

Д.А. Безуглов, З.П. Мastroпас, Е.Н. Мищенко, Э.Н. Мясников, С.В. Толстоусов, В.Л. Тюрников

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ КОРРЕКТОРОВ ФАЗОВОГО ФРОНТА ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3

Приводятся результаты экспериментальных исследований возможности создания корректоров фазового фронта с наперед заданными пространственными модами на основе электрооптических кристаллов LiNbO_3 . Получена методика уточнения формы управляющих электродов. Показано, что предложенный корректор свободен от ряда недостатков, свойственных гибким зеркалам.

В качестве исполнительных устройств для компенсации нестационарных искажений фазового фронта в адаптивных оптических системах обычно используют управляемые зеркала и фазовые транспаранты [1]. Организация оптических обратных связей для систем с фазовыми транспарантами представляет собой достаточно сложную задачу и поэтому к настоящему времени наибольшее распространение в адаптивных системах фазового сопряжения и апертурного зондирования получили различные зеркала, управление которыми осуществляется с помощью электрических сигналов [2, 3, 4].

Наряду с достоинствами такие корректоры фазового фронта обладают и недостатками. Во-первых, с их помощью затруднительно получить функции отклика заданной формы. Во-вторых, им, как системам в общем случае механическим, присущи такие свойства, как гистерезис и запаздывание отклика по фазе [2, 4, 5], что ограничивает их применение в системах без обратной связи. Быстродействие таких корректоров, как правило, также достаточно низко. Очевидно, что создание новых исполнительных устройств для адаптивных оптических систем является актуальной задачей. При этом следует учесть, что одним из перспективных путей развития адаптивных оптических систем является применение в них разложения фазового фронта в виде пространственных мод. С учетом статистических свойств нестационарных искажений фазового фронта оптимальным в таком случае будет базис Карунена-Лоэва. Хорошее приближение к такому базису может быть получено при использовании ортогональных полиномов.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию возможности создания электрооптического корректора фазового фронта, позволяющего корректировать фазовый фронт в виде совокупности наперед заданных пространственных мод.

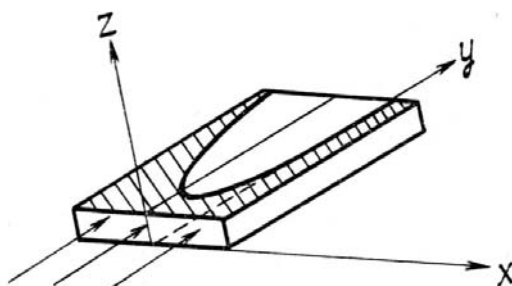


Рис. 1. Схема прохождения оптического излучения через кристалл LiNbO_3 , оси соответствуют обозначениям $x \rightarrow 1$, $y \rightarrow 2$, $z \rightarrow 3$

Рассмотрим принцип действия электрооптического корректора фазы. Для эффективного управления параметрами фазового фронта необходимо использовать кристаллы с достаточно сильным электрооптическим эффектом. Одним из таких кристаллов является кристалл LiNbO_3 . Для обеспечения минимальных управляющих напряжений электроды на кристалле необходимо наносить перпендикулярно сегнетоэлектрической оси, и таким образом, чтобы использовать в работе электрооптический коэффициент r_{33} , являющийся для данного кристалла максимальным. При прохождении оптического излучения в кристалле вдоль оси y (рис. 1) луч, поляризованный вдоль оси z , приобретает дополнительный фазовый сдвиг:

$$\varphi_3^{(x)} = \frac{1}{\lambda} \left[n_l l_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_3 l(x) \right]. \quad (1)$$

Луч, поляризованный вдоль оси x , приобретает фазовый сдвиг:

$$\varphi_1^{(x)} = \frac{1}{\lambda} \left[n_0 l_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{13} E_3 l(x) \right], \quad (2)$$

где $l(x)$ — функция, описывающая форму управляющих электродов, нанесенных с двух сторон на кристалл.

Соответствующим выбором формы электродов можно обеспечить требуемый вид фазовой коррекции в виде одной пространственной моды как функции координаты x . Если кристалл-корректор повернуть вокруг оси y на 90° , то вносимый им сдвиг фаз $\Delta\varphi$ будет зависеть от z и от E . Два таких корректора, включенных последовательно, создадут суммарный фазовый сдвиг вида

$$\Delta\varphi(E, x, z) = A l_0 \left[2 - \frac{E_3}{l_0} (l(x) + l(z)) \right], \quad (3)$$

где $A = \frac{1}{2} n_0^3 r_{33}$.

Зависимость $l(x)$ и $l(z)$ лучше выбирать в виде

$$l_i(x) = \Phi_i(x); \quad l_j(z) = \Phi_j(z), \quad i = \overline{1, N_1} \quad j = \overline{1, N_2}, \quad (4)$$

где $\Phi_i(x)$ и $\Phi_j(z)$ соответствующие ортогональные базисы по x и по z ; N_1, N_2 — число ортогональных функций в выбранном разложении. По существу, N_1 и N_2 соответствуют числу выбранных пространственных мод. Для реализации корректора фазового фронта, способного компенсировать нестационарные искажения произвольного вида, необходимо последовательно расположить N_1 корректоров, вносящих коррекцию вида $l_i(x)$ и N_2 корректоров, вносящих коррекцию вида $l_j(z)$. Суммарный «отклик» корректора запишется в виде

$$\Delta\varphi(x, z) = \sum_{i=0}^{N_1} a_i \Phi_i(x) + \sum_{j=0}^{N_2} b_j \Phi_j(z). \quad (5)$$

Из выражения (2) следует, что достигаемое в кристалле изменение фазы по фронту волны определяется произведением напряженности поля между электродами на максимальную длину пути луча в межэлектронном пространстве кристалла l :

$$\Delta\varphi_{\max} \approx \frac{U}{d} l, \quad (6)$$

где d — толщина кристалла, $d \ll l$.

Границы электродов определяют конфигурацию поля в кристалле с точностью порядка толщины кристалла. Форма управляющего электрода должна изменяться по ширине кристалла по закону $\psi_i(x)$ или $\psi_j(z)$, поэтому ширина входного окна кристалла должна быть значительно больше его толщины. Это требование ведет к необходимости сжатия пучка света в соответствующих плоскостях с помощью цилиндрических линз. При этом элемент корректора, осуществляющий фазовую коррекцию одной пространственной моды излучения, будет представлять собой систему «цилиндрическая линза — кристалл — цилиндрическая линза», причем середина кристалла должна находиться на фокусном расстоянии от линзы. Из простых геометрических соотношений ясно, что ширина цилиндрической линзы должна быть не менее h_k ширины кристалла, а высота линзы — d_l — не менее $d_l \geq d \frac{2F}{l}$, где F — фокусное расстояние.

Приведенные выше выражения для выбора формы электродов справедливы при условии однородности поля между электродами, $d \ll l_0$. Однако при изготовлении корректоров фазы на основе электрооптических кристаллов LiNbO_3 имеет место краевая неоднородность электрического поля. При этом зависимость $\psi_i(x)$ и $\psi_j(z)$ при прохождении светового пучка через кристалл изменяется. В первом приближении оценить такое влияние можно, рассмотрев модельную задачу о распределении электрического поля в конденсаторе с круглыми электродами радиуса R_0 :

$$\psi(R) = \frac{1}{U} \int_0^R E(r) dr, \quad (7)$$

где U — разность потенциалов между двумя электродами; $E(r)$ — напряженность электрического поля вдоль серединной плоскости конденсатора на расстоянии r от его центра. При этом $\psi(R)$ оказывается выраженной в единицах толщины конденсатора.

Результаты расчетов в соответствии с выражением (7) для различных отношений толщины конденсатора к радиусу электродов, значения которого указаны на каждом графике, приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что минимальный размер Δb управляющих электродов вдоль оси y должен быть не менее d .

При $\Delta b > 4d$ влиянием неоднородностей поля можно пренебречь. В остальных случаях это влияние может быть учтено внесением соответствующих поправок в форму электродов при изготовлении элементов корректора в соответствии с рис. 2. Следует отметить, что расстояние от границ кристалла до границ электрода должно быть больше или равно половине толщины кристалла.

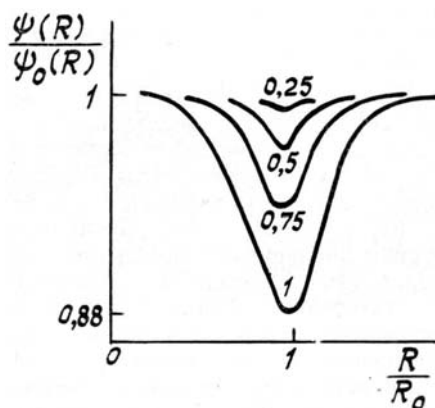


Рис. 2. Формы электродов

Для проведения экспериментальных исследований «были изготовлены элементы корректора фазы на основе кристаллов LiNbO_3 размером $30 \times 20 \times 2$ мм. Форма электродов, изготовленных методом катодного распыления платины, приведена на рис. 3. Для изготовления элементов корректора использовались предварительно отобранные кристаллы, имеющие минимальную неоднородность. Для дальнейшего уменьшения неоднородностей кристаллы были подвергнуты поляризации в соответствии с методикой, описанной в [6]. Форма пространственных мод фазовой коррекции, реализуемых элементами корректора, исследовалась на экспериментальной установке, структурная схема которой показана на рис. 4. Луч ОКГ, поляризованный предварительно поляризатором 2, проходил через кристалл 3, к электродам которого было подведено управляющее напряжение 2 кВ. При этом в области кристалла, находящейся в электрическом поле, показатель преломления оказывается отличающимся от показателя преломления областей, расположенных вне поля. Луч ОКГ, проходя границу между этими областями, преломляясь, меняет направление на угол $\alpha(x)$, пропорциональный производной пространственной моды элемента корректора в данной точке \bar{x} . Величину угла $\alpha(x)$ определяли по величине смещения точки падения луча на экран:

$$\alpha(x) = \beta \frac{\Delta h}{L}, \quad (8)$$

где Δh — величина смещения; β — нормировочный коэффициент.

Экспериментально исследовались образцы A и B (рис. 3). Луч лазера при этом перемещался параллельно длинной стороне кристалла (ось y рис. 1) с шагом, равным толщине луча (1 мм). Реальные пространственные моды элементов корректора восстанавливались на ЭВМ серии ЕС численным интегрированием. Для уменьшения погрешности измерений эксперимент проводился многократно и его результаты были обработаны методами математической статистики. Анализ результатов эксперимента показал, что реальные пространственные моды элементов корректора соответствуют форме электродов с точностью до 20%. Низкая точность обусловлена, по-видимому, неоднородностями кристалла LiNbO_3 и недостаточной точностью эксперимента.

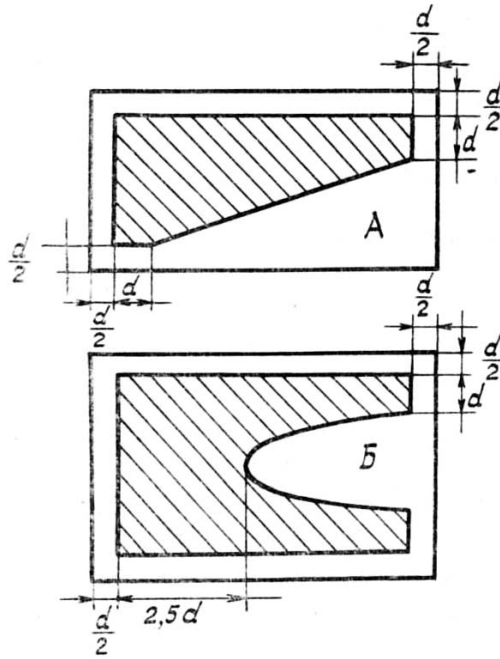


Рис. 3. Форма управляющих электродов на образцах из LiNbO_3 , d — толщина кристалла

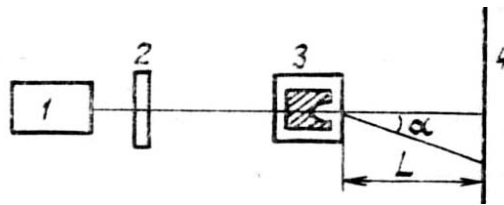


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1—ОКГ-ЛГН-105; 2—поляризатор; 3—исследуемый кристалл; 4—экран; α —угол наклона луча ОКГ при подаче на электроды управляющего напряжения

Для исследования принципиальной возможности применения электрооптических кристаллов LiNbO_3 в адаптивных оптических системах был проведен эксперимент на установке, структурная схема которой представлена на рис. 5. Луч ОКГ 1 типа ЛГН-105 модулировался, коллимировался, после чего в него вносились стационарные фазовые искажения. Затем пучок попадал в корректор, созданный системой «цилиндрическая линза—кристалл—цилиндрическая линза», после чего, проходя через поляризатор и круглую линзу, он фокусировался на точечном фотодетекторе. Суть эксперимента состояла в следующем. При отсутствии управляющего напряжения на кристалле корректора регистрировалась амплитуда огибающей сигнала фотодетектора. Затем в пучок вносились априорно известные фазовые искажения. При этом наблюдалось изменение амплитуды огибающей сигнала фотодетектора в сторону уменьшения. Подбором соответствующего напряжения на управляющих электродах элементов корректора добивались компенсации внесенных фазовых искажений. При проведении эксперимента были исследованы кристаллы с формой электродов, приведенной на рис. 3. Первый соответствовал наклону фазового фронта, второй — дефокусировке типа kx^2 . В результате эксперимента удалось повысить интенсивность на точечном фотодетекторе при компенсации наклонов — в $1,5 \div 1,7$ раза, при компенсации дефокусировки — в $1,7 \div 2$ раза.

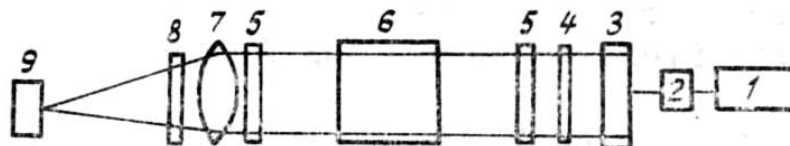


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1—ОКГ-ЛГН-105; 2—модулятор; 3—коллиматор; 4—фазовый транспарант; 5—цилиндрические линзы; 6—кристалл LiNbO_3 ; 7—круглая линза; 8—поляризатор; 9—фотодетектор

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований показана принципиальная возможность использования электрооптических кристаллов для коррекции фазовых искажений. Преимуществами электрооптических кристаллов является отсутствие гистерезиса. Оптические потери в кристалле LiNbO_3 малы и с использованием просветления могут составлять всего около 2%. Однако следует отметить, что основным недостатком кристаллов ниобата лития — их малая лучевая стойкость ($\xi \leq 100$ мВт/см²), ограничивающая рабочую плотность мощности величиной 30–50 МВт/см² [7]. На базе электрооптических кристаллов могут быть созданы корректоры фазы с наперед заданными свойствами, т.к. вид пространственной моды зависит только от формы управляющих электродов, которая, в свою очередь, может быть произвольна. Существенным преимуществом адаптивных оптических систем с корректорами на основе электрооптических кристаллов является полная независимость каналов управления. При использовании для организации управления алгоритмов апертурного зондирования это позволит увеличить скорость сходимости системы к максимуму функционала качества [8, 9].

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
2. Воронцов М.А., Кудряшов А.В., Самаркин В.В. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 118–121.
3. Безуглов Д.А., Мastroпас З.П., Мищенко Е.Н. и др. //Оптика атмосферы, 1989. Т. 2. № 12. С. 1305–1309.
4. Кудряшов А.В., Тихонов В.А., Шмальгаузен В.Н. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 61–66.
5. Аполонov В.В., Прохоров А.М., Темнов С.Н. и др. //Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 12. С. 2578–2580.
6. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
7. Рез И.С., Поплавко Ю.Н. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
8. Безуглов Д.А. //Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 8. С. 1612–1616.
9. Безуглов Д.А. //Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 3. С. 370–373.

Поступила в редакцию
26 июля 1989 г.

D.A. Bezuglov, Z.P. Mastropas, E.N. Mishchenko, E.N. Myasnikov, S.V. Tolstousov, V.L. Tyurikov. **Investigation the Electrooptical Phase Front Correctors for Adaptive Optical Systems Made of LiNbO_3 Crystal.**

The paper presents the results of experimental study of the possibility of constructing the phase front correctors with the preset spatial modes based on the use of LiNbO_3 crystals. A technique is suggested for correcting the shapes of the control electrodes. It is shown that such corrector has no disadvantages characteristic of flexible mirrors.