

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО КОРРЕКТОРА ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ

А.С. Коряковский, В.М. Марченко, А.М. Прохоров

*Вычислены временные интервалы удовлетворительной коррекции элементарных aberrаций волнового фронта импульсным термооптическим фазовым корректором из флюорита. Определены энергия излучения, необходимая для управления корректором, и его динамический диапазон.*

В работе /1/ рассматривалась возможность осуществления бесконтактной коррекции волновых фронтов путем освещения оптического элемента (например, плоскопараллельной пластины) поглощающимся в нем излучением с заданным распределением интенсивности по апертуре. Созданное таким образом температурное поле в пластине в результате термооптических явлений вызывает соответствующие изменения оптической разности хода по апертуре пластины. Из-за рассасывания температурного поля вследствие процессов теплопередачи время эффективной коррекции ограничено и зависит от амплитуды и характерного масштаба температурного распределения.

В настоящей работе на основе численного решения уравнения теплопроводности определены временные диапазоны эффективной коррекции элементарных типов искажений волнового фронта: наклона, кривизны, косинусоидальной модуляции. Решалась двумерная задача, поскольку перераспределение температуры по направлению распространения корректируемого излучения не влияет на суммарный набег оптической разности хода. Полагалось, что тепловые потоки через границы корректора отсутствуют. Для расчетов был выбран корректор в виде кубика с гранью 1 см из флюорита, для которого управляющим может быть излучение на длине волны 10,6 мкм (CO<sub>2</sub> лазер), а корректируемым — на 1,06 мкм (Nd лазер). Параметры материала, используемые в расчетах, полагались не зависящими от температуры в пределах 0 — 400 °С. Использовался неявный способ разностного представления уравнения теплопроводности, а система разностных уравнений решалась итерационным методом Гаусса — Зейделя /2/ с точностью 0,1%.

Предполагалось, что для заданной aberrации  $\Delta(x, y)$  в корректоре мгновенно создается распределение температуры  $T(x, y)$ , при котором на выходе получается плоская волна. Для этого в каждую точку поверхности корректора должна падать энергия управляющего излучения  $Q(x, y)$ .

$$Q(x, y) = \frac{c\rho}{dn/dT} \frac{\Delta^*(x, y)}{1 - \exp(-kl)}, \quad (1)$$

где  $c, \rho$  — теплоемкость и плотность материала корректора;  $dn/dT = -10^{-5}$  град<sup>-1</sup> — температурный коэффициент показателя преломления;  $k = 1 \text{ см}^{-1}$  — коэффициент поглощения материала корректора на длине волны управляющего излучения /3/;  $l$  — толщина корректора;  $\Delta^*(x, y)$  — оптическая разность хода, которую должен внести корректор для полной компенсации aberrации  $\Delta(x, y)$ . Со временем вследствие теплопроводности распределение  $T(x, y)$  меняется и волна на выходе начинает искажаться. При этом в первую очередь искажения возникают в местах наибольшего градиента температуры. Качество коррекции считалось удовлетворительным, если энергия корректируемого излучения в угле, ограниченном направлениями на первые дифракционные минимумы в зоне дифракции Фраунгофера, составляла не менее 90% от максимальной (в случае плоской волны).

Для элементарных типов aberrаций волного фронта вычислены интервалы времени  $\tau$  удовлетворительной коррекции в зависимости от максимального по апертуре корректора температурного перепада  $T_0$  (рис. 1). Значения  $T_0$  в расчетных точках соответствовали углам наклона волнового фронта 25, 50, 100, 200, 400 мрад, радиусам кривизны 500, 250, 125, 62,5, 31,25 см, амплитудам модуляции 2,5, 5, 10, 20, 40 мкм. С уменьшением размера или периода aberrации время  $\tau$  уменьшается. Например, для aberrации типа косинусоидальной модуляции  $\tau$  уменьшается пропорционально квадрату периода модуляции (табл.1).

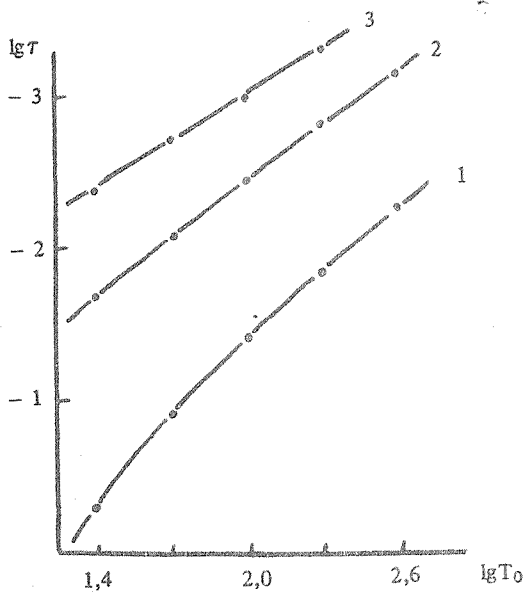


Рис. 1. Зависимости времени удовлетворительной коррекции  $\tau$  (в секундах) от максимального перепада температуры  $T_0$  (в градусах) по апертуре корректора для aberrаций типа наклона волнового фронта (1), кривизны (2), косинусоидальной модуляции (3).

Таблица 1

Зависимость времени удовлетворительной коррекции от периода косинусоидальной модуляции  $p$

$p$ , см	1/3	1/6	1/12	1/24
$\tau$ , мс	4,3	1,1	0,28	0,07

Из (1) следует, что энергия, необходимая для коррекции  $W = \iint Q(x, y) dx dy$ , причем пределы интегрирования ограничены апертурой светового пучка или корректора. Чтобы скомпенсировать наклон волнового фронта на угол  $\alpha$ , кривизну с радиусом  $\pm R$  или косинусоидальную модуляцию с амплитудой  $A$  с помощью корректора из флуорита, необходимо затратить соответственно  $W_\alpha \approx 2 \cdot 10^5 \alpha$ ,  $W_R \approx 5,5 \cdot 10^4 / R$ ,  $W_{-R} \approx 1,1 \cdot 10^5 / R$ ,  $W_A \approx 1,0 \cdot 10^5 A$  джоулей, где  $\alpha$  в радианах,  $R, A$  в сантиметрах.

Динамический диапазон термооптического корректора определяется максимальной оптической разностью хода  $\Delta(x)$ , которую он может внести на единицу поперечного размера корректора, то есть величиной  $\partial \Delta / \partial x = (dn/dT) l (\partial T / \partial x)$ . Величина  $\partial T(x) / \partial x$  ограничена прочностью материала корректора, длина  $l$  — смещением луча перпендикулярно направлению распространения пучка, в результате чего меняется оптическая разность хода. Если градиент температуры ограничен сверху величиной  $M$ , а паразитный набег оптической разности хода, например, величиной  $\lambda / 10$ , то  $\partial \Delta(x) / \partial x < (0,1 \lambda M dn/dT)^{1/3}$ . Например, для флуорита  $\lambda = 10^{-4}$  см,  $M = 100$  град/см,  $\partial \Delta / \partial x \lesssim 20$  мкм/см,  $l < (\lambda / 10)^{1/3} (M dn/dT)^{-2/3} \approx 2$  см.

Использование полного динамического диапазона термооптического корректора связано для флуорита с вложением довольно большой энергии за короткое время ( $< 10^{-3}$  с). Для уменьшения вкладываемой энергии целесообразно использовать термооптический корректор для улучшения качества коррекции после применения простого стационарного корректора типа линзы, клина. Уменьшить затрачиваемую энергию можно путем выбора материала корректора с большим коэффициентом температурной зависимости показателя преломления, меньшей теплоемкостью. Например, для KRS-5 имеем  $dn/dT \approx -2 \cdot 10^{-4}$  для длин волн  $> 0,6$  мкм. Можно также использовать непоглощающие или слабопоглощающие управляющее излучение материалы, если ввести в них нужную концентрацию поглощающих в заданной области длин волн примесей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коряковский А. С., Марченко В. М., Прохоров А. М. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 4, 24 (1987).
2. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране. М., Мир, 1977.
3. Воронкова Е. М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., Наука, 1965.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 25 ноября 1987 г.