

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

О.И. Васильев, С.С. Лебедев

КОМПЕНСАЦИЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВРМБ-ЗЕРКАЛОМ
С ОГРАНИЧЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ

Численно и экспериментально исследуется влияние размеров ОВФ-ВРМБ-зеркала на качество компенсации им фазовых искажений лазерного пучка. Анализируется характер искажений углового спектра отраженного излучения ВРМБ-зеркалом с ограниченными размерами. Показано, что искажающие факторы, действующие на отраженную волну: дифракция на ограниченной апертуре зеркала и неточность обращения волнового фронта при ВРМБ — влияют друг на друга. Выяснено, что при фиксированных размерах ВРМБ-зеркала параметр точности коррекции уменьшается с удалением фазоискажающей среды от зеркала. Этот эффект наблюдается как при полном, так и при частичном перехвате падающего на зеркало излучения.

Использование зеркал, обращающих волновой фронт (зеркал ОВФ), для коррекции фазовых искажений лазерных пучков в атмосфере является одним из перспективных направлений атмосферной адаптивной оптики [1–4]. Качество компенсации искажений при ОВФ может значительно ухудшаться вследствие потери информации о волновом фронте отражаемого излучения. В [5] экспериментально изучен характер искажений пространственного спектра отраженного излучения при наличии апертурных потерь на ОВФ-зеркале, собранном по схеме беспорогового отражения на бриллюэновской нелинейности. Теоретические исследования влияния размеров зеркала ОВФ на точность коррекции искажений светового пучка в случайно-неоднородной среде проведено в [1, 6, 7]. В этих работах предполагалось, что в пределах ограниченной области зеркала имеет место идеальное ОВФ. Из результатов [5–7], в частности, вытекает, что с увеличением расходимости излучения, внесенной фазоискажающей средой, точность коррекции искажений ОВФ-зеркалом с ограниченными размерами падает. Для компенсации фазовых искажений наиболее часто применяют зеркала, в которых ОВФ наблюдается при вынужденном рассеянии Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ), сфокусированном в активную среду светового пучка (зеркала ВРМБ). При этом ОВФ существенно отличается от предполагаемого обращения в исследованиях [1, 5–7].

В настоящей работе численно и экспериментально исследуется влияние размеров ВРМБ-зеркала на качество компенсации им фазовых искажений оптического излучения.

1. Математическое моделирование

Моделировалось прохождение первоначально гауссова светового пучка накачки вдоль оси z . Пучок падал на неоднородную среду, которая находилась при $z = z_1$. Предполагалось, что среда имеет вид фазового экрана с коэффициентом прозрачности $e^{i\varphi}$, где φ — изменение фазы. После прохождения фазового экрана при $z_1 < z < z_2$ пучок распространялся в свободном пространстве. Затем при $z = z_2$ он пропусклся через приемную апертуру зеркала ОВФ и фокусировался идеальной линзой в нелинейную среду. Эта среда располагалась при $z_2 < z \leq z_3$. В ней возбуждалось ВРМБ. Стоксова волна распространялась навстречу волне накачки.

Система уравнений для комплексных амплитуд волн накачки A_n и стоксовой компоненты A_c , учитывающая лишь одну поперечную координату x в декартовых координатах (x, z) имеет вид

$$\left(2i\kappa_0 \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) A_n = 0, \quad 0 \leq z \leq z_2; \quad (1)$$

$$\left(2i\kappa \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) A_n = 0, \quad z_2 < z \leq z_3; \quad (2)$$

$$\left(2i\kappa \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + i\kappa g |A_n|^2\right) A_c = 0, \quad z_2 < z \leq z_3; \quad (3)$$

$$\left(2i\kappa_0 \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) A_c = 0, \quad 0 \leq z \leq z_2, \quad (4)$$

где $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число в вакууме; λ — длина волны излучения; $\kappa = \kappa_0\sqrt{\varepsilon}$ — волновое число в активной среде; ε — диэлектрическая проницаемость этой среды, g — коэффициент усиления ВРМБ. Для первоначально гауссова пучка накачки при $z = 0$ распределение комплексной амплитуды поля имеет вид

$$A_n(\mathbf{x}, 0) = \sqrt{I_0} \exp(-2x^2/a_0^2), \quad (5)$$

где a_0, I_0 — соответственно эффективный размер и интенсивность на оси пучка.

Функции $A_n(x, z)$ и $A_c(x, z)$ в точках $z = z_1$ и $z = z_2$ терпят разрывы и представляются в виде

$$A_n(\mathbf{x}, z_1) = A_n(\mathbf{x}, z_1 - 0) \exp(i\varphi), \quad (6)$$

$$A_c(\mathbf{x}, z_1) = A_c(\mathbf{x}, z_1 + 0) \exp(i\varphi), \quad (7)$$

$$A_n(\mathbf{x}, z_2) = A_n(\mathbf{x}, z_2 - 0) f(x) \exp\left(i\kappa_0 \frac{x^2}{2z_f}\right), \quad (8)$$

$$A_c(\mathbf{x}, z_2) = A_c(\mathbf{x}, z_2 + 0) f(x) \exp\left(i\kappa_0 \frac{x^2}{2z_f}\right). \quad (9)$$

В (8), (9) z_f — радиус фокусировки, $f(x)$ — функция пропускания приемной апертуры зеркала ОВФ. В дальнейшем эта функция бралась в виде $f(x) = \exp[-(2x/b)^{-10}]$, где b — эффективный размер приемной апертуры.

Для стоковой компоненты, возникающей из шумов, можно принять, что при $z = z_3$

$$A_c(\mathbf{x}, z_3) = \tilde{A}(\mathbf{x}), \quad (10)$$

где \tilde{A} — случайное поле. Среднеквадратическое отклонение $|\tilde{A}|$ (уровень затравочного сигнала стоковой компоненты)

$$\sigma = 10^{-m} \sqrt{I_0}, \quad (11)$$

где m равно примерно 4–6 [8, 9].

Система уравнений (1)–(4) с граничными условиями (5)–(10) решалась численно для конкретной модели фазового экрана [10] $\varphi = \varphi_0 \cos(2\pi x/d)$, где φ_0 — глубина модуляции оптического пути, d — период регулярной фазовой решетки. Расчеты проводились для следующих параметров излучения накачки: длина волны $\lambda = 1,06$ мкм, начальный размер пучка $a_0 = 0,6$ см. Радиус фокусировки $z_f = 12$ см. Остальные параметры задачи варьировались. Вычислялись распределения комплексных амплитуд волн накачки $A_n(x, z)$ и стоковой компоненты $A_c(x, z)$, угловые спектры функций $A_n(x, z)$, $A_c(x, z)$:

$$F_n(\kappa_x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A_n(\mathbf{x}, z) \exp(-i\kappa_x \mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (12)$$

$$F_c(\kappa_x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A_c(\mathbf{x}, z) \exp(-i\kappa_x \mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (13)$$

а также параметр точности коррекции фазовых искажений ВРМБ-зеркалом W_2/W_1 , где W_1 — полная энергия излучения стоковой компоненты, а W_2 — энергия этого излучения, прошедшего через фазовый экран в дифракционном угле для исходного пучка накачки.

Результаты расчетов квадратов модуля углового спектра излучений накачки и стоковой компоненты, нормированных на свои максимальные значения, в плоскости приемной апертуры ОВФ-зеркала приведены на рис. 1. По горизонтальной оси отложена компонента углового вектора κ_x , нормированная на ширину углового спектра κ_0 пучка накачки при $z = 0$, по вертикальной оси — нормированный квадрат модуля углового спектра. Рассматриваются два случая: когда все излучение накачки перехватывается зеркалом с апертурой $b = 20$ см (рис. 1, а) и когда на зеркало, имеющее $b = 0,3$ см, попадает только его часть (рис. 1, б). Расстояние между фазовым экраном и плоскостью приемной апертуры $\rho_0 = z_2 - z_1 = 50$ см. Период фазовой решетки $d = 150$ мкм, глубина модуляции $\varphi_0 = 1$. На рис. 1, а, б кривой 1 представлен нормированный квадрат модуля углового спектра излучения накачки до его прохода через приемную апертуру зеркала. На рис. 1, б кривой 2 показаны эти функции после прохода этого излучения через приемную апертуру зеркала до линзы; кривой 3 дается

нормированный квадрат модуля углового спектра стоксовой компоненты после линзы до прохода излучения через приемную апертуру, и на рис. 1, а, б кривой 4 — функция после прохода через апертуру.

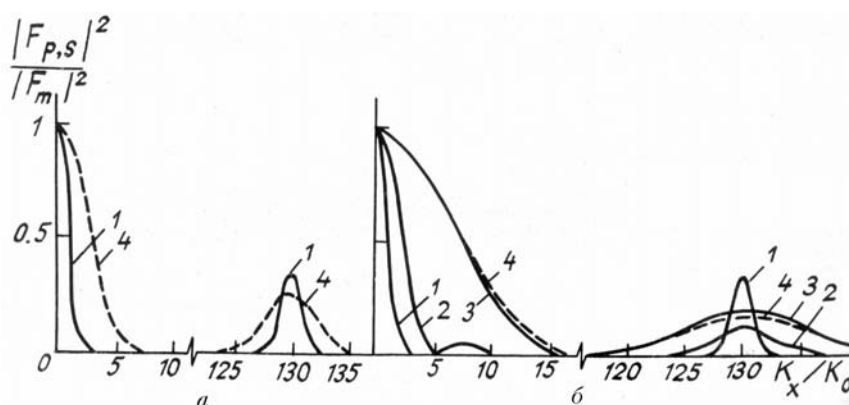


Рис. 1. Нормированные квадраты модуля углового спектра излучений накачки (кривые 1, 2) и стоксовой компоненты (кривые 3, 4); $b = 20$ см (а) и $b = 0,3$ см (б)

Падающий на зеркало ОВФ пучок после прохождения фазового экрана состоит из двух частей: нерассеянной и рассеянной (кривые 1). Из рис. 1, а отчетливо видно, что даже при отсутствии апертурных потерь ВРМБ-зеркалом полностью не восстанавливается угловой спектр падающего на него излучения. Обе части углового спектра отраженного излучения, соответствующие как рассеянной, так и нерассеянной частям пучка накачки, уширяются. В случае, когда не все излучение накачки перехватывается зеркалом (рис. 1, б), вследствие дифракции волны накачки на его апертуре происходит уширение спектров рассеянной и нерассеянной части пучка (кривая 2, рис. 1, б). Соответствующие части углового спектра излучения стоксовой компоненты становятся еще шире (кривая 3 рис. 1, б). При прохождении через диафрагму отраженного пучка его угловой спектр практически не изменяется (кривая 4, рис. 1, б), т. к. этот пучок уже, чем диафрагма. В конечном счете, уменьшение размеров ВРМБ-зеркала приводит к ухудшению восстановления углового спектра падающего на него излучения и точность коррекции фазовых искажений ухудшается.

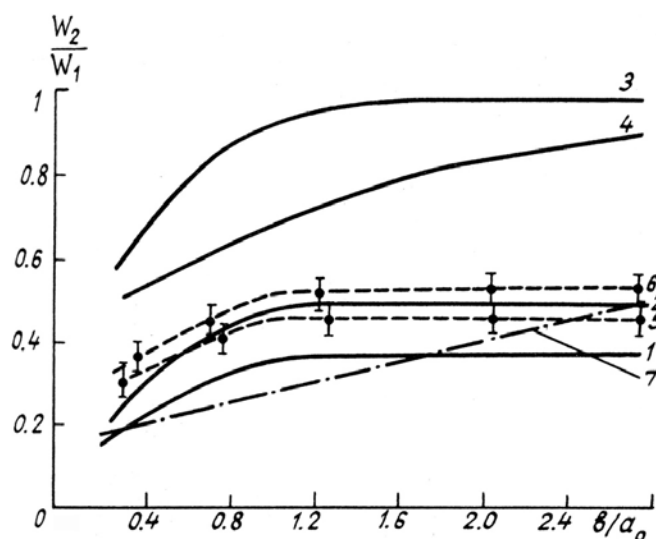


Рис. 2. Зависимость параметра точности коррекции от нормированного размера приемной апертуры зеркала при фиксированных φ_0 , ρ_0 и различных d : 1–4, 7 — расчет, 5, 6 — эксперимент

На рис. 2 кривыми 1–4 представлены полученные в расчетах зависимости параметра точности коррекции от нормированного на начальный размер пучка размера приемной апертуры зеркала ОВФ. Глубина фазовой модуляции φ_0 и расстояние между фазовым экраном и зеркалом такие же, как для рис. 1. Период фазовой решетки $d = 150$ мкм (кривые 1 и 3) и $d = 60$ мкм (кривые 2 и 4). Кривые 1, 2 — для ОВФ при ВРМБ сфокусированных пучков, они получены путем численного решения системы (1)–(4) при $0 \leq z \leq z_3$. Кривые 3, 4 получены численным решением уравнения (1), (4) при $0 \leq z < z_2$ в предположении, что в пределах ограниченной области зеркала имеет место идеальное ОВФ: $A_c(x, z_2) = f(x)A_n(x, z_2)$.

Из рис. 2 видно, что как при ВРМБ сфокусированных пучков, так и при идеальном ОВФ параметр точности коррекции падает с уменьшением размера апертуры ОВФ-зеркала при фиксированном

периоде фазовой решетки. При фиксированном размере апертуры зеркала в случае ВРМБ сфокусированных пучков параметр точности коррекции может расти с уменьшением периода фазовой решетки, а в случае идеального ОВФ он падает. Параметр W_2/W_1 выше для зеркала, осуществляющего идеальное ОВФ, чем для зеркала тех же размеров, в котором происходит ОВФ при ВРМБ сфокусированных пучков.

Результаты, представленные на рис. 2, можно объяснить тем, что с уменьшением периода фазовой решетки увеличивается число неоднородностей в падающем на зеркало пучке и его «серая» расходимость. Это приводит к ухудшению качества компенсации фазовых искажений зеркалом с ограниченными размерами и идеальным ОВФ [6], а в случае ВРМБ сфокусированных пучков к уменьшению «змеечных искажений» обращенных волн и улучшению качества компенсации [9].

На обращенную волну, сформированную ВРМБ-зеркалом с ограниченными размерами, действуют два искажающих фактора: дифракция на ограниченной апертуре зеркала и искажения, обусловленные неточностью обращения волнового фронта при ВРМБ (неидеальность обращения). Если бы эти два фактора действовали независимо друг от друга на обращенную волну, то параметр точности коррекции W_2/W_1 зеркала ОВФ-ВРМБ с ограниченными размерами равнялся бы произведению $K_1 \cdot K_2$, где K_1 — параметр точности коррекции идеального ОВФ-зеркала тех же размеров, а K_2 — параметр точности коррекции ВРМБ-зеркала в случае полного перехвата падающего на него излучения. На рис. 2 кривой 7 показана зависимость произведения $K_1 \cdot K_2$ от b/a_0 для случая, соответствующего кривой 2 ($\rho_0 = 50$ см, $\varphi_0 = 1$, $d = 150$ мкм). Видно, что кривые 2 и 7 не совпадают друг с другом. Таким образом, указанные выше искажающие факторы нельзя рассматривать отдельно друг от друга.

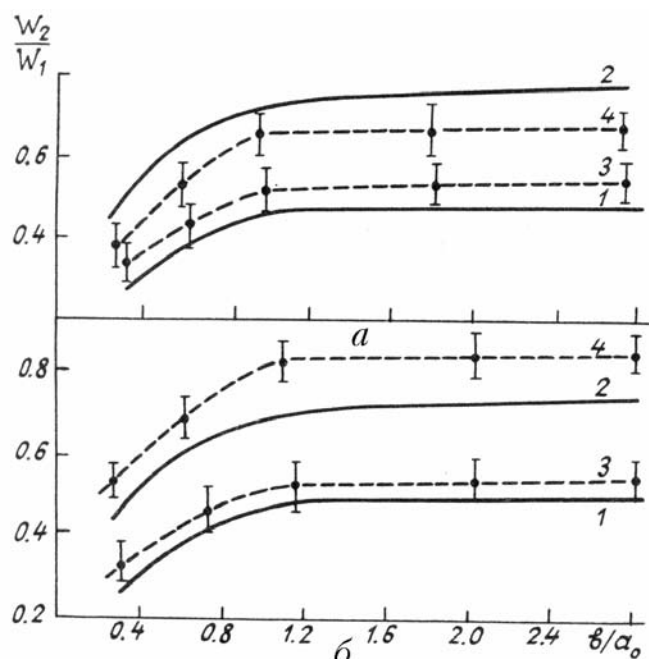


Рис. 3. Зависимость параметра точности коррекции от нормированного размера приемной апертуры зеркала при фиксированных ρ_0 , d и различных φ_0 : 1, 2 — расчет, 3, 4 — эксперимент

На рис. 3, а кривыми 1, 2 показаны полученные в расчетах зависимости параметра точности коррекции от нормированного на начальный размер пучка размера приемной апертуры ВРМБ-зеркала при различной глубине фазовой модуляции φ_0 . Кривая 1 для случая $\varphi_0 = 1$, кривая 2 для случая $\varphi_0 = 0,2$. Расстояние между фазовым экраном и зеркалом и период фазовой решетки фиксированы: $\rho_0 = 50$ см, $d = 60$ мкм. Из рисунка видно, что с уменьшением глубины фазовой модуляции при фиксированных параметрах ρ_0 , d , b параметр точности коррекции растет.

На рис. 3, б кривыми 1, 2 представлены полученные в расчетах зависимости параметра точности коррекции от нормированного размера приемной апертуры ВРМБ-зеркала при различном расстоянии между фазовым экраном и зеркалом. Кривая 1 для $\rho_0 = 50$ см, а кривая 2 — $\rho_0 = 0,2$ см. Глубина фазовой модуляции и период фазовой решетки фиксированы: $\varphi_0 = 1$, $d = 60$ мкм. Хорошо видно, что с уменьшением расстояния между фазовым экраном и зеркалом при фиксированных параметрах φ_0 , d , b параметр точности коррекции растет. Расчеты показали, что этот рост наиболее существен, если $z_0 < z_k = \kappa_0 d^2$, где z_k — продольный масштаб неоднородностей поля накачки после фазового экрана.

Приведенные выше результаты практически не изменяются при вариациях уровня начальной «затравки» σ . Так, при изменении параметра m в (11) от 4 до 6 относительное изменение W_2/W_1 составляет не более 5%.

2. Эксперимент

Измерения параметра коррекции искажений, вносимых в излучение различными фазовыми пластинками, проводились ОВФ-ВРМБ-зеркалом. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Одномодовый пучок неодимового лазера 1 (длина волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм, длительность импульса по полувысоте 40 нс, энергия до 1 Дж, диаметр пучка 0,6 см) проходил через фазовую пластинку 2, а затем после распространения в свободном пространстве падал на ОВФ-зеркало. Размер апертуры зеркала варьировался при помощи апертурной диафрагмы 3, помещенной перед линзой 4. Линза 4 с фокусным расстоянием 12 см фокусировала пучок в кювету 5 с четыреххлористым углеродом, где возбуждалось ВРМБ. Длина кюветы 25 см. Полная энергия пучка W_1 после его отражения от ВРМБ-зеркала измерялась калориметром 6. Калориметром 7 в сочетании с диафрагмой 8 измерялась энергия W_2 в угле, близком к дифракционному, отраженного от ВРМБ-зеркала и прошедшего через фазовую пластинку излучения. Параметром точности коррекции искажений излучения является отношение энергии W_2/W_1 .

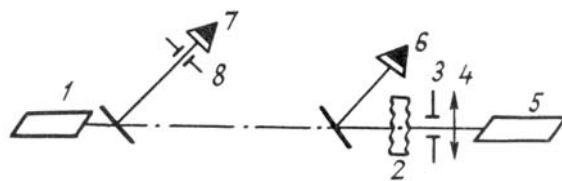


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

На рис. 2 кривыми 5, 6 представлены полученные в эксперименте зависимости параметра точности коррекции от нормированного на начальный размер пучка размера приемной апертуры ВРМБ-зеркала для фазовых пластинок с различными средними поперечными размерами неоднородностей. Для кривых 5, 6 средние поперечные размеры неоднородностей фазовых пластинок приблизительно равны периодам фазовых решеток соответственно для кривых 1 и 2. Расстояние между фазовой пластинкой и ВРМБ-зеркалом, а также средняя глубина фазовой модуляции фиксированы: они такие же, как и для кривых 1, 2. Экспериментальные кривые 5, 6 лежат близко к кривым 1, 2, полученным численным решением системы уравнений (1)–(4).

На рис. 3, а кривыми 3, 4 показаны экспериментальные зависимости параметра точности коррекции от нормированного размера приемной апертуры ВРМБ-зеркала для фазовых пластинок, дающих различную среднюю глубину фазовой модуляции излучения. Для кривых 3, 4 средние глубины фазовой модуляции приблизительно равны глубинам фазовой модуляции соответственно для кривых 1 и 2. Расстояние между фазовой пластинкой и ВРМБ-зеркалом, а также средний размер неоднородностей фиксированы: они такие же, как и для кривых 1, 2. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с результатами, полученными в расчетах.

На рис. 3, б сопоставляются экспериментальные (кривые 3, 4) и теоретические (кривые 1, 2) результаты. Здесь представлены зависимости параметра точности коррекции от нормированного эффективного размера ВРМБ-зеркала для различных расстояний между фазовой пластинкой (фазовым экраном) и зеркалом. Для кривых 3, 4 эти расстояния такие же, как и для случаев кривых 1 и 2 соответственно. Для кривых 3, 4 средний поперечный размер неоднородностей и средняя глубина фазовой модуляции фиксированы: они такие же, как и для кривых 1 и 2. Из рисунка видно, что экспериментальные результаты согласуются с теоретическими.

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования показывают, что при фиксированных размерах ВРМБ-зеркала параметр точности коррекции уменьшается с увеличением глубины фазовой модуляции падающего излучения и с удалением фазоскажущей среды от зеркала. В отличие от случаев идеального ОВФ [1, 6, 7] или зеркала ОВФ, собранного по схеме беспорогового отражения [5], при фиксированном размере зеркала с увеличением в некотором диапазоне расходимости излучения, падающего на зеркало, в котором ОВФ имеет место при ВРМБ сфокусированного пучка, параметр точности коррекции может расти. Искажающие факторы, действующие на обращенную волну: дифракция на ограниченной апертуре зеркала и неточность обращения волнового фронта при ВРМБ, влияют друг на друга.

В заключение авторы выражают благодарность И.П. Бельдюгину и В.В. Шкунову за ценные обсуждения.

1. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
2. Васильев О.И., Лебедев С.С., Семенов Л.П. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2347.
3. Васильев О.И., Лебедев С.С., Семенов Л.П. //Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 4. С. 40.
4. Васильев О.И., Лебедев С.С. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 2. С. 174.
5. Аникеев И.Ю., Гордеев А.А., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. С. 351.

6. Половинкин А.В., Саичев А.И. //Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 4. С. 433.
7. Лебедев С.С. //Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 4. С. 439.
8. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 248 с.
9. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1986. 134 с.
10. Ивахник В.В., Петникова В.М., Шувалов В.В. //Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 4. С. 774.

Научно-производственное объединение «Тайфун»,
Обнинск

Поступила в редакцию
19 февраля 1990 г.

O.I. Vasil'ev, S.S. Lebedev. Compensation of Phase Distortions by the Limited Dimension SBS-Mirror.

The quality of laser beam phase distortions compensation as a function of the PC-SBS-mirror dimensions is investigated both numerically and experimentally. The spectrum distortions character of reversed by the limited dimensions SBS-mirror beam is analyzed. It is shown, that the distortion factors acting on the reversed wave, i. e. the diffraction on the limited aperture of the mirror and SBS-mirror wave front reversing inaccuracy, influence on each other. It is found, that when dimensions of the mirror are fixed, the correction accuracy parameter decreases with the increase of the distance between the mirror and the phase distorting medium. This effect takes place when either the whole beam or its part only are intercepted by the mirror.