

УДК 535.4 : 519.28

А. Г. Полещук, А. А. Харисов

(Новосибирск)

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КИНОФОРМНЫХ ЛИНЗ  
В КОНЦЕНТРАТОРАХ СВЕТА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

Рассмотрено применение киноформных линз в качестве концентраторов света солнечных батарей. Изучены особенности работы линз в широком спектральном диапазоне. Описан процесс изготовления линз по фоторастровой технологии с использованием растриванного шаблона. Изготовлены и исследованы матрицы киноформных линз с числовой апертурой 0,12. Дифракционная эффективность линз составила 70—80 %, коэффициент концентрации — 50.

**Введение.** Один из путей повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (ФПСЭ) заключается в использовании концентраторов светового потока. Концентратор собирает световой поток с некоторой площади и фокусирует его на поверхность ФПСЭ небольшого размера [1]. Это позволяет, с одной стороны, снизить стоимость солнечных батарей за счет экономии полупроводниковых материалов, улучшения их стойкости к ионизирующим излучениям, возможности создания многоспектральных солнечных элементов, но, с другой стороны, появляется проблема слежения за положением солнца.

Основное требование к концентраторам — это качество фокусировки излучения (достижимый коэффициент концентрации), дешевизна, возможность каскадирования в панели, климатическая стойкость. Линзы Френеля [2], изготавливаемые тиснением пластика, удовлетворяют перечисленным требованиям, кроме последнего.

Цель данной работы — рассмотреть возможность использования в качестве концентраторов световой энергии киноформных (дифракционных) линз [3], фазовый рельеф которых может быть выполнен травлением поверхности защитных стекол ФПСЭ.

**Использование киноформных линз для концентрации света.** По ряду своих технических характеристик киноформные линзы могут быть с успехом использованы в системах концентрации света солнечных батарей. Однако хроматические aberrации, присущие линзам, требуют более внимательной оценки возможности таких применений.

На рис. 1 приведена оптическая схема концентратора света для солнечной батареи. Показаны положения фокальных плоскостей киноформной линзы при ее освещении световым потоком, содержащим три спектральные компоненты:  $\lambda_1$ ,  $\lambda_0$  и  $\lambda_2$ . Длине волны света  $\lambda_0$  соответствует фокусное расстояние  $F_0$  (линза рассчитывается для этой длины волны). На этой длине волны световой поток фокусируется точно в центр площадки фотоэлемента, имеющего размеры  $D_f \times D_f$ . При изменении длины волны света на величину  $\sigma\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$  фокусное расстояние изменяется на величину  $\sigma F = F_0(\sigma\lambda/\lambda_0)$ .

Коэффициент концентрации света определяется как отношение площадей входного зрачка киноформной линзы  $S_k$  и фотоэлемента  $S_f$ :

$$C = S_k/S_f = (D_k/D_f)^2, \quad (1)$$

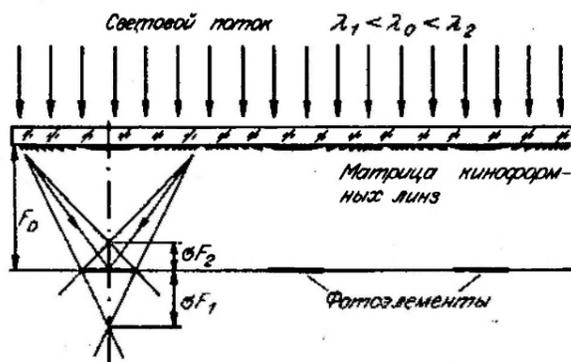


Рис. 1

где  $D_k$  и  $D_f$  — соответственно размеры киноформной линзы и фотоэлемента. Так как киноформная линза является дифракционным элементом, то от длины волны  $\lambda$  зависят: фокусное расстояние

$$F = F_0 \lambda / \lambda_0$$

и дифракционная эффективность [3]

$$\eta_\lambda = \frac{\sin^2(\pi(1 - \lambda/\lambda_0))}{\pi^2(1 - \lambda/\lambda_0)^2}$$

Поэтому величина и распределение светового потока в плоскости фотоэлемента зависят от длины волны (см. рис. 1).

Выходной ток фотоэлемента равен

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \eta_\lambda K_\lambda \Phi_\lambda d\lambda, \quad (2)$$

где  $S_\lambda$  — спектральная чувствительность фотоэлемента [4];  $\Phi_\lambda$  — световой поток на длине волны  $\lambda$ ;  $K_\lambda$  — коэффициент, учитывающий потери световой энергии за счет изменения размеров освещенной площадки:

$$K_\lambda = \begin{cases} 1/(C(\lambda_0/\lambda - 1)^2) & \text{для } \lambda < \lambda_1, \\ 1 & \text{для } \lambda_1 < \lambda < \lambda_2, \\ 1/(C(\lambda/\lambda_0 - 1)^2) & \text{для } \lambda > \lambda_2. \end{cases}$$

Этот коэффициент выведен для точечного источника, здесь  $\lambda_1 = \lambda_0 \sqrt{C} / (\sqrt{C} + 1)$ ,  $\lambda_2 = \lambda_0 (\sqrt{C} + 1) / \sqrt{C}$ .

Зависимость величины коэффициентов  $S_\lambda$ ,  $\eta_\lambda$ ,  $K_\lambda$ ,  $\Phi_\lambda$  в выражении (2) от длины волны показана на рис. 2.  $K_\lambda$  вычислен для  $F = 0,95F_0$ . Небольшое смещение плоскости установки фотоэлементов позволяет повысить эффективность преобразования за счет совмещения центров кривых  $K_\lambda$  и  $S_\lambda$ .

Из графика видно, что благодаря относительно узкой спектральной чувствительности фотоэлементов потери за счет падения дифракционной эффективности киноформной линзы (кривая  $\eta_\lambda$ ) незначительны, а потери за счет ее хроматизма начинают сказываться при коэффициенте концентрации больше 50.

При использовании обычных линз можно получить коэффициент концентрации  $\sim 400-500$  [1]. Однако для этого необходимо следить за положением

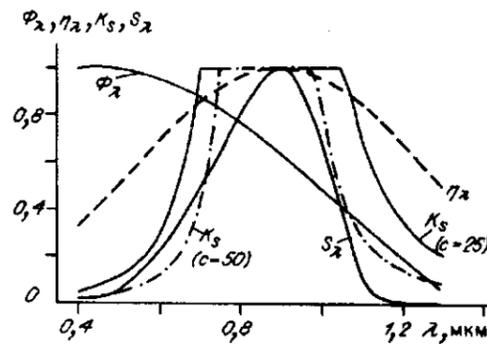


Рис. 2

Методы изготовления матриц концентраторов. Так как глубина рельефа киноформной линзы не превышает 1—2 мкм (это в десятки раз меньше глубины рельефа линз Френеля), то их изготовление может быть основано на методах литографии.

Существует несколько разновидностей литографических методов изготовления киноформных линз (КЛ). Общим является изготовление фотошаблона (или комплекта фотошаблонов), а затем, на втором этапе, перенос его рисунка в резист и при необходимости в материал подложки. Фазовый профиль КЛ может быть получен с использованием полутонного [6] или растриванного фотошаблонов [7]. Последний способ наиболее приемлем, так как требует изготовления одного обычного фотошаблона. На рис. 3 показана схема процесса изготовления матриц киноформных линз на стеклянных пластинах. На первом этапе в увеличенном масштабе изготавливается растриванный фотошаблон киноформной линзы. Затем изображение фотошаблона уменьшается и мультиплицируется на пластине, покрытой слоем фоторезиста. После проявления в резисте формируется рельеф КЛ. Далее возможны два варианта продолжения процесса. Перенос рельефа в стекло методом ионного травления позволяет получить высококачественные матрицы линз с высокой лучевой и климатической стойкостью. Более дешевый и простой путь заключается в изготовлении рельефной гальванокпии. Отдельные гальванокпии стыкуются друг с другом для получения при необходимости матрицы оригинала большего размера. На последнем этапе известными методами [8] изготавливаются матрицы линз в тонком слое полимера на поверхности стеклянной пластины. Толщина слоя полимера не превышает 3—5 мкм, поэтому исключается термическая деформация слоя и достигается высокая климатическая стойкость [8].

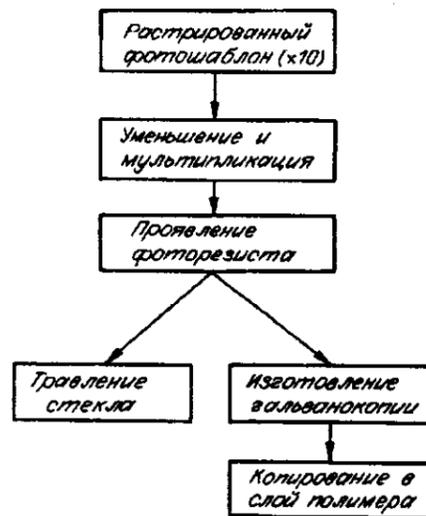


Рис. 3

солнца с точностью ~ 10—20 угл. с, что технически сложно. В случае использования киноформных линз размер фотоэлементов увеличен для расширения спектрального диапазона, поэтому погрешности слежения за положением солнца вызовут меньшее снижение коэффициента концентрации.

Для повышения степени концентрации излучения и расширения спектрального диапазона можно использовать методы ахроматизации, например увеличение глубины пилообразной структуры [5].

Для повышения степени концентрации излучения и расширения спектрального диапазона можно использовать методы ахроматизации, например увеличение глубины пилообразной структуры [5].

Экспериментальное исследование. Экспериментально исследовался метод получения матриц киноформных линз по фоторастровой технологии. Растриванный фотошаблон изготавливался на стеклянной подложке размером 102 × 102 мм, покрытой пленкой хрома, в увеличенном масштабе (10 : 1) на круговом лазерном генераторе изображений (КЛГИ) по термохимической технологии [3]. Размер линз раstra был выбран 5 × 5 мм исходя из возможностей установки проекционного экс-

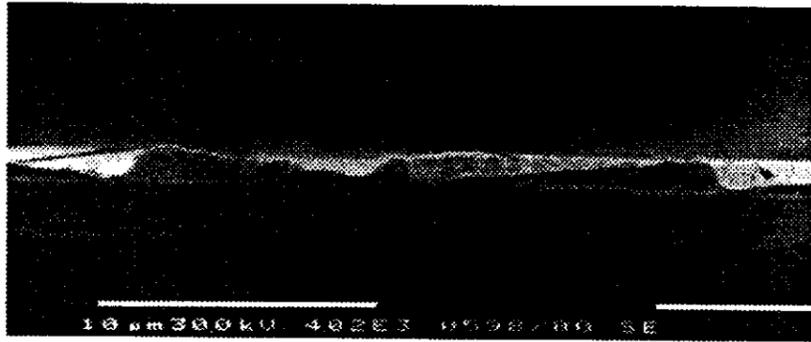


Рис. 4

понирования и мультипликации UER. Микрорельеф линзы формировался в слое фоторезиста ФП-051 толщиной около 2 мкм. На одной пластине располагалось до  $15 \times 15$  линз квадратной формы с фокусным расстоянием 33 мм для  $\lambda_0 = 0,63$  мкм. На этой длине волны дифракционная эффективность составила 75 %.

На рис. 4 показан профиль зон на границе соседних киноформных линз матрицы, полученный с помощью электронного микроскопа. Из рисунка видно, что глубина рельефа составляет 2 мкм, а форма профиля близка к пилообразной.

**Заключение.** Показано, что киноформные линзы могут быть использованы в концентраторах света солнечных батарей с коэффициентом концентрации до 50. По фоторастровой технологии изготовлены матрицы киноформных линз с дифракционной эффективностью до 75 %.

Авторы глубоко признательны Э. В. Тверьяновичу за стимулирование данной работы и В. П. Коронкевичу за ее поддержку и полезное обсуждение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аннаев К., Берклиев А., Назаров Н. Исследование преобразователей при прямом и концентрированном излучении // Изв. АНТССР. Сер. Физ.-техн. хим. и геолог. наук.—1989.— № 1.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.—М.: Наука, 1970.
3. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А., Михальцова И. А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автоматрия.—1985.—№ 1.
4. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения.—М.: Радио и связь, 1987.
5. Kovatchev M., Ilieva R. // Proc. Int. Topical Meeting on Optical Computing, Kobe, Japan, 1990.
6. Gotchiyev V. Z., Korol'kov V. P. High resolution optical recording on a-Si films // Journ. Non-Crystal. Solids.—1991.—137&138, N 4.—P. 1297.
7. Poleshchuk A. G. Fabrication of phase structures with continuous and multilevel profile for diffraction optics // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.—1991.—1574.—P. 89.
8. Goto K., Mori K., Hatakoshi G. et al. Spherical grating objective lenses for optical disk pick-up // Jap. Journ. Appl. Phys.—1987.—26, Suppl. 26-4.—P. 135.

Поступила в редакцию 24 марта 1994 г.