

дальнейшем для обмена данными с конкретным модулем достаточно выполнения одной команды IN/OUT.

Описанное устройство может быть применено в интеллектуальных оптико-электронных системах для измерения прозрачности, анизотропии, для исследования магнитооптических свойств тонких пленок и т. д.

Авторы благодарят к. т. н. В. С. Соболева за содействие в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика полупроводниковых лазеров: Пер. с яп. /Под ред. Х. Такумы.—М.: Мир, 1989.
2. Рандошкин В. В., Червоненкис А. Я. Прикладная магнитооптика.—М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Самуцевич С. О. Запоминающие устройства на оптических дисках // Радиозлектроника (состояние и тенденция развития).—М.: НИИЭИР, 1985.—Тетр. 11.
4. Imamura N., Ota S. Experimental study on magneto-optical disk exerciser with the laser diode and amorphous magnetic thin films // Jap. J. Appl. Phys.—1980.—19, N 12.—P. L731.
5. Манько М. А., Махсудов Б. И., Фам Ван Хой. Изучение формы волнового фронта планарных полосковых AlAs/GaAs-гетеролазеров // Тр. физ. ин-та им. П. Н. Лебедева.—М.: Наука, 1986.
6. Жмудь А. М., Дуб А. Д., Матыко Ю. В. и др. Миниатюрные излучатели ИЛПН // Радио.—1986.—№ 11.
7. Баркан И. Б., Павленко Л. К., Павлов В. Е. Особенности спектральной перестройки полупроводникового лазера ИЛПН-102 // Перестраиваемые лазеры и их применение: Сб. науч. тр. /Под ред. В. П. Чеботаева.—Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1988.
8. Жмудь В. А., Соболев В. С., Столповский А. А. и др. Малогабаритные источники когерентного света на основе инжекционных полупроводниковых лазеров непрерывного и импульсного типа.—Новосибирск, 1989.—(Препр. /СО АН СССР. ИАиЭ; 432).
9. Yamaguchi S., Suzuki M. Frequency stabilization of diode lasers by use of the optogalvanic effect // Appl. Phys. Lett.—1982.—41.—P. 597.
10. Yamaguchi S., Suzuki M. Frequency locking at an InGaAsP semiconductor lasers to the first overtone vibration-rotation lines of hydrogen fluoride // Appl. Phys. Lett.—1982.—41(11).—P. 1034.
11. Жмудь В. А., Столповский А. А. Устройство стабилизации режима работы полупроводникового лазера // Автометрия.—1988.—№ 2.
12. Производственное объединение «Север» (реклама) // Автометрия.—1990.—№ 4.
13. Воевода А. А., Жмудь В. А. Оптимизация динамики контура термостабилизации полупроводникового лазера. Развитие метода локализации // Автометрия.—1990.—№ 1.
14. Воевода А. А., Востриков А. С., Жмудь В. А. Управление линейными нестационарными динамическими объектами по методу локализации.—Новосибирск, 1988.—(Препр. /СО АН СССР. ИАиЭ; 407).
15. Востриков А. С., Воевода А. А., Мучкин В. С. и др. Дискретные системы автоматического управления на основе метода локализации.—Новосибирск: НЭТИ, 1990.

Поступила в редакцию 2 августа 1991 г.

УДК 535.317.1

Ю. В. Вовк, В. Н. Затолокин, И. Б. Рудаков, А. В. Трубецкой,  
П. М. Шипов, Ю. Я. Шматов, И. Ш. Штейнберг, Ю. А. Щепеткин  
(Новосибирск)

#### АКУСТООПТИЧЕСКИЙ СКАНЕР НА ОСНОВЕ БЕГУЩЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛЧМ-ЛИНЗЫ

Разработан и исследован акустооптический сканер на основе бегущей акустической линзы. Линза сформирована акустическим ЛЧМ-импульсом, занимающим только часть апертуры отклоняющей ячейки. Рассмотрены основные характеристики сканера: разрешение, скорость сканирования, оптическая эффективность. Проведена оценка снижения разрешения сканера из-за некогерентности лазерного излучения и предложена оптическая система для устранения этого эффекта. Рассмотрены вопросы создания электронных блоков формирования ЛЧМ-сигнала и управления полупроводниковым лазером. Приведены результаты комплексной разработки сканера с разрешением 1000 позиций, включающего в себя полупроводниковый лазер, отклоняющую ячейку на  $\text{TeO}_2$ , оптическую систему и электронную систему управления, соединенную с ЭВМ.

В ряде перспективных оптико-электронных систем обработки, записи и воспроизведения информации необходимы устройства скоростного сканирования лазерного пучка. Обычно требуется обеспечить время цикла сканирования 64 мкс и количество разрешимых положений пучка порядка нескольких сотен. Для реализации таких характеристик наиболее подходят акустооптические сканеры, основанные на дифракции светового пучка на акустической волне с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В зависимости от соотношения между длительностью  $T$  ЛЧМ-сигнала и апертурным временем  $\tau$  отклоняющей акустооптической ячейки (АОЯ) возможны два типа сканеров: сканер с  $T > \tau$  и сканер с  $T < \tau$  [1, 2]. Наиболее изучен первый тип сканера ( $T > \tau$ ). Так, в работах [1, 3] для этого случая проведена оценка количества разрешимых положений светового пучка, скорости сканирования и изучен эффект «цилиндрической линзы», возникающий в таких сканерах. Второй тип сканера ( $T < \tau$ ) может быть назван сканером типа «бегущая ЛЧМ-линза», так как в этом случае акустический ЛЧМ-импульс, распространяющийся в ячейке, представляет собой цилиндрическую дифракционную линзу, которая занимает только часть апертюры АОЯ. Данный сканер в некоторых случаях может иметь преимущества перед сканером первого типа. Однако в настоящее время недостаточно изучены основные характеристики и особенности разработки сканеров на основе бегущей ЛЧМ-линзы.

Данная работа посвящена исследованию и разработке сканера типа «бегущая ЛЧМ-линза» на основе кристалла парателлурига ( $\text{TeO}_2$ ). Кратко рассмотрены основные характеристики сканера: разрешающая способность, скорость сканирования, оптическая эффективность. Проведена оценка эффекта снижения разрешающей способности сканера из-за некогерентности лазерного излучения (эффект хроматизма). Этот эффект является существенным при использовании инжекционных полупроводниковых лазеров. Для устранения эффекта хроматизма предложена специальная оптическая система.

Рассмотрены вопросы создания электронных блоков формирования ЛЧМ-импульса для возбуждения АОЯ и управления полупроводниковым лазером.

Приведены результаты комплексной разработки сканера с разрешением  $\approx 1000$  позиций, включающего в себя полупроводниковый лазер, АОЯ на  $\text{TeO}_2$ , оптическую систему и электронную систему управления.

Основные характеристики сканера. Принцип работы сканера поясняет схема на рис. 1, где 1 — фотоупругая среда, 2 — пьезопреобразователь, 3 — поглотитель звука. В фотоупругой среде с помощью пьезопреобразователя формируется акустический импульс с линейной модуляцией частоты и прямоугольной огибающей. Амплитуда управляющего сигнала на пьезопреобразователе определяется выражением

$$U = \text{rect}(t/T) \cos(\omega_0 t + \pi \mu t^2),$$

где  $t$  — время;  $T$  — длительность импульса;  $\omega_0$  — начальная круговая частота;  $\mu$  — скорость возрастания частоты. Диапазон изменения временной частоты этого сигнала  $\Delta f = \mu T$ . Время пробега звука через среду  $\tau = L/V$ , где  $L$  — размер апертюры АОЯ,  $V$  — скорость звука. Протяженность акустического импульса в среде  $l = TV$ . В данном случае полагаем, что  $T \leq \tau$ , т. е.  $l \leq L$ .

Фотоупругая среда освещается лазерным пучком  $i$  с плоским волновым фронтом. В результате дифракции света на акустическом ЛЧМ-импульсе формируется дифрагированный световой пучок  $d$  с цилиндрическим волно-

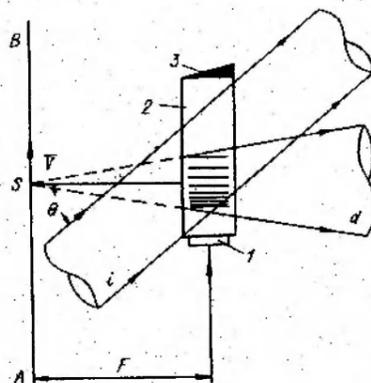


Рис. 1

вым фронтом. По своему действию акустический ЛЧМ-импульс подобен бегущей цилиндрической линзе с фокусным расстоянием [3]

$$F = V^2/\lambda\mu = \frac{V^2 T}{\lambda \Delta f}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света.

В нашем случае дифрагированный пучок сходится в мнимой точке  $S$  перед АОЯ (см. рис. 1). Точка схождения пучка перемещается вдоль прямой  $AB$  со скоростью звука  $V$  на расстояние  $r = L - l = (\tau - T)V$ . При освещении ячейки пучком с равномерным распределением интенсивности распределение энергии света в точке  $S$  вдоль прямой  $AB$  описывается функцией  $\text{sinc}^2(x)$ . Размер  $d$  светового пятна в этой точке по критерию Рэля (т. е. по уровню спада интенсивности 0,4) равен

$$d = \lambda F/l = V/\Delta f. \quad (2)$$

Отсюда количество разрешимых положений светового пятна

$$N = r/d = \Delta f(\tau - T), \quad (3)$$

а средняя за время цикла  $\tau$  скорость сканирования

$$S = N/\tau = \Delta f/(1 - T/\tau). \quad (4)$$

В случае сканера с «длинным» ЛЧМ-импульсом ( $T > \tau$ ) соответствующие выражения для  $N$  и  $S$  имеют вид [4]:  $N = \Delta f\tau(1 - \tau/T)$  и  $S = \Delta f\tau(1 - \tau/T)/T$ . При этом скорость сканирования принимает максимальное значение  $S = \Delta f/4$  при  $\tau/T = 1/2$ . Для сканера типа «бегущая линза» ( $T < \tau$ ) при  $T/\tau = 1/2$  скорость сканирования  $S = \Delta f/2$ , а при  $T \ll \tau$  стремится к максимальному значению:  $S \rightarrow \Delta f$ . Отсюда ясно, что сканер типа «бегущая линза» позволяет получить более высокую скорость сканирования, чем сканер с «длинным» ЛЧМ-импульсом.

Оптическая эффективность для сканера типа «бегущая линза» определена путем численных расчетов. Предполагалось, что АОЯ освещается лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности, причем центр этого распределения совпадает с центром апертуры АОЯ. За значение оптической эффективности  $K$  принималось отношение световой мощности, попадающей в апертуру ЛЧМ-линзы, к общей мощности падающего светового пучка. Зависимость  $K$  от положения ЛЧМ-линзы в апертуре АОЯ характеризует распределение интенсивности световых пучков по позициям. Результаты расчета эффективности  $K$  от нормированной координаты  $x/r$  ЛЧМ-линзы в апертуре АОЯ приведены на рис. 2. Расчеты проведены для случая  $l/L = T/\tau = 1/2$  и для различных уровней  $P$  спада интенсивности освещающего пучка на краях апертуры АОЯ. Видно, что с повышением равномерности распределения интенсивности освещающего пучка по апертуре АОЯ (увеличение  $P$ ) оптическая эффективность  $K$  падает, а равномерность ее распределения по координате повышается. При  $P = 0,7$  значение  $K$  изменяется от 0,38 до 0,45. При этом неравномерность интенсивности световых пучков по позициям не превышает 15%.

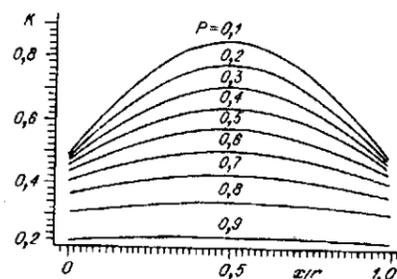


Рис. 2

Таким образом, недостатком сканера типа «бегущая линза» является неполное использование мощности освещающего светового пучка, а преимущество — независимость распределения интенсивности световых пучков по позициям от частотной характеристики АОЯ.

Средний угол между падающим и дифрагированным световыми пучками в акустооптической ячейке  $\Theta \approx \lambda f_0/V$ , где  $f_0$  — средняя частота

ЛЧМ-импульса. Координата  $x$  точки схождения  $S$  дифрагированного пучка  $x = \Theta F + Vt$ . При изменении длины волны света на  $d\lambda$  изменение координаты  $dx$  будет определяться в основном изменением угла  $\Theta$ . Тогда получаем

$$dx = d\Theta F = d\lambda V T f_0 / (\lambda \Delta f). \quad (5)$$

Отсюда коэффициент уширения  $R$  размера светового пятна для излучения с шириной спектра  $d\lambda$  равен  $R = (d + dx)/d$ . С учетом выражений (2) и (5) получаем

$$R = 1 + (f_0 T) d\lambda / \lambda. \quad (6)$$

Из (6) следует, что с уменьшением длительности импульса  $T$  коэффициент  $R$  уменьшается, т. е. снижается хроматизм сканера. Кроме того, из (3) видно, что уменьшение  $T$  ведет к повышению разрешения. Однако на практике уменьшение  $T$  в ряде случаев неприемлемо из-за снижения оптической эффективности сканера.

Для применения в сканере разработана АОЯ на кристалле  $\text{TeO}_2$ . В  $\text{TeO}_2$  используется аномальная дифракция света на сдвиговой акустической волне, распространяющейся со скоростью  $V = 0,62$  км/с вдоль направления  $[110]$  кристалла. Для получения заданной средней акустической частоты  $f_0$  широкополосной дифракции света оптическая ось  $[001]$  кристалла наклонена на соответствующий угол  $\Theta_n$  к плоскости дифракции света [5]. В данном случае выбрано значение  $\Theta_n = 6,5$ , которое обеспечивает частоту  $f_0 = 60$  МГц для  $\lambda = 850$  нм. В АОЯ получена полоса частот  $\Delta f = 32$  МГц по половинному уровню спада интенсивности дифрагированного света. Эффективность дифракции света в максимуме частотной характеристики  $\sim 70\%$  при управляющей мощности  $\sim 2$  Вт. Размер световой апертуры АОЯ  $12 \times 40$  мм (40 мм в направлении распространения звука), апертурное время АОЯ  $\tau = 64$  мкс.

В составе сканера АОЯ на  $\text{TeO}_2$  управляется ЛЧМ-импульсом с полосой частот  $\Delta f = 36,8$  МГц и длительностью  $T = 32,8$  мкс. При этом фокусное расстояние бегущей линзы в АОЯ из (1) равно  $F = 414$  мм, размер светового пятна (при  $\Delta f = 32$  МГц)  $d = 0,022$  мм, что согласно (3) и (4) дает разрешение  $N = 1000$  и скорость сканирования  $S = 16 \cdot 10^6$  точек/с. Для лазера с  $\lambda = 850$  нм и шириной спектра  $d\lambda \approx 3$  нм коэффициент уширения пятна из (6) равен  $R = 2,35$ , т. е. хроматизм сканера существенно влияет на разрешающую способность.

**Оптическая система.** Оптическая система сканера, представленная на рис. 3 в двух проекциях, формирует в выходной плоскости бегущее световое пятно одинаковыми размерами по обеим координатам и устраняет хроматизм АОЯ. Цифрами на этом рисунке обозначены: 1 — лазер, 2 — сферический объектив, коллимирующий лазерное излучение, 3 — АОЯ, 4, 7 — сферические объективы, образующие телескопическую систему, 5 — цилиндрическая линза, 6 — дифракционная решетка. Ячейка 3 формирует в передней фокальной плоскости объектива 4 мнимое изображение бегущей световой точки (см. рис. 1). Отрицательная цилиндрическая линза 5 устраняет сходимости светового пучка по координате  $y$  после объектива 4. В результате этого на дифракционную решетку 6, установленную в задней фокальной плоскости объектива 4, падает световой пучок с плоским волновым фронтом, отклоняющийся по углу. Направление отклонения дифрагированного пучка в решетке 6 противоположно направлению дифракции в АОЯ. Кроме того, пространственная частота  $\nu$  решетки 6 равна сред-

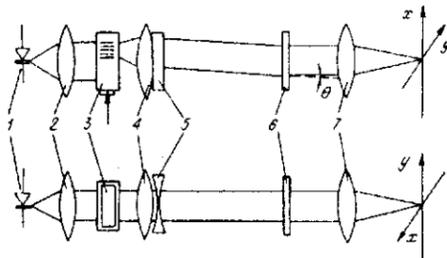


Рис. 3

ней пространственной частоте ЛЧМ-импульса в АОЯ  $z$ , т. е.  $\nu = f_0/V$ . В результате этого зависимость угла дифракции в АОЯ от длины волны света полностью компенсируется аналогичной зависимостью в дифракционной решетке. Объектив 7 фокусирует дифрагированный на решетке  $b$  световой пучок первого порядка в плоскость сканирования. При этом положение светового пятна в плоскости сканирования не зависит от длины волны света, т. е. устраняется хроматизм сканера.

При создании экспериментального образца сканера использованы следующие элементы: лазер ИЛПН-108 ( $\lambda = 850$  нм, мощность 40 мВт); АОЯ на  $\text{TeO}_2$ , объективы 16 КП-1,2/50 (объектив 2), «Индустар 11М» — 4,5/450 (объектив 4) и «Индустар 51» — 4,5/210 (объектив 7); цилиндрическая линза с фокусным расстоянием  $\sim 400$  мм. Дифракционная решетка изготовлена голографическим способом на фотоэмульсии ПЭ-2 и имеет пространственную частоту 100 лин/мм.

**Электронная система управления.** Электронная система сканера содержит блок формирования ЛЧМ-импульса и блок управления полупроводниковым лазером, соединенный с ЭВМ. В первом такте цикла сканирования формируется ЛЧМ-импульс на входе АОЯ. После того как акустический ЛЧМ-импульс заполнит начальный участок апертуры АОЯ, на лазер от блока управления подается серия из  $N$  коротких импульсов тока. Причем амплитуда каждого импульса задается программно от ЭВМ. Это позволяет в процессе сканирования светового пучка сформировать  $N$  позиций светового пятна с заданной экспозицией.

Рассмотрим принципы построения основных блоков электронной системы управления.

**Блок формирования ЛЧМ-импульса.** Структурная схема блока приведена на рис. 4. Она содержит генератор высокочастотного опорного напряжения (ГВЧ) со стабилизированной кварцем частотой  $f_{оп} = 62,4$  МГц; 12-разрядный счетчик адреса; постоянное запоминающее устройство (ПЗУ); цифроаналоговый преобразователь (ЦАП1); формирователь линейно изменяющегося во времени напряжения, выполненный на основе цифроаналогового преобразователя (ЦАП2); фазовый детектор (ФД); генератор с управляемой напряжением частотой (ГУН); делитель частоты; модулятор-селектор выходного напряжения и устройство управления.

Исходя из уровня допустимых aberrаций бегущей акустооптической линзы, необходимо, чтобы отклонение фазы ЛЧМ-сигнала от квадратичного закона не превышало  $\frac{\pi}{8} \div \frac{\pi}{4}$ . С этой целью фаза сигнала ГУН сравнивается с фазой опорного (образцового) напряжения и корректируется. Опорное ЛЧМ-напряжение создается цифровым способом: отсчеты этого сигнала, предварительно записанные в ПЗУ, преобразуются с помощью ЦАП1 и фильтра нижних частот в аналоговую форму.

Частота напряжения ГУН уменьшается делителем в 4 раза, после чего производится сравнение фазы этого сигнала с фазой опорного напряжения и подстройка частоты ГУН с помощью цепи фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Основное изменение частоты ГУН производится пилообразным напряжением. Цепь ФАПЧ устраняет лишь незначительную начальную расстройку и нелинейную зависимость частоты ГУН от управляющего пилообразного напряжения. Поскольку эти величины в

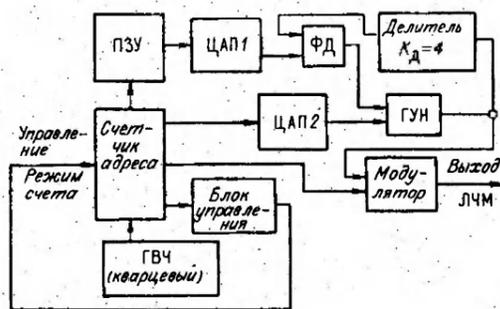


Рис. 4

сумме не превышают 3 % от максимальной частоты, требования к глубине отрицательной обратной связи цепи ФАПЧ и ошибка недокомпенсации фазы существенно уменьшаются.

Емкость ПЗУ — 2048 4-разрядных слов. Отсюда длительность ЛЧМ-сигнала  $T = 2048/f_{оп} = 32,8$  мкс. Скважность пилообразного напряжения равна 2, т. е. длительности ЛЧМ-сигналов и паузы между ними равны. Пилообразное напряжение несимметричной формы имеет крутой задний фронт. Это вызывает срыв непрерывного процесса автоподстройки частоты, поэтому после окончания каждого ЛЧМ-сигнала в промежутках-паузах производится захват и подстройка частоты ГУН цепью ФАПЧ. При этом образцовое напряжение, поступающее с цифрового генератора, имеет синусоидальную форму, а его частота соответствует наименьшему значению частоты ЛЧМ-сигнала. Шесть отсчетов этого сигнала записаны в первых ячейках ПЗУ. Счетчик после окончания формирования ЛЧМ-сигнала переводится в режим деления частоты на шесть, при этом происходит циклический периодический опрос шести отсчетов, из которых с помощью ЦАП формируется опорное синусоидальное напряжение. Действие цепи ФАПЧ приводит к захвату и подстройке частоты ГУН, величина которой соответствует значению нижней частоты ЛЧМ-сигнала  $f_n$  и составляет  $f_n = f_{оп}K_d/6 = 41,6$  МГц, где  $K_d = 4$  — коэффициент деления цифрового делителя частоты (см. рис. 4):

С началом формирования ЛЧМ-напряжения счетчик переключается в режим непрерывного счета импульсов, при этом адреса ПЗУ изменяются от 0 до 2047. Важно, чтобы переход от циклического режима к режиму формирования ЛЧМ-напряжения не вызывал существенных скачков фазы опорного сигнала, приводящих к сбою и повторному захвату частоты ГУН. С этой целью частота следования отсчетов выбрана кратной нижней частоте опорного ЛЧМ-сигнала. Количество отсчетов на периоде образцового напряжения наибольшей частоты — не менее 3, при этом в ПЗУ размещается 494 периода образцового сигнала. ГУН формирует ЛЧМ-сигнал с частотой, изменяющейся от 41,6 до 78,4 МГц. С помощью цепи ФАПЧ в 494 точках производится коррекция фазы этого сигнала. В результате отклонение фазы от квадратичного закона изменения, измеренное по величине рассогласования на выходе ФД, не превышает  $\pi/4$  рад в течение всей длительности ЛЧМ-сигнала.

**Блок управления полупроводниковым лазером.** Структурная схема этого блока (рис. 5) содержит буферное ОЗУ, выполняющее промежуточное хранение данных об амплитудах лазерных импульсов вдоль линии сканирования, поступающих от ЭВМ; генератор тактовых импульсов (ГТИ), управляющий чтением данных из буферного ОЗУ и формированием токовых импульсов питания лазера; цифроаналоговый преобразователь для преобразования данных буферного ОЗУ в уровень тока; блок питания, формирующий и усиливающий токовые импульсы накачки лазера. Кроме того, блок управления содержит командный регистр для установки режимов записи и чтения данных из буферного ОЗУ, селектор тактовых импульсов и двунаправленный шинный формирователь.

Блок управления сопрягается с контроллером графического дисплея ЭВМ, который представляет собой матрицу памяти на телевизионный кадр ( $512 \times 400$  ячеек 8-разрядных слов) и служит для хранения и передачи данных об амплитудах лазерных импульсов.

Передача информации в блок управления осуществляется с использованием стандартных ТВ-сигналов: ССИ — строчный синхроимпульс;

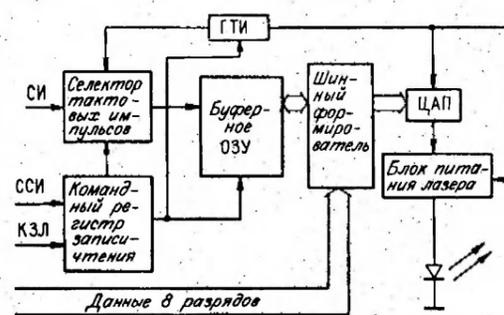


Рис. 5

СИ — синхроимпульс данных;  $D0—D7$  — 8 разрядов данных об амплитуде лазерного импульса. По переднему фронту сигнала ССИ командный регистр устанавливается в состояние *A* — режим записи данных  $D0—D7$  в буферное ОЗУ. Запись синхронизируется СИ, и данные заносятся в 128 ячеек памяти буферного ОЗУ в течение 32 мкс. Кроме того, сигнал ССИ запускает блок формирования ЛЧМ-сигнала, который через 32,8 мкс посылает в блок управления лазером сигнал «Конец заполнения линзы» (КЗЛ), означающий, что АОЯ готова к сканированию светового пучка. Сигнал КЗЛ устанавливает командный регистр в блоке управления в состояние *B* — режим чтения данных из буферного ОЗУ. При этом начинается генерация импульсов ГТИ, которые синхронизируют чтение данных из буферного ОЗУ. Восьмиразрядные слова, поступающие из буферного ОЗУ, преобразуются с помощью ЦАП в уровень тока. Блок питания формирует синхронно с импульсами ГТИ токовые импульсы накачки лазера с амплитудой, пропорциональной выходному току ЦАП.

Таким образом, наличие в блоке управления буферного ОЗУ позволяет согласовать скорость поступления данных от ЭВМ со скоростью сканирования светового пучка.

Блок управления лазером обеспечивает формирование токовых импульсов накачки лазера со следующими параметрами: число уровней амплитуды 256; минимальная длительность 5 нс; минимальный период следования 50 нс; максимальная амплитуда 0,5 А. В режиме управления от ЭВМ блок управления формирует 128 лазерных импульсов с программируемой интенсивностью за один цикл сканирования. В автономном режиме обеспечивается формирование 512 лазерных импульсов на цикл сканирования с одинаковой интенсивностью.

Результаты экспериментов. Проведены измерения разрешающей способности сканера и экспериментальная проверка компенсации хроматизма сканера с помощью дифракционной решетки. Интервал следования световых импульсов, излучаемых лазером, 750 нс, длительность 15 нс и импульсная мощность 40 мВт. Спектр излучения лазера в этом режиме имеет три световые моды с близкими интенсивностями. При этом в плоскости сканирования наблюдался растр световых пятен, фрагмент которого представлен на рис. 6, *a*. Видно, что каждое световое пятно имеет сложную структуру, соответствующую структуре мод лазерного излучения. При введении в оптическую схему дифракционной решетки изображение модовой структуры исчезает и растр принимает вид, представленный на рис. 6, *b*.

С помощью фотоприемной ПЗС-линейки измерен профиль интенсивности светового пятна сканера. Установлено, что уширение размера светового пятна сканера из-за аберраций бегущей акустической линзы не превышает 20%. На размер светового пятна сканера оказывает влияние также и сдвиг его во время экспозиции. При длительности лазерного импульса 15 нс сдвиг приводит к уширению пятна на 50%.

В сканере экспериментально реализовано отклонение светового пучка по 512 дискретным позициям. В этом эксперименте в цикле сканирования лазер излучал последовательность из 512 световых импульсов длительностью 15 нс, следующих через 64 нс. Фрагмент растра из 512 позиций (рис. 6, *c*) демонстрирует достаточно хорошее разрешение световых пятен. В этом растре

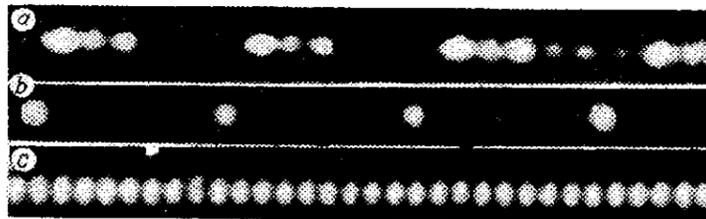


Рис. 6

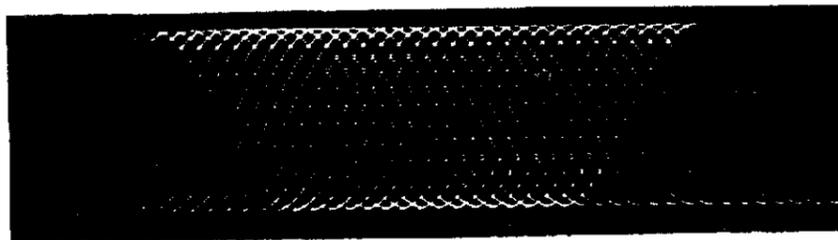


Рис. 7

интенсивность света в промежутках между световыми пятнами по отношению к интенсивности в центре пятен не превышает 0,5—0,6.

Разработанный сканер применен для отклонения изображения в одной из систем обработки информации [6]. Для этого в оптическую схему (см. рис. 3) вместо дифракционной решетки устанавливалась фурье-голограмма отклоняемого изображения. В качестве исходного изображения взят отрезок косинусоиды на участке  $(-\pi \div +\pi)$ , состоящий из 128 дискретных точек. Опорный пучок ( $\lambda = 0,6328$  мкм) при записи голограммы имел плоский волновой фронт. Голограмма такого изображения представляет собой суперпозицию 128 дифракционных решеток различных пространственных частот и ориентаций. Для частичной компенсации хроматизма сканера средняя пространственная частота этой голограммы была выбрана равной средней частоте акустической волны в АОЯ (100 лин./мм). Результат отклонения изображения в 32 позиции с шагом, равным  $1/16$  от полного размера, показан на рис. 7. Получено высокое оптическое качество отклоненных изображений.

**Заключение.** Сканер на основе бегущей акустической ЛЧМ-линзы имеет повышенную скорость сканирования. При длительности управляющего ЛЧМ-сигнала, составляющей половину апертурного времени АОЯ, скорость сканирования повышается не менее чем в 2 раза по сравнению со сканером с «длинным» ЛЧМ-сигналом. Другим преимуществом сканера является достаточно высокая равномерность интенсивности светового пучка вдоль линии сканирования, не зависящая от частотной характеристики АОЯ. Ценным свойством сканера является также возможность полного устранения эффекта хроматизма за счет применения в оптической системе дифракционной решетки. Это позволяет использовать в качестве источника света полупроводниковые лазеры.

Анизотропные АОЯ на  $\text{TeO}_2$  имеют большую световую апертуру при низкой управляющей мощности. Это упрощает оптическую систему и позволяет получить высокое разрешение сканера. При апертурном времени  $\tau = 64$  мкс и полосе частот 32 МГц разработанная ячейка может обеспечить количество разрешимых положений светового пучка  $N = 1000$ .

Для реализации высокого разрешения сканера необходима повышенная точность формирования управляющего ЛЧМ-сигнала. Создан блок формирования ЛЧМ-сигнала, основанный на цифровой коррекции фазовых ошибок. Блок обеспечивает формирование ЛЧМ-сигнала с полосой частот 36,8 МГц, длительностью 32,8 мкс и фазовыми ошибками относительно идеальной зависимости не более  $\pi/8 \div \pi/4$ .

Разработан блок управления полупроводниковым лазером, соединенный с ЭВМ, позволяющий формировать импульсы с заданной амплитудой в процессе сканирования светового пучка.

Экспериментальный макет сканера включает в себя полупроводниковый лазер ИЛПН-108 ( $\lambda = 0,85$  мкм, средняя мощность 40 мВт); АОЯ на  $\text{TeO}_2$  ( $\tau = 64$  мкс,  $\Delta f = 32$  МГц), оптическую систему с компенсацией хроматизма и электронную систему управления (блоки формирования ЛЧМ-сигнала и управления лазером), соединенную с ЭВМ. В макете получено 512 позиций светового пучка на строку с уровнем интенсивности света между соседними позициями не более 0,5—0,6.

Сканер применен для отклонения изображения, восстанавливаемого из голограммы, в одной из систем оптической обработки информации [6].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Балахший В. И., Парыгин В. Н. Акустооптические системы непрерывного сканирования света // Радиотехника и электроника.—1974.—19, № 10.
2. Broadford Merry J., Vademian L. Acousto-optic laser scanning // Proc. SPIE.—1979.—169: Laser Printing.
3. Dikson L. D. Optical considerations for an acoustooptical deflector // Appl. Opt.—1972.—11, N 10.—P. 2196.
4. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение.—М.: Сов. радио, 1978.
5. Семенов В. П. Анизотропный акустооптический дефлектор на одноосных кристаллах с оптической активностью // ЖТФ.—1981.—51, вып. 10.
6. Гофман М. А., Нежевенко Е. С., Фельдбуш В. И. Оптико-электронные сигнальные процессоры // Автометрия.—1989.—№ 3.

*Поступила в редакцию 7 июля 1991 г.*