

СОЗДАНИЕ МАТРИЦ МИКРОЛИНЗ В СТЕКЛЕ К8 ДЛЯ ДАТЧИКОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

© 2013 г. М. М. Векшин, канд. физ.-мат. наук; А. С. Левченко, канд. физ.-мат. наук;
В. А. Никитин, канд. техн. наук; Н. А. Яковенко, доктор техн. наук

Кубанский государственный университет, Краснодар

E-mail: vekshin@phys.kubsu.ru

С помощью электростимулированной миграции ионов серебра изготовлены матрицы микролинз в стеклах К8. Разработана теоретическая модель зависимости параметров микролинз от технологических режимов их изготовления. Полученные матрицы микролинз использовались в датчиках Шака–Гартмана для определения искажений волнового фронта.

Ключевые слова: стекла, электростимулированная миграция ионов, матрица микролинз, датчик волнового фронта Шака–Гартмана.

Коды OCIS: 220.3630, 130.1750, 280.4788

Поступила в редакцию 07.03.2013

Введение

Датчики Шака–Гартмана [1] используются в оптических системах для измерения искажений волнового фронта (ВФ). Датчик состоит из двумерной матрицы микролинз, которая располагается в фокальной плоскости камеры ПЗС. В датчиках ВФ микролинзы в матрице обычно обладают большими фокусными расстояниями и малой апертурой. Требованиями для таких матриц являются равные фокусные расстояния линз, малый диаметр фокального пятна, стремящийся к дифракционному пределу, а также высокая плотность упаковки.

Целью данной работы является изготовление матриц микролинз для датчиков ВФ в стеклах методом электростимулированной миграции ионов серебра [2–3] с последующим отжигом.

Моделирование технологического процесса

Форма микролинз в матрице была смоделирована заранее. В основе технологии лежит метод электростимулированной миграции ионов Ag^+ из расплава солей $\text{AgNO}_3 + \text{NaNO}_3$ в подложку оптического стекла. В результате

технологического процесса происходит изменение химического состава стекла, и показатель преломления в области диффузии увеличивается. Данную технологию можно использовать для создания различных оптических элементов со ступенчатым профилем показателя преломления.

Пространственное распределение концентрации ионов серебра в стекле было определено путем решения нелинейного уравнения диффузии, описывающего электростимулированную миграцию ионов в процессе изготовления линзы. Уравнение имеет вид

$$\frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial t} = \nabla \left[\frac{D_{\text{Ag}}}{1 - (1 - M)C_{\text{Ag}}} \nabla C_{\text{Ag}} \right] - \frac{D_{\text{Ag}}}{1 - (1 - M)C_{\text{Ag}}} \frac{qE}{fkT} \nabla C_{\text{Ag}},$$

где C_{Ag} – относительная концентрация серебра, $C_{\text{Ag}} = c_{\text{Ag}}/c_0$, c_{Ag} – концентрация ионов серебра, c_0 – начальная концентрация ионов натрия в стекле, D_{Ag} – собственный коэффициент диффузии серебра, $M = D_{\text{Ag}}/D_{\text{Na}}$ – отношение собственных коэффициентов диффузии серебра и натрия, q , f , k , T – заряд электрона, коэффици-

ент корреляции, постоянная Больцмана и температура по Кельвину соответственно, t – время диффузионного процесса. $E(x, y)$ – напряженность стимулирующего электрического поля в подложке.

Форма электрического поля рассчитывалась путем аналитического решения уравнения Лапласа методом конформного отображения [4]. В случае двумерной матрицы она описывается как

$$E_x - iE_y = i \frac{V K'(k)}{W K'(q)} \sqrt{\frac{1 - \operatorname{sn}^2(\beta u, k)}{\operatorname{sn}^2(\zeta, k) - \operatorname{sn}^2(\beta u, k)}},$$

где E_x, E_y – декартовы составляющие статического электрического поля $E(x, y)$, W – толщина стеклянной подложки, V – приложенное напряжение к подложке в процессе изготовления линзы, $u = x + iy$ – пространственная комплексная координата, K – полный эллиптический интеграл, $K'(k) = K(1 - k^2)^{1/2}$. Параметр k ($0 < k < 1$) определен в соответствии с решением уравнения

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{x_w + b_w}{2W},$$

здесь x_w – зазор в маске и b_w – расстояние между смежными зазорами. Параметры β, ζ и q определяются как $\beta = 2K(k)/(x_w + b_w)$, $\zeta = K(k)x_w/(x_w + b_w)$, $q = k \operatorname{sn}(\zeta, k)$ соответственно, sn – эллиптическая функция Якоби.

Уравнение диффузии было решено методом конечных разностей по неявной схеме Крэнка–Николсона с соответствующими граничными условиями. Параметры маски: $x_w = 30$ мкм, $b_w = 120$ мкм, толщина подложки $W = 1$ мм. Другие параметры моделирования: $D_{\text{Ag}} = 1,4 \times 10^{-15}$ м²/с, $M = 0,1$, $T = 380$ °С, $f = 0,5$, $V/W = 25$ В/мм.

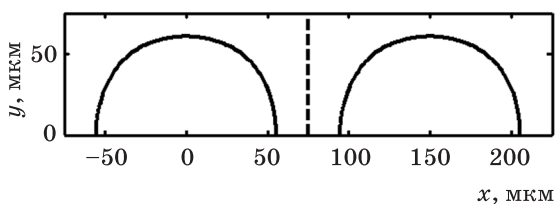


Рис. 1. Форма микролинзы в матрице, изготовленной методом электростимулированной миграции в стекле.

Форма микролинз (пространственный профиль распределения концентрации ионов серебра) в течение диффузионного времени, равного 1700 с, приведена на рис. 1. Как можно заметить, линзы имеют почти полукруглую форму. Показатель преломления линзы прямо пропорционален концентрации внедренных ионов серебра.

Изготовление и исследование матриц микролинз

Изготовление матриц микролинз проводилось в стекле К8 электростимулированной миграцией ионов Ag^+ из расплава солей в стеклянную подложку. Для этого на одну из сторон стеклянной подложки размером $50 \times 50 \times 2$ мм термическим вакуумным напылением наносился алюминиевый маскирующий слой толщиной 0,6 мкм, в котором с помощью фотолитографии создавалась матрица круглых отверстий диаметром 30 мкм. Матрица отверстий в маскирующем слое содержала 53400 (267×200) отверстий, расположенных на расстоянии 150 мкм друг от друга. На противоположной стороне подложки термическим напылением алюминия создавался тонкопленочный катод. Подготовленная таким образом подложка приводилась в соприкосновение с расплавом солей AgNO_3 и NaNO_3 , взятых в соотношении 1:75 (моль) таким образом, чтобы расплав не затекал на тонкопленочный катод. Между расплавом солей и тонкопленочным катодом прикладывалось постоянное электрическое поле напряженностью 25 В/мм, стимулирующее процесс миграции ионов Ag^+ в стеклянную подложку через отверстия в маскирующем слое. Процесс формирования матрицы микролинз в стеклянной подложке протекал при температуре 380 °С в течение 30 мин. По окончании заданного времени миграции и полного остывания до комнатной температуры стеклянная подложка промывалась от остатков расплава и погружалась в 25% раствор KOH для удаления алюминиевого маскирующего слоя и катода. После окончательной промывки в воде и сушки поверхность полученной матрицы микролинз со стороны катода шлифовалась и полировалась, кроме того был срезан и отполирован торец матрицы для изучения характера распределения ионов Ag^+ в области миграции. На рис. 2 приведены изображения фрагментов матрицы микролинз, полученные с помощью растрового электронного микроскопа

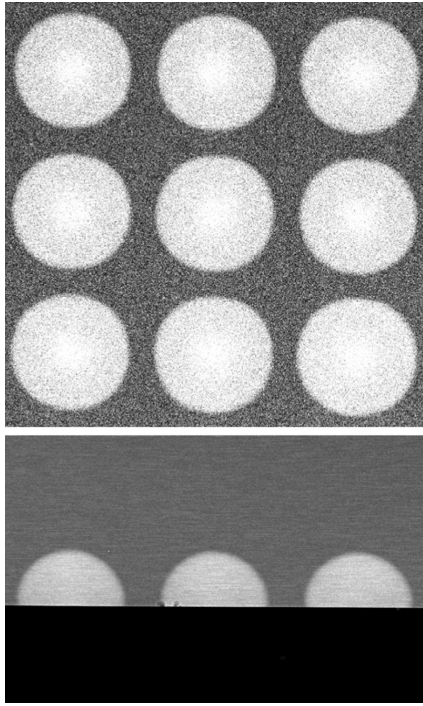


Рис. 2. Изображение фрагментов матрицы микролинз, полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

JSM-7500F с рентгеноспектральным анализатором, использующим метод энергетической дисперсии.

Из рис. 2 видно, что изготовленные микролинзы имеют полусферическую форму, а матрица линз – точное расположение микролинз в растре, задаваемое фотолитографией. Пространственное распределение ионов Ag^+ однородно, что является особенностью метода электростимулированной миграции ионов.

Применение электростимулированной миграции ионов в стеклянную подложку позволи-

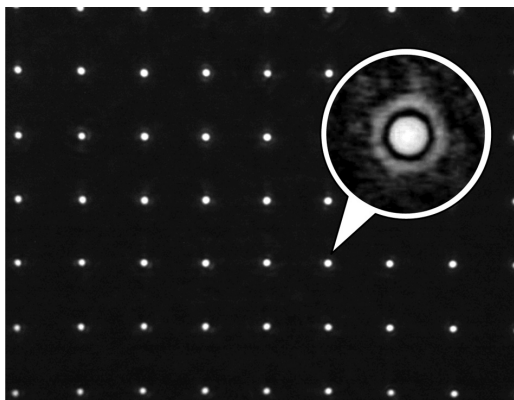


Рис. 3. Распределение света в фокальной плоскости микролинз.

ло получить в матрице микролинзы, имеющие полусферическую геометрическую форму и ступенчатый профиль изменения показателя преломления, что подтверждается многочисленными экспериментами [3].

Распределение света в фокальной плоскости матрицы микролинз представлено на рис. 3.

Изготовленная по фотошаблону матрица микролинз с шагом 150 мкм содержала микролинзы диаметром 125 мкм, фокусным расстоянием 1,5 мм, при этом диаметр фокального пятна составил 19 мкм, а число Френеля – 4,1. Указанные выше оптические параметры были измерены на длине волны 0,63 мкм.

Такая матрица микролинз с 8-битовой камерой ПЗС, у которой размер пиксела равен 8 мкм, позволяет при применении дополнительного согласующего объектива измерять углы наклона нормали ВФ с динамическим диапазоном угла 8° (44 мрад) и чувствительностью на уровне 20 мкрад [5].

Нижний порог чувствительности датчика, т.е. минимальный наклон нормали фронта волны, вызывающий фиксируемое датчиком смещение, ограничивается погрешностью метода нахождения центроид, поэтому микролинзы с меньшим фокусным расстоянием при прочих равных условиях подходят для измерений сильно искаженных ВФ. Для измерения слабых искажений предпочтительны микролинзы с длинным фокусным расстоянием и малым размером субапертуры, тогда при малых углах наклона ВФ отклонение центроид будет значительным, однако это, с другой стороны, ограничивает динамический диапазон датчика размером рабочей области – субапертурой.

Дополнительный отжиг матрицы микролинз приводит к дальнейшей диффузии ионов

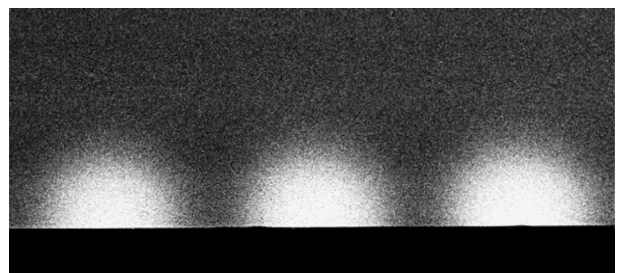


Рис. 4. Изображение фрагмента матрицы микролинз после двухчасового отжига.

Ag^+ , вызывающей уменьшение концентрации ионов в области диффузии, появление градиентного профиля изменения концентрации диффузанта, а следовательно, и показателя преломления, а также увеличение фокусного расстояния микролинз. Полученные матрицы были отожжены при температуре 450 °С.

После двухчасового отжига микролинзы имели фокусное расстояние 2,5 мм и диаметр фокального пятна 28 мкм. На рис. 4 представлено изображение фрагмента матрицы микролинз после отжига.

После четырехчасового отжига микролинзы уже имели диаметр 150 мкм, фокусное расстояние 4,5 мм и диаметр фокального пятна 49 мкм. Число Френеля равно 2. На базе этой матрицы для практической демонстрации возможностей матрицы микролинз собран макет датчика без согласующего объектива. В макете установлена матрица ПЗС 1280×960 пикселей с усредненным размером RGB-пикселя примерно 3 мкм, глубина оттенка 8 бит. На каждую субапертуру приходилось 50×50 пикселей. Для восстановления волнового фронта использовался модальный метод реконструкции с применением полиномов Цернике, а программный комплекс получения и обработки гартманограмм был реализован в среде MatLab [6].

На практике датчик такой конструкции позволил измерять искажения ВФ с динамическим диапазоном 2°38' (14 мрад) и чувствительностью 2 мкрад.

Заключение

Метод электростимулированной миграции ионов использовался для изготовления матрицы 200×267 микролинз с шагом 150 мкм, фокусным расстоянием 4,5 мм и диаметром фокального пятна 49 мкм. Матрица обладает высокой плотностью упаковки – диаметр каждой линзы равен 150 мкм.

Преимущество микролинз, изготовленных методом электростимулированной миграции ионов, заключается в возможности управления формой и размерами микролинз, изменениями условий технологического процесса (дополнительный отжиг, изменение размеров и формы маски) и типа диффундирующего материала.

Собранный датчик ВФ Шака–Гартмана на основе изготовленной матрицы микролинз при применении 8-битового ПЗС с размером пикселя 3 мкм позволил измерять искажения ВФ в динамическом диапазоне 14 мрад и с чувствительностью 2 мкрад.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Platt B.C. History and principles of Shack–Hartmann wave front sensing // *Journal of Refractive Surgery*. 2001. V. 17. № 5. P. 573-577.
2. Introduction to glass integrated optics / Ed. by Najafi S.I. Boston, USA: Artech House, 1992. 170 p.
3. Никитин В.А., Яковенко Н.А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: Изд-во КубГУ, 2010. 200 с.
4. Oven R. Tapered waveguides produced by ion exchange in glass with a nonuniform electric field // *J. Lightwave Technology*. 2006. V. 24. № 11. P. 4337–4344.
5. Curatu C., Curatu G., Rolland J. Fundamental and specific steps in Shack–Hartmann wavefront sensor design // *Proc. SPIE*. 2006. V. 6288. Paper 628801.
6. Кравченко Д.А. Реконструкция волнового фронта методом Shack–Hartmann // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012613954 (Россия). 2012.