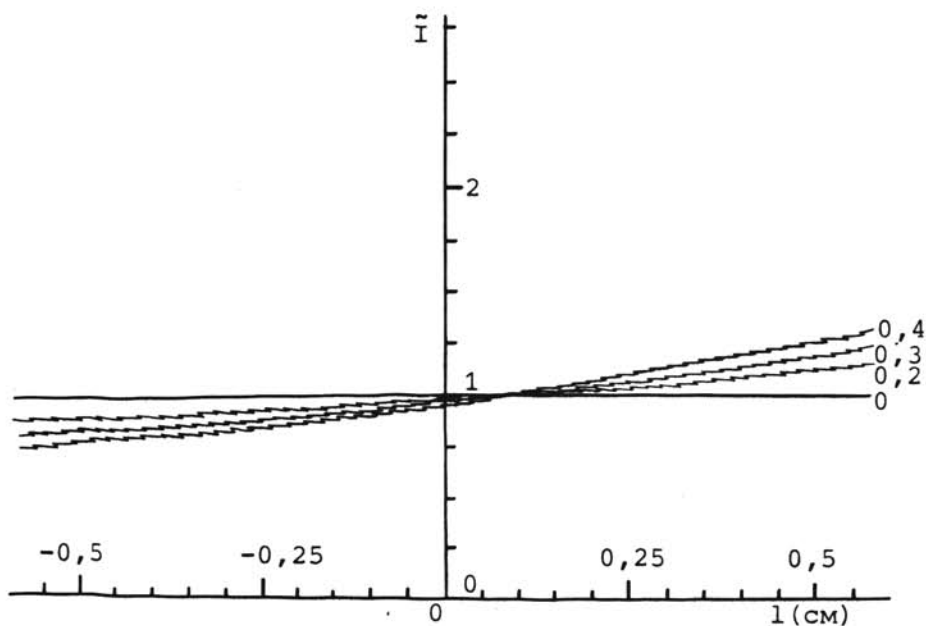


Рис. 10. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\Delta u = 0,2 \div 0,4$ см для фокусатора из двух частей

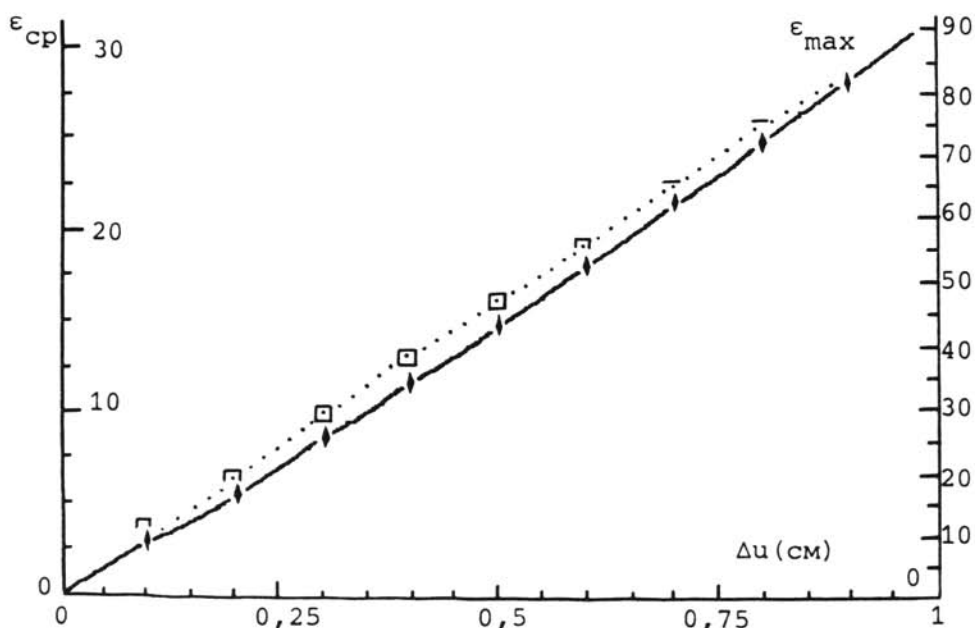


Рис. 11. Зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от Δu для фокусатора из двух частей ($\blacklozenge$ и $\square$ соответственно)

центру фокусатора, и для пучка, сдвинутого вдоль отрезка на величину 5 мм. На рисунках 16 и 17 показан результат работы одномодового лазера для цельного фокусатора соответственно без сдвига и со сдвигом. Падение интенсивности на краях отрезка на рис. 16 объясняется погрешностью юстировки ширины пучка и большей теплоотдачей на краях фокальной линии.

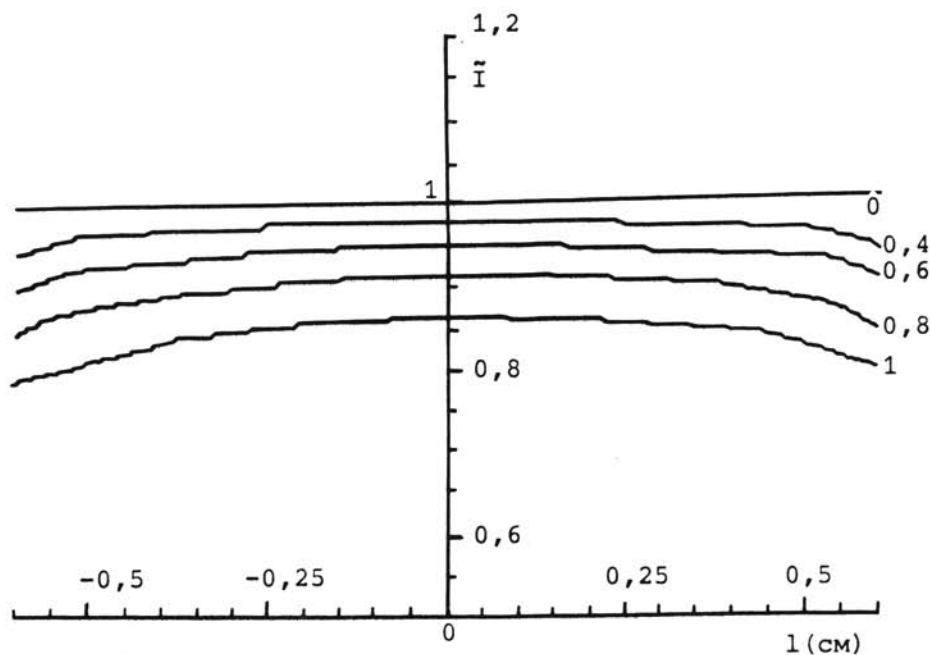


Рис. 12. Распределение интенсивности $\tilde{I}(l)$ при $\Delta v = 0,4 \pm 1$ см для фокусатора из двух частей

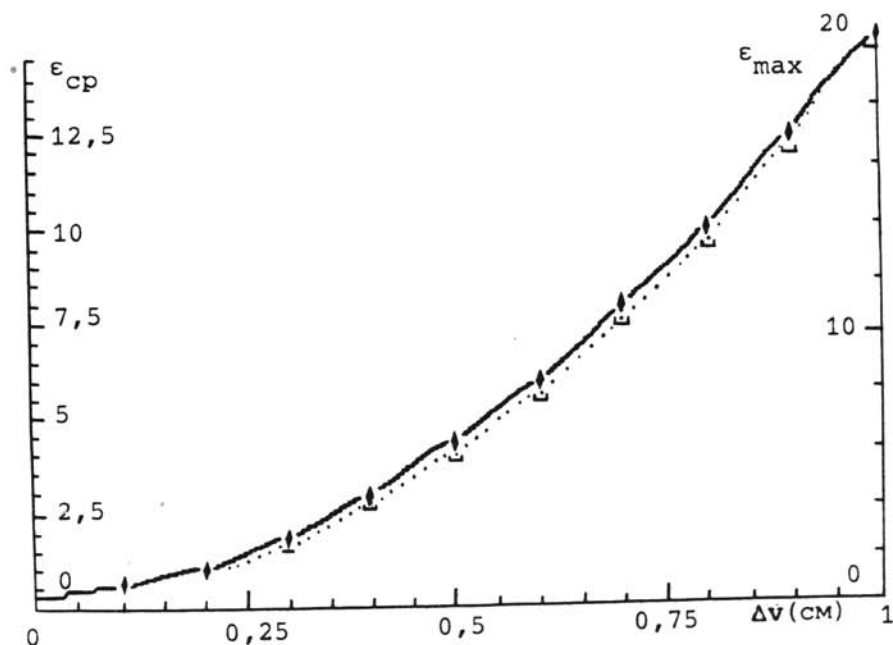


Рис. 13. Зависимость $\epsilon_{\text{ср}}$ и ϵ_{max} от Δv для фокусатора из двух частей ($\blacklozenge$ и $\square$ соответственно)

Аналогичные результаты для разрезанного фокусатора приведены на рисунках 18 и 19. Видна существенно большая устойчивость разрезанного фокусатора к сдвигу. Величина интерференционного периода составила 0,4 мм (на отрезке длиной 1,2 см видно около 30 максимумов), причем изменение

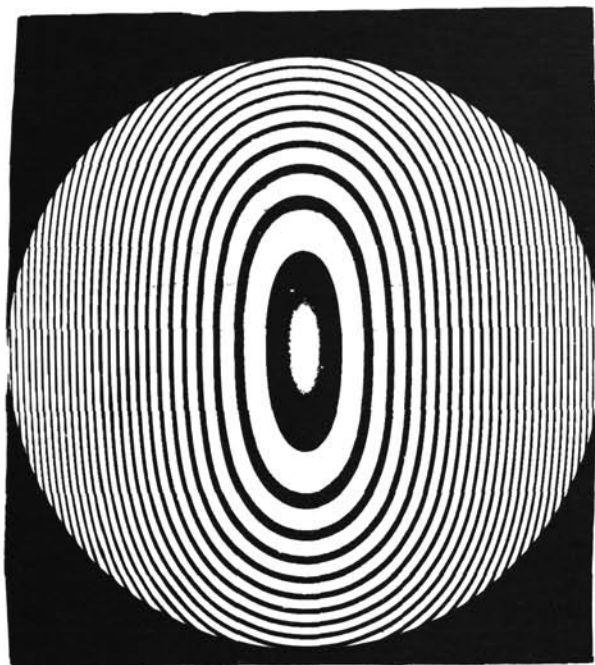


Рис. 14. Амплитудная маска "фокусатора в отрезок"

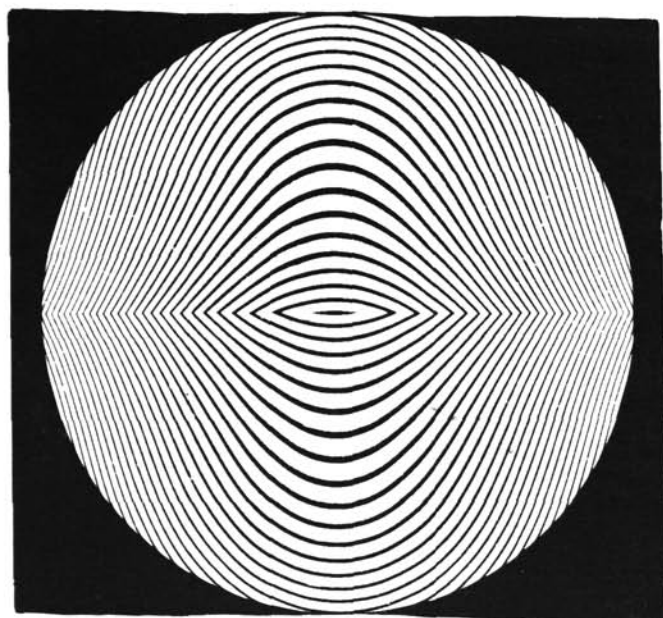


Рис. 15. Амплитудная маска "фокусатора в отрезок", состоящего из двух частей

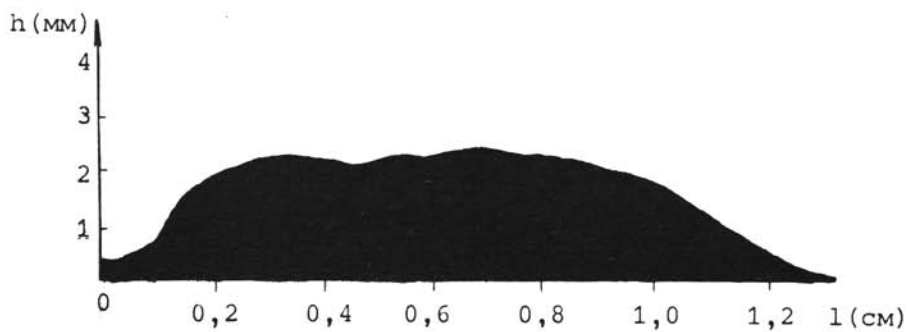


Рис. 16. Глубина проплавления оргстекла (h) в результате работы одномодового лазера (цельный фокусатор)

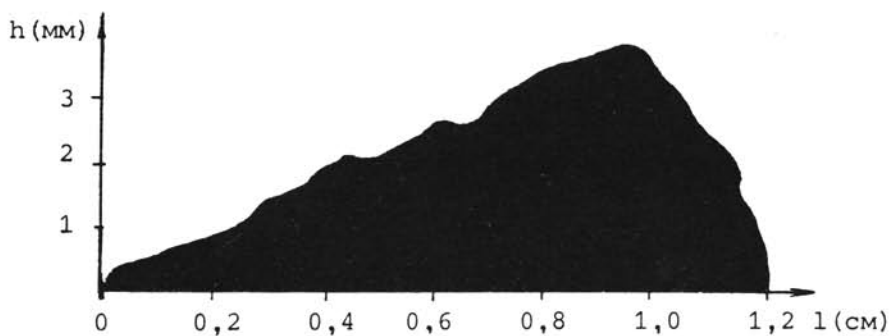


Рис. 17. Результат работы одномодового лазера (цельный фокусатор) со сдвигом

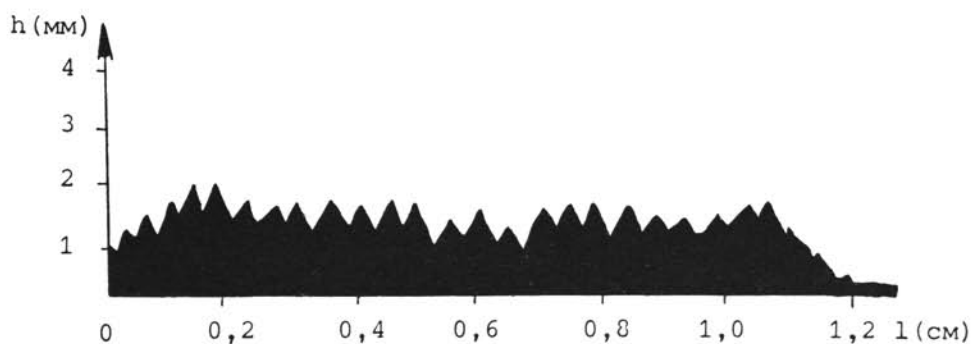


Рис. 18. Результат работы одномодового лазера с фокусатором из двух частей

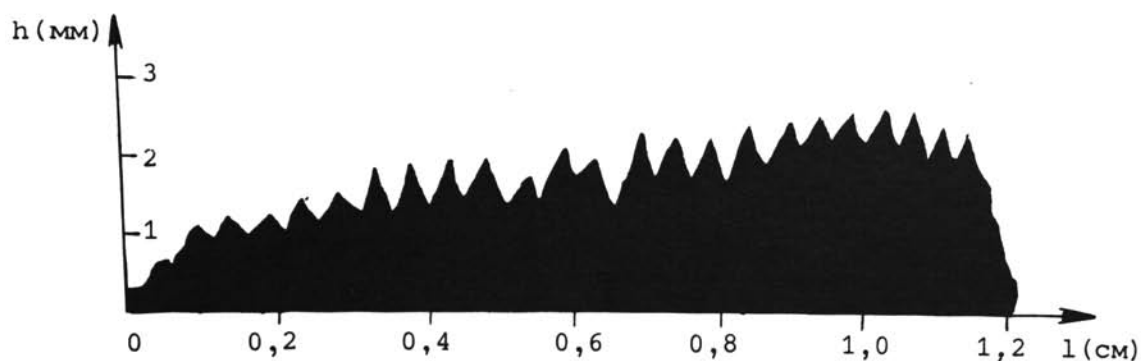


Рис. 19. Результат работы одномодового лазера с фокусатором из двух частей со сдвигом

длины периода вдоль отрезка незаметно. Результаты работы многомодового лазера для цельного и разрезанного фокусаторов (без сдвига) приведены соответственно на рисунках 20 и 21. Повышение интенсивности на краях отрезка вызвано тем, что фокусатор был рассчитан для одномодового лазера. Разрезанный фокусатор дает распределение интенсивности, более близкое к равномерному, что показывает его большую устойчивость к изменению модового состава. Величина периода интерференционной картины для многомодового лазера такая же, как и для одномодового, однако ее видность значительно меньше. Это говорит о том, что для многомодового лазера интерференционная структура изображения, возникающая при разбиении фокусатора на части, не будет служить препятствием для применения лазеров в задачах термоупрочнения поверхности металлов, резки, сварки и т.д.

Увеличение числа частей позволит повысить устойчивость фокусатора и уменьшить интерференционные эффекты.

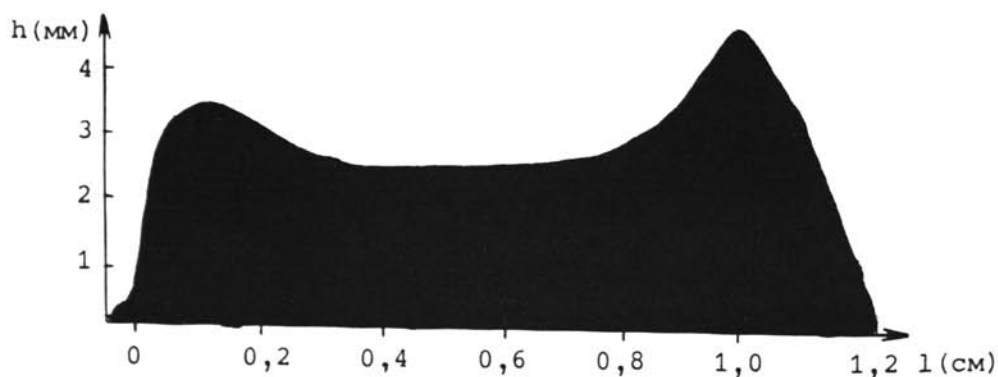


Рис. 20. Результат работы многомодового лазера с цельным фокусатором

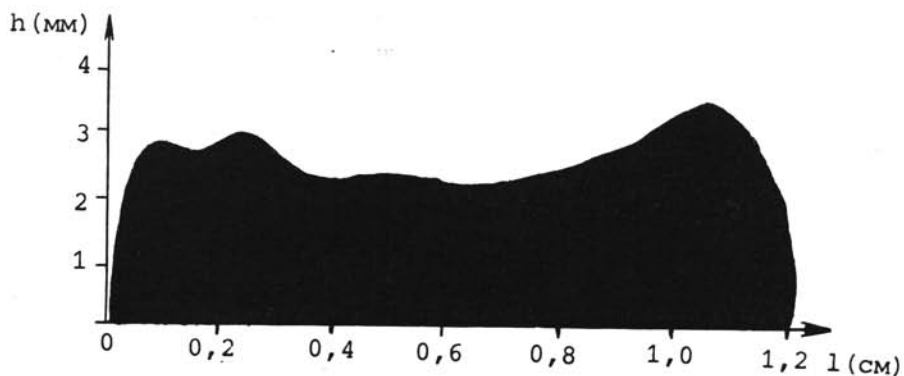


Рис. 21. Результат работы многомодового лазера с фокусатором из двух частей

Л и т е р а т у р а

1. Д а н и л о в В.А., П о п о в В.В., П р о х о -
 р о в А.М., С а г а т е л я н Д.М., С и с а к я н Е.В.,
 С и с а к я н И.Н., С о й ф е р В.А. Оптические элементы, фо-
 кусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную линию.
 Препринт ФИАН, № 69, М., 1983.

2. Г о н ч а р с к и й А.В., Д а н и л о в В.А., П о -
 п о в В.В., П р о х о р о в А.М., С и с а к я н И.Н., С о й -
 ф е р В.А., С т е п а н о в В.В. - ДАН СССР, 1983, т. 273,
 № 3, с. 605-609.