

Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие режим воспроизведения серой шкалы мультиплексным ПВМС с электронной селекцией модулей:

a — управляющий электрический сигнал (масштаб по оси *OY* 150 В/см); *b* — оптический отклик (масштаб по оси *OX* 200 мкс/см)

Таким образом, мультиплексные ЦТСЛ керамические ПВМС могут эффективно использоваться как для цифровой, так и для аналоговой модуляции световых потоков. В цифровом режиме обеспечивается оптический контраст не ниже 100:1, в аналоговом — стабильное воспроизведение не менее восьми градаций равномерной шкалы серых тонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1211889 СССР. Фотоэлектрический преобразователь перемещения в код / В. А. Пилипович, А. В. Гук, В. Р. Малаховский и др. — Заявл. 26.04.84; Опубл. 15.02.86, Бюл. № 6.
2. Пилипович В. А., Малаховский В. Р., Гук А. В. и др. Многоканальный электрооптический модулятор на основе прозрачной керамики ЦТСЛ 9/65/35 // ПТЭ. — 1987. — № 2.
3. Тейлор Дж. Метод матричной выборки в схемах оптических вентилях с использованием оптической разности хода и вращения плоскости поляризации // ТИИЭР. — 1970. — 58, № 11.
4. Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. — М.: Радио и связь, 1987.
5. Pat. 4458989 USA. Electro-optic addressing apparatus and novel modulator configurations for use therein / Pin-Seng Tschang. — Publ. 10.07.84.
6. Гук А. В., Коленников П. И., Пилипович В. А. Устройство ввода информации в ГЗУ на основе ЖК управляемого транспаранта // Автометрия. — 1979. — № 1.

Поступила в редакцию 18 февраля 1988 г.

УДК 681.383.181.48 : 681.327.68.778.38

В. А. ЛАБУСОВ, И. В. ПЛЕХАНОВА, Л. В. ФИНОГЕНОВ
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ АПЕРТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДИОДНЫХ ЛИНЕЕК

Интегральные линейки фотоприемников широко используются в оптико-электронных системах различного назначения в качестве приемников оптического сигнала. Причем наибольшее распространение получили фоточувствительные линейки на ПЗС [1] и МДП фотодиодные линейки [2]. Последние в сравнении с ПЗС-устройствами обладают рядом преимуществ: требуют менее сложных схем управления, в них отсутствуют явления блюминга и неэффективности переноса заряда.

При разработке прецизионных измерительных систем на основе фотодиодных линеек, в которых точность определения параметров светового распределения должна быть сравнима или выше, чем пространственный период элементов [3], необходимо знать апертурные характеристики используемых фотоприемников. Под апертурной характеристикой $A(x, y)$ понимается зависимость эффективности сбора носителей

заряда, образующихся в полупроводнике при проекции светового пятна малого размера, от местоположения этого пятна [4].

В настоящей работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований апертурных характеристик кремниевых МДП фотодиодных линеек (ФДЛ) [5] трех исполнений: ТС-26/1, ЛФ1024-25/1, ЛФ1024-25/2, содержащих 1024 фотодиода с размерами $b \times l$ соответственно 16×20 , 19×20 , 19×150 мкм и шагом $H = 25$ мкм. Приведены схема экспериментальной установки, методика эксперимента, результаты эксперимента и их обсуждение.

Экспериментальная установка. Схема экспериментальной установки для определения апертурных характеристик ФДЛ приведена на рис. 1. Оптическая часть установки включает канал формирования светового пятна (элементы 1—7) и канал контроля размеров и формы пятна (элементы 6—9). В качестве источника света используется лазер ЛГ-79-1 ($\lambda = 0,63$ мкм). Параллельный пучок света формируется телескопической системой с фильтрацией низких пространственных частот, состоящей из микрообъектива 3 ($\times 8$; $f_3' = 18,1$ мм), диафрагмы 4 ($d = 30$ мкм) и объектива 5 (PO500-1, $f_5' = 90$ мм). Телескопическая система расширяет световой пучок, обеспечивая перекрытие апертуры микрообъектива 7 ($\times 40$; $f_7' = 4,3$ мм; $A = 0,65$), который фокусирует свет в зондирующее пятно. Минимальный размер пятна в такой системе, определяемый по диаметру нулевого порядка дифракционной картины Фраунгофера, вычисляется по формуле [6]

$$d_{\text{эри}} = 2,44\lambda f_7' / D_7 = 1,22\lambda / A_7,$$

где f_7' — фокусное расстояние объектива 7 (4,3 мм); D_7 — диаметр входного отверстия объектива 7; A_7 — числовая апертура объектива 7.

Для приведенных параметров объектива 7 $d_{\text{эри}} \sim 1,2$ мкм. Контрольный канал состоит из объектива 8 (ЗМ-5А, $f_8' = 500$ мм), в фокальной плоскости которой строится увеличенное в 116 раз изображение зондирующего пятна. Контроль формы и размеров пятна можно осуществлять с помощью окуляра 9. ФДЛ со снятым защитным стеклом размещена на столике с шаговым приводом, обеспечивающим перемещение ФДЛ по вертикали с шагом 2,5 мкм. В свою очередь, столик с ФДЛ закреплен на столике, обеспечивающем перемещение ФДЛ по горизонтали вручную с помощью микровинта (цена деления 5 мкм).

Электронная часть экспериментальной установки включает устройство управления ФДЛ, модули КАМАК: управления шаговым двигателем ШД (МУШД), 10-разрядный АЦП с буферным ЗУ, таймер, крейт-контроллер и ЭВМ «Электроника 60». Устройство управления ФДЛ предназначено для формирования сигналов управления ФДЛ, обеспечения синхронизации работы ФДЛ с аппаратурой КАМАК, предусилителя и обработки выходного сигнала ФДЛ по методу двойной коррелированной выборки. Таймер позволяет программно устанавливать время экспозиции ФДЛ от 1 мкс до 1 с.

Эксперимент. На первом этапе эксперимента проводили определение и минимизацию погрешностей измерений. Для этого был измерен размер зондирующего пятна, определена и снижена погрешность, связанная с шумами выходного сигнала и с шумами квантования сигнала в АЦП, установлена погрешность перемещения столика с шаговым приводом.

Измерение размеров увеличенного изображения зондирующего пятна производилось в фокусе объектива 8 контрольного канала с помощью фотоприемного устройства на основе ФДЛ (ЛФ1024-25/1). Изображение пятна сканировалось в двух взаимно перпендикулярных центральных сечениях. Полученное распределение интенсивности света, увеличенное в 116 раз, приведено на рис. 2, где расстояние между двумя соседними точками на графике равно периоду ФДЛ-25 мкм, а средний диаметр нулевого порядка дифракционной картины равен 10 периодам ФДЛ, что соответствует диаметру изображения пятна ~ 250 мкм. С уче-

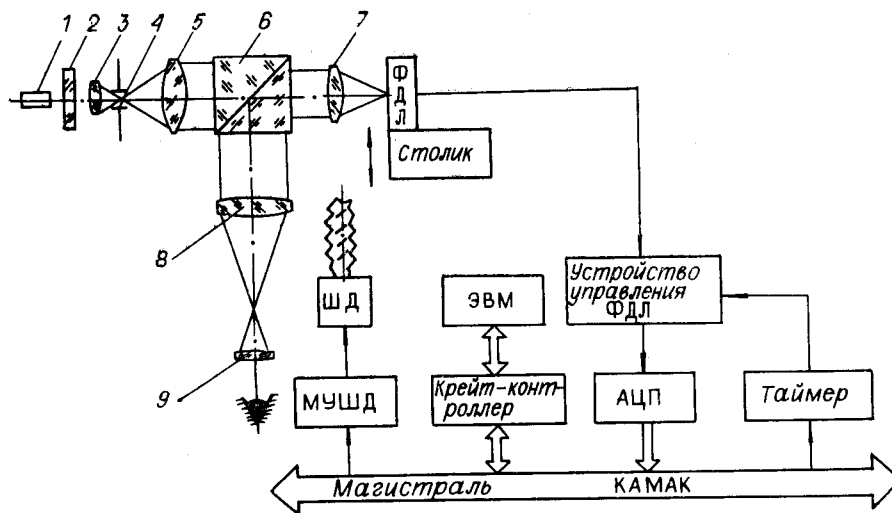


Рис. 1

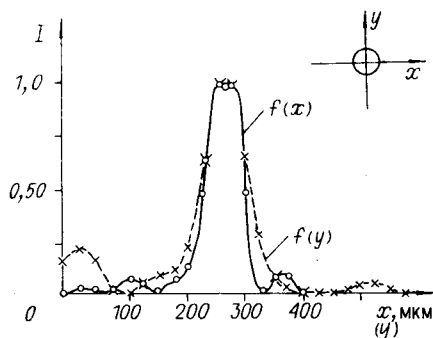


Рис. 2

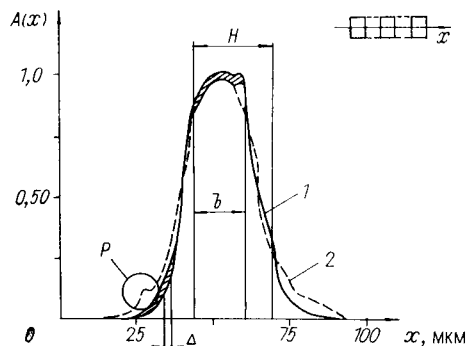


Рис. 3

том увеличения в контрольном канале значение размера пятна на исследуемой ФДЛ $\sim 2,2$ мкм. При дальнейшей работе оперативный контроль параметров пятна осуществлялся с помощью окуляра 9.

Снижение погрешности измерений проводилось посредством накопления сигнала. При этом полагалось, что на процесс измерений воздействует ряд независимых факторов, приводящих к появлению соответствующих случайных погрешностей. Такими факторами являются шум лазера, шум аналоговой части электронного тракта, вибрации элементов оптической системы и шум квантования сигнала в АЦП. Первые три фактора приводят к шуму в выходном сигнале устройства управления ФДЛ. С учетом конечной разрядности представления информации в измерительной системе среднеквадратическая ошибка усреднения при накоплении N реализаций определяется выражением [7]

$$\sigma(N) = \sqrt{\sigma_y^2/N + \sigma_k^2/N}, \quad (1)$$

где σ_y^2 — дисперсия шума сигнала на выходе устройства управления ФДЛ; σ_k^2 — дисперсия шума квантования на выходе АЦП. Из (1) видно, что с ростом числа накоплений дисперсия результирующего шума сигнала уменьшается, а затем возрастает. При количестве накоплений $N = 8$ и средней величине сигнала 280 экспериментально была получена среднеквадратическая ошибка 0,5. В дальнейшем за результат измерения принималось среднее значение по восьми замерам. Для исключения медленного дрейфа сигнала, вызванного нестабильностью мощности излучения лазера, эксперименты начинались спустя 2 ч после его вклю-

чения. Для уменьшения влияния пульсаций излучения лазера с частотой, кратной частоте f_c сети, времена экспозиций ФДЛ выбирались из условия $T_n = k/2f_c$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Уровень выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ ФДЛ устанавливался с помощью нейтральных фильтров 2.

Погрешность перемещения столика с шаговым приводом определялась в процессе экспериментов путем наложения десяти апертурных характеристик, снятых в одном сечении одного фоточувствительного элемента ФДЛ (рис. 3, зависимость 1). Из графика видно, что погрешность перемещения столика с шаговым приводом $\Delta \sim 2$ мкм, с ручным приводом $\sim 2,5$ мкм.

На втором этапе работы снимались апертурные характеристики $A(x, y) = U_{\text{вых}}(x, y)/U_{\text{вых max}}$ фотодиодных линеек ТС-26/1, ЛФ1024-25/1, ЛФ1024-25/2. На рис. 3 (график 2) приведена апертурная характеристика $A(x)$ для ФДЛ ТС-26/1, построенная как средняя по результатам пяти измерений ($T_n = 10$ мс). Из сравнения графиков 1 и 2 (элементы ФДЛ 582 и 529) видно различие характеристик разных элементов одной ФДЛ. Из графиков также следует, что ширина апертурных характеристик больше ширины элементов b и что в пределах характеристик имеют место локальные экстремумы. На рис. 4 приведены характеристики $A(y)$ для трех исполнений ФДЛ: ЛФ1024-25/2, ЛФ1024-25/1, ТС-26/1. Все характеристики получены по результатам сканирования ФДЛ зондирующим пятном в направлении оси симметрии фоточувствительных элементов.

На рис. 5 представлены апертурные характеристики $A(x)$ ФДЛ ЛФ1024-25/1 для нескольких рядом расположенных элементов. Приведенные зависимости иллюстрируют взаимное влияние элементов и разброс межэлементной чувствительности ФДЛ ($T_n = 20$ мс). Апертурные характеристики $A(x, y)$, приведенные на рис. 6, дают наглядное представление о распределении чувствительности по полю фоточувствительных элементов для ФДЛ ЛФ1024-25/1 (рис. 6, а) и ЛФ1024-25/2 (рис. 6, б) ($T_n = 20$ мс).

Обсуждение результатов. По аналогии с ПЭС-линейками [4] на формирование апертурных характеристик исследованных ФДЛ влияют два основных физических процесса, происходящих в полупроводниковой структуре при освещении ФДЛ-светом. Во-первых, это процесс дрейфа генерированных носителей в области пространственного заряда (ОПЗ), определяющий формирование апертурной характеристики в пределах фоточувствительного элемента. Во-вторых, это процесс диффузии генерированных светом носителей заряда вне ОПЗ, определяющий, в свою очередь, формирование краев характеристики.

Таким образом, $A(x, y) = A_{\text{опз}}(x, y) + A_{\text{диф}}(x, y)$. Некоторые элементы исследованных ФДЛ имеют апертурную характеристику с явно выраженными локальными изменениями характера зависимости (см. на рис. 3, рис. 6 области Р). Причиной таких изменений являются локальные неоднородности структуры ФДЛ, например различие оптических свойств защитной пленки SiO_2 . Локальные изменения формы экспериментально снятой апертурной характеристики можно оценить величиной a — отклонением от аппроксимирующей гладкой функции в процентах к максимальному значению характеристики. Для исследованных образцов ФДЛ $a \leq 10$ %. Апертурную характеристику некоторого элемента ФДЛ можно представить ее значениями в процентах к максимальному

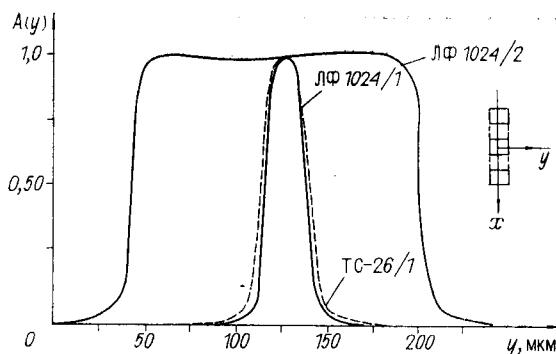
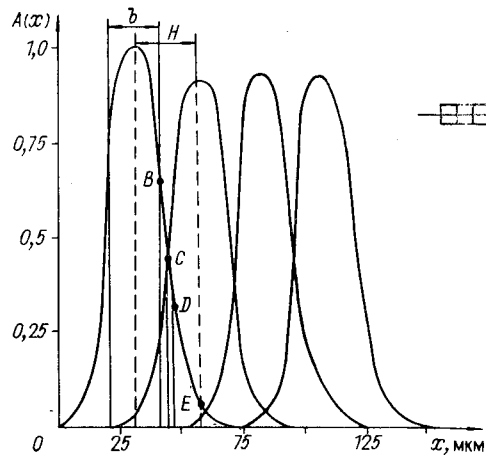
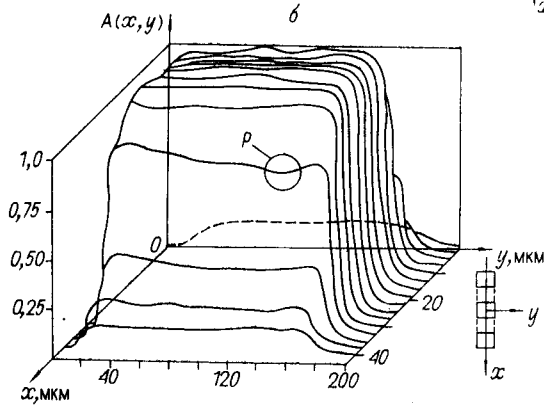
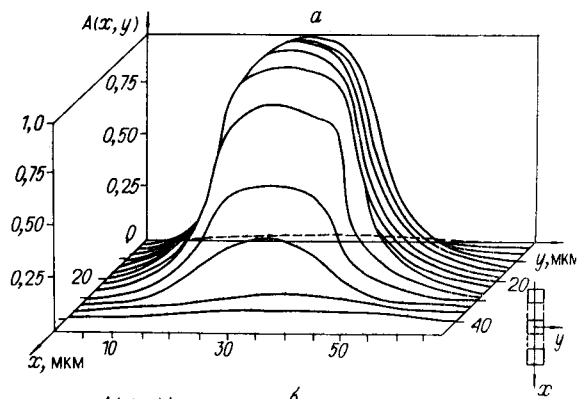


Рис. 4



Puc. 5



Puc. 6

Исполнение ФДЛ	b , мкм	l , мкм	H , мкм	A_B , %	A_C , %	A_D , %	α
ЛФ1024-25/1	19	20	25	76	49	24	0,08
ЛФ1024-25/2	19	150	25	86	55	36	0,11
ТС-26/1	16	16	25	85	53	28	0,06

на границе элемента (см. рис. 5, точка B), между элементами (точка C), на границе соседнего элемента (точка D) и в центре соседнего элемента (точка E). Последнее значение позволяет определить коэффициент взаимного влияния соседних элементов ФДЛ

$$\alpha = A_i' / A_i,$$

где A_i' — значение выходного сигнала с i -го элемента ФДЛ при проекции светового пятна в центр $i \pm 1$ -го элемента; A_i — значение выходного сигнала с i -го элемента ФДЛ при проекции светового пятна в его центр.

В таблице приведены средние значения параметров апертурных характеристик и коэффициентов взаимного влияния соседних элементов исследованных ФДЛ.

Таким образом, экспериментальным путем получены апертурные характеристики ФДЛ трех исполнений для $\lambda = 0,63$ мкм. Их анализ показал, что в пределах характеристик отдельных элементов имеют место локальные экстремумы, установлено отличие апертурных характеристик как для различных элементов в пределах одной ФДЛ, так и для элементов различных образцов ФДЛ одного исполнения. Установлено также взаимное влияние рядом расположенных элементов ФДЛ и отсутствие потери информации о световом сигнале, попадающем в промежутки между фотоприемными элементами.

Авторы выражают благодарность В. Г. Десяткову и Г. Н. Кузнецовой за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1981.
2. Коган Ю. Х., Кашеев Э. Л., Кругликов С. В. и др. Самосканируемая МДП интегральная линейка фотоприемников // Автометрия. — 1984. — № 3.
3. Woschni H. G., Christoph R., Kramer H. Erweiterung der Auflösungsgrenze von Längenmeßsystemen mit CCD-Zeile // Feingerätetechnik. — 1986. — 35, N 9. — S. 403.
4. Хромов Л. И., Лебедев Н. В., Цыцулин А. К. и др. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах. — М.: Радио и связь, 1986.
5. Десятков В. Г., Магденко С. В., Финогенов Л. В. Работа интегральной линейки фотоприемников в качестве устройства задержки аналоговых сигналов // Автометрия. — 1987. — № 5.
6. Папов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. — Л.: Машиностроение, 1967.
7. Андриянов А. В., Шпак И. И. Цифровая обработка информации в измерительных приборах и системах. — Минск: Вышэйш. шк., 1987.

Поступила в редакцию 2 июня 1988 г.