

вует указанным ограничениям, формулы должны быть скорректированы на форму фазового профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольков В. П., Коронкевич В. П., Михальцова И. А. и др. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы // Автометрия.—1989.—№ 3, 4.
2. Волков В. В., Герасимов Г. Г., Капаев В. В. и др. Оптические методы измерения размеров элементов топологического рисунка БИС и СБИС // Микроэлектроника.—1980.—9, вып. 6.
3. Kleinknecht H. P., Meier H. Linewidth measurement on IC masks and wafers by grating test patterns // Appl. Opt.—1980.—19, N 4.—P. 525.
4. Боухьюз Г., Браат Дж., Хейсер А. и др. Оптические дисковые системы: Пер. с англ. / Под ред. М. Ф. Стельмаха.—М.: Радио и связь, 1991.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.—М.: Наука, 1973.
6. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности.—Новосибирск, 1979.—(Препр. СО АН СССР. ИАиЭ; 98).

Поступила в редакцию 14 апреля 1992 г.

УДК 621.378.325

А. М. Бакиев, С. Х. Валиев

(Ташкент)

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СО СКАНИРУЮЩИМ ПУЧКОМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛАЗЕРОГРАФИИ

Приведены описание и расчет оптической системы со сканирующим пучком для целей лазерографии. Выведены уравнения движения сканирующего лазерного пучка и изменения углов наклона рабочего зеркала (углового сканатора).

Введение. Лазерные методы обработки, лазеростимулированные микрохимические процессы (травление, осаждение, отжиг, легирование, выращивание пленочных структур и др.) в наше время оказывают значительное влияние на процесс развития современной микроэлектроники. В результате интенсивных исследований в последнее время сформировалось новое научно-техническое направление, именуемое в литературе лазерографией или лазерной пантографией [1, 2]. Лазерный отжиг [3], специализация вентиляльных матриц [4], изготовление опытных образцов матричных интегральных схем [5] и другие аспекты лазерографии [6] сегодня обсуждаются на уровне промышленного применения лазерной техники и технологии в производстве изделий микроэлектроники.

Установки лазерографии могут обеспечить изготовление изделий микроэлектроники (БИС, СБИС, трехмерные ИС и др.) по заданной программе в специальной камере без использования резистных масок при осуществлении необходимых процессов технологии и позволяют достигать микронных и субмикронных размеров обработки.

В [7] авторами была описана лазерная проекционная установка для переноса изображений на поверхность объектов, созданная на базе лазерного проекционного микроскопа (ЛПМ).

В [8] предложена установка другого типа, также созданная на базе ЛПМ, позволяющая производить обработку объекта, укрепленного на координатном столике с двумя степенями свободы, при помощи неподвижного лазерного пучка, генерируемого аргоновым лазером типа ЛГН-402.

В настоящей работе приводятся описание и расчет оптической системы устройства, включающего блок визуального контроля ЛПМ и позволяющего

производить обработку неподвижного объекта лазерным пучком, сканирующим по поверхности объекта с заданной скоростью по заданной траектории; дан вывод уравнения движения сканирующего лазерного пучка и изменения углов наклона рабочего зеркала. Оригинальность предложенной системы состоит в том, что в ней решается проблема сохранения радиуса и пространственного распределения по сечению обрабатываемого объект лазерного пучка при сканировании этим пучком по всему полю обработки. Именно эта проблема и составляет главное препятствие при практической реализации схемы со сканирующим по поверхности неподвижного объекта лазерным пучком. Такая схема обладает большей гибкостью, точностью, надежностью и имеет большие перспективы для практического применения установок лазерографии. Кроме того, использование схемы лазерного проекционного микроскопа для визуализации изображения позволяет осуществлять контроль процесса обработки в реальном масштабе времени, причем информативность такого контроля и удобство наблюдения намного выше, чем в обычных системах визуализации.

Оптическая схема системы. Оптическая схема системы состоит из трех взаимосвязанных блоков (рис. 1): блока визуального контроля процесса обработки на базе лазерного проекционного микроскопа I; блока телескопического параболического расширителя (ТПР) II; блока формирования обрабатываемого лазерного пучка (БФОЛП) III.

Обрабатываемый объект 1, укрепленный на прецизионном трехкоординатном столике, располагается в пространстве объектов ЛПМ, который состоит из объектива 2, усилителя яркости изображения 3 типа УЛ-102, светоделительного элемента 4 и системы визуализации изображения 5.

Блок II включает в себя поворотное зеркало 6, малое параболическое зеркало 7, большие параболические зеркала 8 и 9, сканирующее плоское зеркало с механизмом поворота по двум углам (угловой сканатор) 10.

Выбор конструкции расширителя обусловлен тем, что, во-первых, параболические системы обладают гораздо меньшими значениями аберраций (для случая центрированных систем), а во-вторых, возможность гибкого масштабирования поля обработки в данной системе позволяет значительно уменьшить линейные погрешности лазерной обработки.

Блок III состоит из согласующей оптической системы 11, быстродействующего модулятора лазерного излучения 12 и аргонового лазера непрерывного

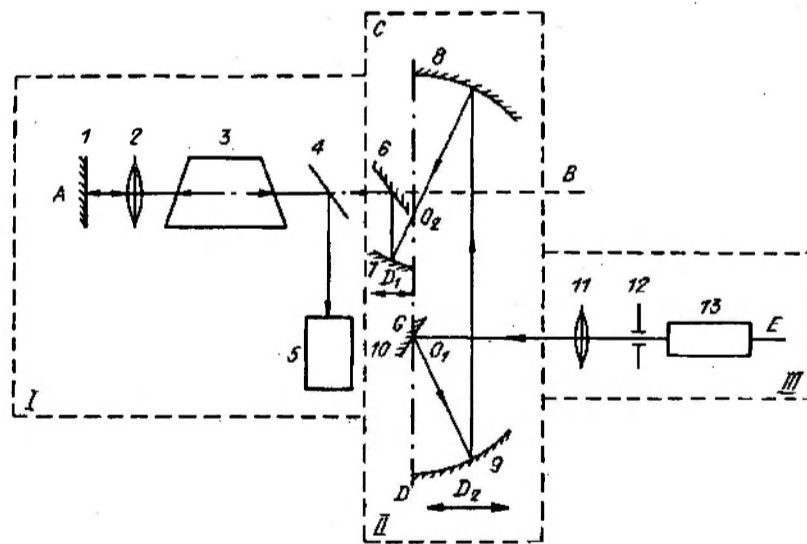


Рис. 1

Диаметр зеркала 7	D_1	20—30 мм
Фокусное расстояние зеркал 8, 9	f	150—200 мм
Диаметр зеркал 8, 9	D_2	100—150 мм
Время срабатывания модулятора	τ	Не более 1—2 мкс

действия 13 типа ЛГН-503. На рис. 1 оптические оси обозначены следующим образом: AB — оптическая ось ЛПМ, CD — оптическая ось ТПР и GE — оптическая ось БФОЛП.

Лазерный пучок, формируемый в блоке III, попадает в центр зеркала 10 в точку O_1 , совпадающую с фокусом параболического зеркала 9. Зеркало 10 поворачивает пучок на заданный угол так, что он попадает на зеркало 9 внутри области диаметра D_2 . После отражения от зеркала 9 пучок распространяется параллельно оптической оси CD зеркал 7—9 (центр зеркала 10 также лежит на этой оси). Отражаясь от зеркала 8, пучок проходит через общий фокус зеркал 7 и 8, расположенный в точке O_2 , и попадает на зеркало 7 внутри области диаметра D_1 . Отразившись от зеркала 7, пучок, распространяясь параллельно оптической оси CD , поворачивается зеркалом 6, проходит через усилитель 3 и фокусируется объективом 2 в заданную точку на поверхности объекта 1, находящуюся в пределах поля зрения ЛПМ диаметра d .

Обрабатываемый участок объекта наблюдается с помощью системы визуального контроля — ЛПМ. При необходимости обрабатывающий пучок перекрывается быстродействующим модулятором 12.

Основные параметры оптических элементов приведены в таблице.

Угловая скорость поворота зеркала сканатора задается программным образом и изменяется от $1'/с$ до $30^\circ/с$.

Расчет оптической схемы. Для расчета оптической схемы системы используется эквивалентная схема (рис. 2).

Параболические зеркала 7—9 могут быть в некотором приближении заменены на сферические (погрешности учитываются при расчете).

Сферическое зеркало с радиусом кривизны R можно представить в виде эквивалентной ему комбинации из плоского зеркала и установленной рядом тонкой линзы с фокусным расстоянием $f = R/2$. Отсюда следует, что фокусные расстояния эквивалентных тонких линз будут соответственно равны $f_1 = R_1/2$ и $f_2 = R_2/2$. Как известно, распространение лазерного пучка в оптической системе описывается законом преобразования гауссовского пучка (закон ABCD) [9]:

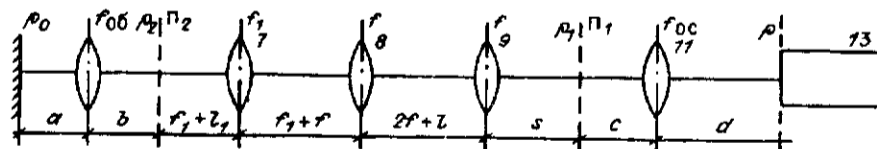


Рис. 2

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}, \quad (1)$$

где A, B, C, D — элементы лучевой матрицы оптической системы.

Комплексные параметры q_0 и q_1 описывают лазерный пучок на входе и выходе соответственно и имеют вид

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{r} - i \frac{\lambda}{\pi \rho^2}, \quad (2)$$

где r — радиус кривизны волнового фронта; ρ — радиус поперечного сечения пучка; λ — длина волны излучения.

В том случае, когда в генераторе 13 используется резонатор с плоским выходным зеркалом, перетяжка пучка находится в плоскости зеркала (плоскость, в которой радиус кривизны волнового фронта пучка равен бесконечности).

Поэтому, считая, что радиус пучка в плоскости выходного зеркала резонатора равен ρ , комплексный параметр пучка можно определить из соотношения

$$\frac{1}{q} = -i \frac{\lambda}{\pi \rho^2}. \quad (3)$$

После прохождения согласующей оптической системы 11 лазерный пучок будет иметь перетяжку с радиусом ρ_1 на расстоянии c от главной плоскости согласующей оптической системы.

Величины ρ_1 и c определяются следующим образом.

Вычислим методами матричной оптики [9] оптическую матрицу, описывающую распространение пучка от плоскости выходного зеркала резонатора до плоскости перетяжки Π_1 . Комплексный параметр пучка преобразуется согласно (1), но поскольку он определяется в плоскости перетяжки, он должен иметь вид (3). Отсюда легко получить

$$\rho_1 = \frac{\rho}{\left((d/f_{oc}) - 1 \right)^2 + (\pi \rho^2 / \lambda f_{oc})^2}^{1/2} \quad (4)$$

и

$$c = f_{oc} + \frac{d - f_{oc}}{\left((d/f_{oc}) - 1 \right)^2 + (\pi \rho^2 / \lambda f_{oc})^2},$$

где d — расстояние от плоскости выходного зеркала генератора 13 до главной плоскости согласующей оптической системы 11 ; f_{oc} — фокусное расстояние согласующей оптической системы 11 .

После прохождения трехзеркального телескопического расширителя лазерный пучок будет иметь перетяжку радиусом ρ_2 на расстоянии $f_1 + l_1$ от главной плоскости линзы 7 . Аналогично (4) можно получить

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 l_1}{\left((s - f)^2 + (\pi \rho_1^2 / \lambda)^2 \right)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$l_1 = \frac{(s - f)^2}{(s - f)^2 + (\pi \rho_1^2 / \lambda)^2} - 1 (f_1 / f)^2,$$

где $2f + l$ — расстояние между главными плоскостями линз 8 и 9 ; s — расстояние от плоскости перетяжки Π_1 до главной плоскости линзы 9 ; $f + f_1$ — расстояние между главными плоскостями линз 7 и 8 .

Для обеспечения наилучшего качества обработки объекта необходимо, чтобы в плоскости объекта обрабатывающий пучок имел перетяжку заданного радиуса ρ_0 . Из условия обратимости ясно, что пучок, имеющий перетяжку в плоскости объекта радиусом ρ_0 , в плоскости Π_2 должен иметь перетяжку радиусом ρ_2 . Таким же образом, как в (4) и (5), можно легко получить

$$\rho_2 \approx \frac{\rho_0}{a/f_{об} - 1}, \quad b \approx \frac{a}{a/f_{об} - 1}, \quad (6)$$

где a — расстояние от плоскости объекта до главной плоскости объектива; b — расстояние от главной плоскости объектива до плоскости перетяжки Π_2 ; $f_{об}$ — фокусное расстояние объектива. При выводе (6) учитывалось, что для реальных оптических систем и значений ρ_0 , имеющих практическое значение, $(\pi\rho_0^2/\lambda f_{об})^2 \ll 1$. Из сравнения (5) и (6) получим следующее выражение для ρ_0 :

$$\rho_0 = \frac{\rho_2 f_1 (a/f_{об} - 1)}{(s - f)^2 + (\pi\rho_2^2/\lambda)^2}^{1/2}. \quad (7)$$

Расчет оптической схемы установки приведен для случая, когда зеркало 10 (см. рис. 1) расположено таким образом, что ось отраженного от него лазерного пучка будет совпадать с оптической осью ТПР.

Рассмотрим прохождение пучка через ТПР при повороте зеркала 10 на произвольный угол в плоскости xOz (рис. 3).

Каждый небольшой участок параболического зеркала может быть заменен сферическим, радиус кривизны которого будет зависеть от координаты x :

$$R' = 2f + \frac{x^2}{8f}, \quad (8)$$

где f — фокусное расстояние параболического зеркала.

При повороте зеркала 10 на произвольный угол расстояние, проходимое пучком от поверхности зеркала 10 до поверхности зеркала 9, будет равно

$$f' = f + \frac{x^2}{4f}. \quad (9)$$

Расстояние, проходимое пучком между зеркалами 8 и 9, уменьшится на величину

$$2\Delta = \frac{x^2}{2f}. \quad (10)$$

В 1-м порядке по малой величине Δ радиус перетяжки пучка ρ_2' в плоскости Π_2' и расстояние от нее до зеркала 7 $f_1 + l_1'$ аналогично (5) равны

$$f_1 + l_1' = f_1 + l_1 + \epsilon\Delta, \quad (11)$$

$$\rho_2' = \rho_2(1 + \gamma\Delta/f_1),$$

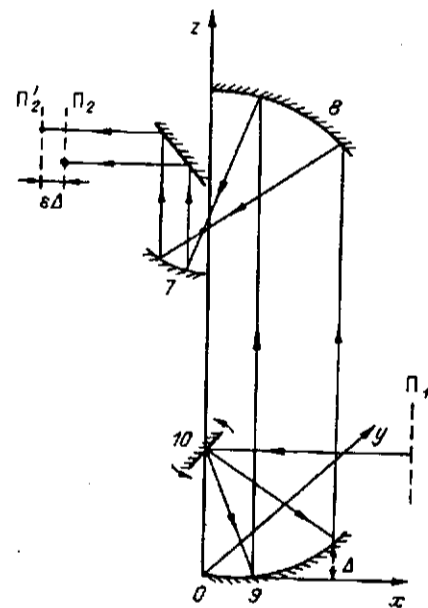


Рис. 3

где

$$\varepsilon = \frac{f_1^2}{f^2} \left(3 + \frac{l}{f} - \frac{l^2}{2f^2} \right) + \frac{(s-f)l}{2f^2 \left(((s-f)/f_1)^2 + (\pi\rho_1^2/\lambda f_1)^2 \right)} +$$

$$+ \frac{(\pi\rho_1^2/\lambda f_1)^2 (1 + (s-f)l/2f^2) - ((s-f)/f)^2 (1 - (s-f)l/2f^2)}{\left(((s-f)/f_1)^2 + (\pi\rho_1^2/\lambda f_1)^2 \right)^2},$$

$$\gamma = \frac{(s-f)f_1}{(s-f)^2 + (\pi\rho_1^2/\lambda)^2} - \frac{lf_1}{2f^2}.$$

Размер перетяжки ρ'_0 вблизи объекта и расстояние от нее до главной плоскости объектива a' равны

$$\rho'_0 = \rho_0 + \frac{\gamma}{b/f_{oc} - 1} \frac{\rho_2}{f_1} \Delta, \quad (12)$$

$$a' = a + \frac{\varepsilon}{(b/f_{oc} - 1)^2} \Delta.$$

Оценим величину изменения радиуса перетяжки ρ'_0 вблизи объекта и расстояние от нее до главной плоскости объектива a' за счет несферичности зеркал 8 и 9.

Для заданных параметров $f = 150$, $f_1 = 50$, $f_{oc} = 20$, $f_{oc} = 315$, $\rho = 0,5$, $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-4}$, $s = 290$, $l = 50$, $x = 100$ мм величины ошибок по формуле (12) будут равны

$$a' = a + 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ мм},$$

$$\rho'_0 = \rho_0 - 4,34 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

Радиус обрабатываемого пучка в плоскости объекта определяется по формуле

$$\rho''_0 = \rho'_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda\beta}{\pi\rho_0^2} \right)^2}, \quad (13)$$

где

$$\beta = \frac{\rho_2 \gamma}{f_1((b/f_{oc}) - 1)} \Delta.$$

Подставляя численные значения, получаем $\rho''_0 = 1,08\rho_0$, т. е. радиус обрабатываемого пучка на объекте меняется не более чем на 10 % при движении пучка по плоскости объекта в пределах поля зрения ЛПМ.

Вывод уравнения движения сканирующего лазерного пучка и изменения углов наклона рабочего зеркала. Зеркало 10 обладает двумя степенями свободы (может поворачиваться в двух перпендикулярных плоскостях). Поворот зеркала будем описывать углами θ и φ в сферической системе координат с центром, находящимся в точке пересечения плоскости зеркала 10 с осью зеркал 8 и 9 (рис. 4). При повороте зеркала 10 обрабатываемый пучок перемещается по поверхности зеркала 9 с определенной скоростью, описывая заданную траекторию в плоскости xOy , и после отражения от зеркал оптической системы

и прохождения через объектив попадает на объект, где производит обработку поверхности.

Рассчитаем теперь, по какому закону должны изменяться углы наклона зеркала θ и φ для того, чтобы в плоскости xOy на рис. 3 (а также на объекте) лазерный пучок двигался по заданной траектории с постоянной скоростью.

Координаты точки пересечения обрабатывающего пучка* с поверхностью зеркала ϱ имеют вид

$$\begin{cases} x(t) = 2f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) \cdot \cos(\varphi(t)), \\ y(t) = 2f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) \cdot \sin(\varphi(t)). \end{cases} \quad (14)$$

Введем обозначение: $\kappa(t) \equiv \operatorname{tg}\frac{\theta(t)}{2}$. Траектория движения луча описывается формулой

$$F(x(t), y(t)) = 0, \quad (15)$$

а условие постоянства скорости вдоль траектории — равенством

$$(V_x)^2 + (V_y)^2 = V^2 = \operatorname{const}, \quad (16)$$

где $v_x \equiv \frac{dx}{dt}$, $v_y \equiv \frac{dy}{dt}$. Из (15) и (16) легко получить, что

$$\begin{aligned} V_x &= V \frac{\partial F / \partial y}{\sqrt{(\partial F / \partial x)^2 + (\partial F / \partial y)^2}}, \\ V_y &= V \frac{\partial F / \partial x}{\sqrt{(\partial F / \partial x)^2 + (\partial F / \partial y)^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Поскольку в соответствии с (14)

$$\frac{dx}{dt} = 2f(\cos\varphi \cdot \kappa' - \kappa \cdot \sin\varphi \cdot \varphi'), \quad \frac{dy}{dt} = 2f(\sin\varphi \cdot \kappa' + \kappa \cdot \cos\varphi \cdot \varphi'), \quad (18)$$

то, подставляя V_x и V_y из (17), получаем систему дифференциальных уравнений 1-го порядка относительно величин $\varphi(t)$ и $\kappa(t)$.

Рассмотрим два наиболее простых случая.

Пусть $F(x, y) = Ax + By - C$ ($A, B, C = \operatorname{const}$), т. е. траектория представляет собой прямую линию. Тогда $V_x, V_y = \operatorname{const}$. Решение системы (18) приводит к следующему результату:

$$\varphi(t) = \alpha \pm \operatorname{arcsin} \frac{C_1}{\sqrt{(\omega t + C_1 C_2)^2 + C_1^2}}, \quad (19)$$

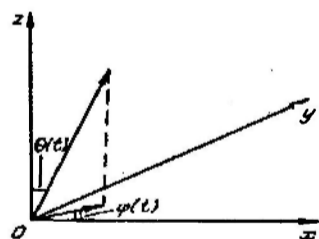


Рис. 4

* Поскольку лазерный пучок генератора имеет малое поперечное сечение, его можно рассматривать в настоящем расчете как луч.

$$\theta(t) = \pm 2 \operatorname{arctg} \sqrt{(\omega t + C_1 C_2)^2 + C_1^2},$$

где

$$\alpha = \arcsin(V_y/V), \quad \omega = V/2f,$$

$$C_1 = \operatorname{tg} \frac{\theta(t=0)}{2} \sin[\varphi(t=0) - \alpha], \quad C_2 = \operatorname{ctg}[\varphi(t=0) - \alpha].$$

Если $F(x, y) = x^2 + y^2 - R^2$ (окружность), то решение системы (18) дает:

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg}(C_1 \exp(2\omega t)) - \frac{\pi}{4}, \quad (20)$$

$$\theta(t) = 2 \operatorname{arctg}(C_2 \sqrt{1 + C_1^2 \exp(4\omega t)}),$$

где

$$C_1 = \operatorname{tg} \left[\varphi(t=0) + \frac{\pi}{4} \right], \quad C_2 = \frac{\operatorname{tg} |\theta(t=0)/2|}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 [\varphi(t=0) + \pi/4]}}, \quad \omega = V/R.$$

В том случае, когда траектория движения луча должна иметь другой вид, решение системы (18) можно получить численными методами. Полученный алгоритм поворота зеркала закладывается в управляющую ЭВМ, и таким образом оказывается возможным получить на объекте кривую произвольного порядка.

ВЫВОДЫ

Основным преимуществом данной оптической схемы является большая гибкость системы сканирования, определяющаяся тем, что сканирование производится лазерным лучом по поверхности неподвижного объекта, что даст возможность устранить сложности, связанные с точным перемещением по достаточно сложной траектории самого объекта. Выбранная оптическая схема, как видно из приведенных расчетов, обладает той особенностью, что по достаточно простым формулам можно создать алгоритм изменения углов сканирующего зеркала (углового сканатора). Это позволит получить автоматизированную систему для лазерной обработки объектов. При этом разработанная оптическая система дает возможность:

- реализации и совмещения в одном цикле растрового и векторного способов сканирования,
- осуществления режима «прямого письма» с воспроизведением кривых 1-го и 2-го порядков,
- программируемого задания скорости перемещения обрабатываемого пучка с плавающим значением скорости в одном цикле.

Таким образом, описанная оптическая система может быть применена в различных лазерографических комплексах для решения широкого круга задач современной микроэлектроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McWilliams B. M., Herman I. P., Mitlitsky F. et al. Wafer-scale laser pantography. Fabrication of n-metal-oxide-semiconductor transistors and small-scale integrated circuits by direct-write laser-induced pyrolytic reactions // *Appl. Phys. Lett.*—1983.—43, N 10.—P. 946.
2. Burgraaf P. Laser pattern generation // *Semiconductor International.*—1988.—11, N 6.—P. 116.
3. Таруи Я. Основы технологии СБИС.—М.: Радио и связь, 1985.
4. Коул Б. Производственный модуль компании Lasa для быстрой специализации вентиляционных матриц // *Электроника.*—1987.—№ 23.
5. Коул Б. Лазерная микрообработка — эффективный метод оперативного изготовления опытных образцов матричных ИС // Там же.

6. Ахманов А. С. Лазерная и традиционная полупроводниковая технология — сравнительный анализ // Итоги науки и техники (ВИНИТИ). Сер. Физические основы лазерной пучковой технологии.—1989.—3.—С. 4.
7. Бакиев А. М., Валиев С. Х., Кряжев Н. В. и др. Лазерная проекционная установка для переноса изображений с усилителем яркости // Автометрия.—1990.—№ 5.
8. Бакиев А. М., Валиев С. Х. Оптическая система для лазерной пантографии // Квантовая электрон.—1990.—17, № 9.
9. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения.— М.: Наука, 1989.
10. Оптические системы с усилителями яркости /Под ред. В. И. Беспалова, Г. А. Пасманика.— Горький: ИПФ АН СССР, 1988.

Поступила в редакцию 20 мая 1991 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!