

УДК 535.3+539.238

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
ВДОЛЬ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ  
ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

*C. B. Зайцев, A. C. Кузали и A. B. Чекан*

Исследуется влияние точности изготовления тонкопленочного волновода с дифракционным выводом света на характеристики его излучения. Экспериментально изучена квадратичная фазовая ошибка в излучающей апертуре, возникающая в результате неоднородностей волноводной пленки и выводного устройства и приводящая к расширению диаграммы направленности. Приводятся результаты измерений фазовых распределений, полученных интерференционным методом. Накопление по длине волновода фазовой ошибки значительно повышает чувствительность интерференционного метода измерений малых плавных неоднородностей толщины пленки. Разработанная экспериментальная установка позволяет регистрировать отклонения толщины пленки порядка 10 Å на длине 5 мм.

Введение

Практическая реализация потенциальных возможностей излучающих устройств интегральной оптики существенно зависит от точности изготовления тонкопленочных оптических волноводов и устройств вывода света (призм, дифракционных решеток). Наличие неточностей приводит в конечном счете к нестабильности фазовой скорости вдоль волновода, а следовательно, к появлению в излучающей апертуре фазового распределения отличного от линейного (фазовых ошибок). Фазовые ошибки приводят к уменьшению эффективной длины излучающей апертуры, которая является одной из основных характеристик излучающих систем. Например, при использовании тонкопленочного волновода с дифракционной решеткой в качестве диспергирующего элемента спектроанализаторов [1, 2] фазовые ошибки могут привести к уменьшению разрешающей способности прибора. В связи с этим возникает необходимость экспериментального определения фазового распределения в ближнем поле излучения тонкопленочного волновода и установление связи ширины диаграммы направленности (или, иначе, эффективной длины апертуры излучения) с величиной фазовых ошибок.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка для исследования фазовых распределений в ближнем поле излучения тонкопленочного волновода с дифракционной решеткой показана на рис. 1. Исследуемый волновод был обработан полистироловой пленкой 1 путем вытягивания стеклянной подложки 2 из 10%-го раствора полистирола в толуоле. Дифракционная решетка 3 с периодом  $T=0.6$  мкм была нанесена на подложку голограммическим способом. Измерения проводились для волны  $TE_0$  на  $\lambda=0.6328$  мкм.

Когерентное излучение от источника 4 разделяется на пластинке 5 на два световых пучка, один из которых, отражаясь от зеркала 6, возбуждает с помощью вводной призмы 7 тонкопленочный волновод. Волноводная

волна, распространяясь по волноводу, излучается на решетку, образуя между направлением главного максимума излучения и нормалью к поверхности решетки угол  $\Theta = 30^\circ 22' 34''$ .

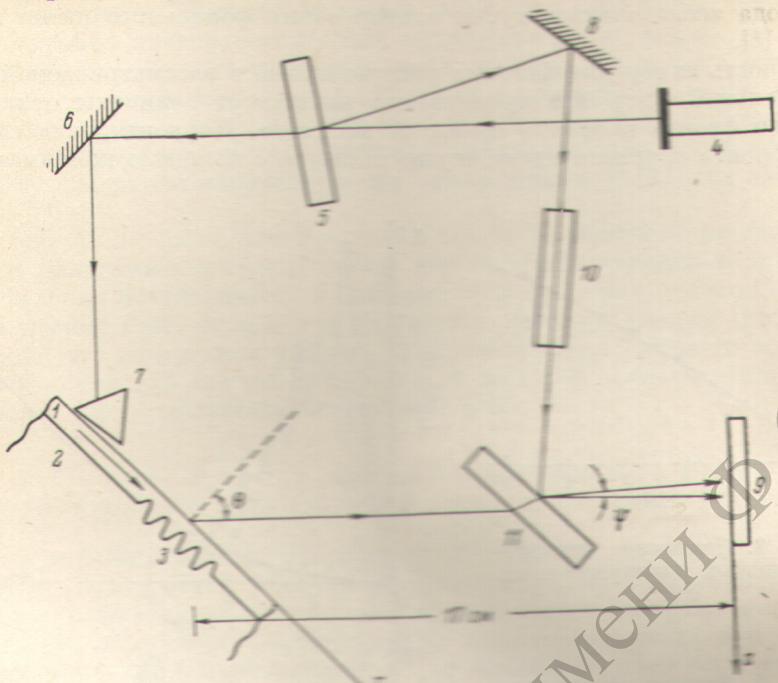


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения волновых распределений.



Рис. 2. Фотография интерференционной картины.

Второй пучок, отраженный от зеркала 8, используется в качестве опорного. Интерференционная картина, образующаяся в области наложения волновых фронтов опорного и исследуемого пучков, анализируется с помощью окулярного микрометра 9. В установке предусмотрена воз-

можность регистрации с помощью фотоприемника распределения интенсивностей в интерференционной картине и в каждом из интерферирующих пучков. Диаграмма направленности поля излучения тонкопленочного волновода исследовалась путем зондирования фокального пятна камеры УФ-84 [2].

Точность измерения фазовых распределений в рассматриваемой экспериментальной установке существенно зависит от величины отклонения фазового фронта опорного пучка от плоского. Корректировка сферического фронта опорного пучка осуществляется с помощью коллиматора 10

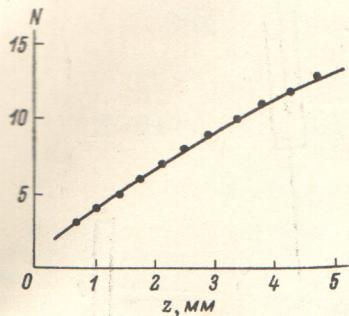


Рис. 3. Положение интерференционных минимумов вдоль оси  $z$ .

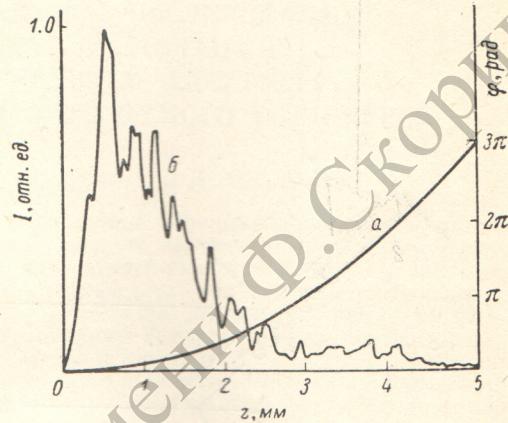
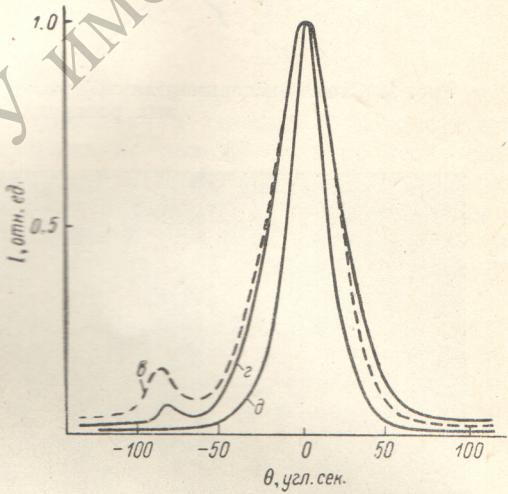


Рис. 4. Фазовое распределение ( $a$ ) и распределение интенсивности ( $b$ ) в излучающей апертуре. Соответствующие им экспериментальная ( $\alpha$ ) и рассчитанная ( $\beta$ ) диаграммы направленности;  $\delta$  — диаграмма направленности при отсутствии фазовых ошибок.



и контролируется по интерференционной картине, образованной при отражении опорного пучка от передней и задней поверхностей калиброванной плоскопараллельной пластины 11. По нашим оценкам, сферичность фазового фронта опорного пучка в области интерференции (5 мм) не превышает  $0.05 \lambda$ .

Число отсчетов в исследуемом фазовом распределении излучаемой волны зависит от количества минимумов (темных полос) в интерференционной картине и определяется углом  $\phi$  между опорным и исследуемым пучками. Число отсчетов в эксперименте равнялось 15—20 на длине 5 мм.

Экспериментальные исследования были проведены для волноводных образцов, каждый из которых изготавливается на одной и той же стеклянной подложке с решеткой путем удаления старой и последующего нанесения новой полистироловой пленки. В характере фазовых распределений различных образцов наблюдался большой разброс, который, видимо, вызывается неконтролируемыми параметрами и особенностями технологического процесса нанесения пленки (скорость вытягивания, концентрация раствора, температура, чистота раствора, вибрации и т. д.). Ниже приводятся результаты исследований образца с наиболее характерным, близким к квадратичному, фазовым распределением (интерферограмма

рис. 2). Измеренная толщина волноводной пленки в начале решетки составила величину  $h=0.75$  мкм. Фазовое распределение излучаемой волны определялось путем измерения положения центров темных полос в интерферограмме рис. 2. Отклонению фазового распределения от линейного соответствует неэквидистантность полос. На рис. 3 приводится график положения интерференционных минимумов вдоль оси  $z$ .

Графику рис. 3 соответствует фазовая ошибка, которая с достаточной точностью может быть аппроксимирована функцией  $\varphi(z)=az^2$ , где  $a=-0.12\pi/\text{мм}^2$  (рис. 4, а). На рис. 4, б приведено распределение интенсивности в ближнем поле излучения волновода, а на рис. 4, в соответствующая ему диаграмма направленности, измеренная в фокальной плоскости камеры УФ-84.

На рис. 4 для сравнения приведены также теоретически рассчитанные на ЭВМ диаграммы направленности для экспериментально полученного распределения интенсивности в ближнем поле при квадратичном фазовом распределении (рис. 4, г) и при отсутствии фазовых ошибок (рис. 4, д).

Видно, что измеренная ширина диаграммы направленности совпадает с рассчитанной для случая квадратичной фазовой ошибки и превышает идеальную (при отсутствии ошибок) в 2 раза.

### Связь между фазовыми ошибками и параметрами получающей системы

Исследование фазовых ошибок в получающей апертуре позволяет не только предсказать расширение диаграммы направленности, но и сделать заключение о неоднородности параметров системы волновод-решетка. В самом деле неоднородность толщины волновода или периода решетки приводит к изменению вдоль волновода линейной скорости излучаемой волны, а следовательно, и к фазовым ошибкам в получающей апертуре. Связь между этими параметрами определяется соотношением

$$2k_x h = \partial \Phi(x)/\partial z,$$

где  $\Phi(x)$  — фазовое распределение вдоль получающего волновода;  $k_x=(2\pi/\lambda)[\gamma(x)-\lambda/T(x)]$  — постоянная распространения получаемой волны,  $\gamma(x)=c/v_g(x)$  — замедленная фазовая скорость ( $v_g$ ) волноводной волны,  $T(x)$  — период решетки,  $\lambda$  — направление распространения волны ( $x=z/\cos\Theta$ , рис. 1).

При отсутствии фазовых ошибок ( $d\Phi(x)/dx=\text{const}$ ),  $k_x=\text{const}$  и практически можно считать, что толщина волновода, однозначно связанный с замедлением через дисперсионное уравнение [1], а также период решетки постоянны.

Для исследованного нами образца с квадратичной фазовой ошибкой  $\varphi(x)=ax^2 \cos^2\Theta$

$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \Delta \gamma(x) - \Delta \left( \frac{\lambda}{T(x)} \right) \right] = 2ax \cos^2\Theta, \quad (1)$$

где  $\Delta k_x$  — изменение постоянной распространения. Видно, что в случае непостоянства как  $\gamma$ , так и  $T$  выделить вклад каждого из них в отдельности в фазовую ошибку нельзя. Однако представляет интерес оценка чувствительности метода, например по определению отклонения толщины волноводной пленки. Если считать, что  $T(x)=\text{const}$ , а материал пленки однороден, тогда

$$\Delta \gamma(x) = \frac{n_1^2 - \gamma^2}{\gamma h_{\text{эфф}}} \Delta h(x) = \frac{2ax \cos^2\Theta}{2\pi/\lambda}, \quad (2)$$

где  $\Delta h(x)$  — изменение толщины пленки,  $n_1$  — ее показатель преломления,  $h_{\text{эфф}}$  — эффективная толщина волновода. Отсюда видно, что квадратичной фазовой ошибке соответствует линейное изменение толщины пленки. Для экспериментального значения  $a=-0.12\pi/\text{мм}^2$  это изменение

толщины волноводной пленки составило на конце излучающей апертуры величину  $\Delta h = 60 \text{ \AA}$ .

По нашим оценкам, в описанной экспериментальной установке можно обнаружить изменение толщины полистироловой пленки порядка  $10 \text{ \AA}$  на длине 5 мм. Такая чувствительность интерференционного метода связана с накоплением по длине волновода фазовой ошибки.

### Выводы

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили соображения [2] о наличии на излучающей апертуре тонкопленочного волновода с решеткой фазовых ошибок, приводящих к расширению диаграммы направленности.

Экспериментально показано, что накопление по длине волновода фазовой ошибки значительно повышает чувствительность интерференционного метода измерений малых плавных неоднородностей толщины пленки.

Авторы выражают благодарность Л. Н. Дерюгину за полезное обсуждение результатов работы.

### Литература

- [1] Л. Н. Дерюгин, А. С. Кузали, А. В. Чекан. Опт. и спектр., 41, 470, 1976.
- [2] А. С. Кузали, А. В. Чекан. Опт. и спектр., 44, 148, 1978.
- [3] Введение в интегральную оптику (под ред. М. Б. Барноски). «Мир», М., 1977.

Поступило в Редакцию 20 июня 1977 г.