

5. Тришенков М. А., Петров А. С., Михеев Ю. С. Отношение сигнал/шум в фотоприемных матричных устройствах с внутренней связью, работающих в режиме накопления.— «Радиотехника и электроника», 1976, № 9, с. 1951.
6. Обзорение. МОП-формирователь сигналов изображения с подавлением паразитных помех.— «Электроника», 1976, № 16, с. 13.

*Поступила в редакцию 4 января 1978 г.;
окончательный вариант — 6 апреля 1978 г.*

УДК 621.383.181.48+681.327.68.778.38

Б. Г. МАТИЕНКО
(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОПРИЕМНОЙ МАТРИЦЫ

Данная работа посвящена рассмотрению статических и фотоэлектрических характеристик экспериментальных образцов полупроводниковых МОП-фотодиодных матриц, предназначенных для использования в многоэлементных гибридно-интегральных фотоэлектрических преобразователях оптических запоминающих и вычислительных устройств. Внешний вид исследуемых фотоматриц в корпусе с 48 выводами приведен на рис. 1. Фотоматрица выполнена на кристалле размером 5×5 мм², шаг между фотодиодами (ФД) 0,25 мм, размеры ФД $0,1 \times 0,1$ мм². Организация фотоматрицы словарная: 16 шестнадцатирядных слов (16×16). Из таких фотоматриц были созданы экспериментальные гибридно-интегральные фотоэлектрические преобразователи емкостью 1024 (32×32) и 16384 (128×128) бит [1].

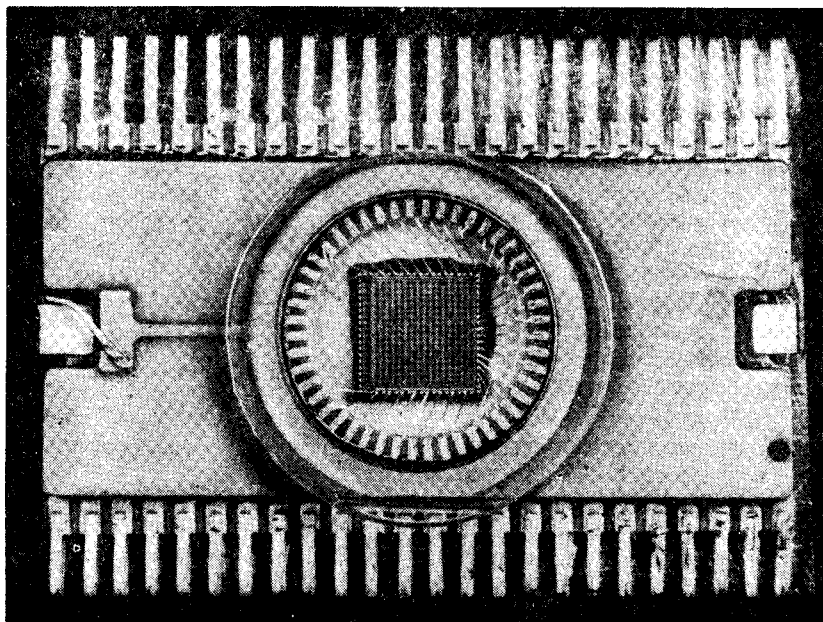


Рис. 1.

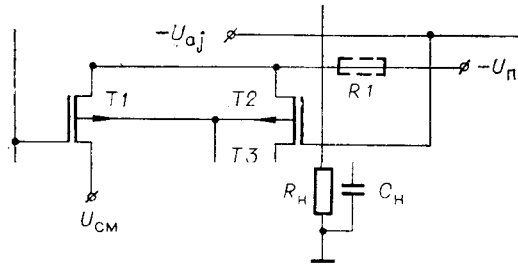


Рис. 2.

ресным ключом, управляемым напряжением выборки $-U_{aj}$ ($j=1, 2, \dots, 16$); транзистор $T3$ следящий, так как по затвору непосредственно управляется напряжением $-U_{п}$ на емкости ФД. Транзисторы $T2$ и $T3$ образуют схему чтения. Выходной сигнал $-U_{vi}$ снимается с числовой шины, подключаемой к внешней нагрузочному резистору R_{ni} ($i=1, 2, \dots, 16$). В схеме может быть использован второй источник питания — положительное напряжение смещения $U_{см}$ на подложку. Схема работает в режиме накопления заряда и основана на патенте [2]. При ее реализации была изменена схема чтения и использована отличная от упомянутого патента технология изготовления и конструкция.

2. Статические характеристики.

Они показывают взаимосвязь между выходным сигналом фотоприемного элемента (ФПЭ) и электрическим режимом его работы при постоянных значениях напряжений питания, стирания и выборки, фиксированной величине внешней нагрузки и отсутствии засветки, т. е. $-U_{vi} = f_1(-U_{п}, U_{см}, -U_{aj}, -U_{ст}, R_{н})$. Зависимость f_1 нелинейна и в отличие от фотоэлектрических характеристик требует учета величины сопротивления шин по цепям питания (R_1 на рис. 2). Статическая характеристика ФПЭ f_1 может быть сведена к более частной вида $-U_{vi} = f_2(-U_{п}, U_{см}, -U_{aj}^*, -U_{ст}^*, R_{н})$. Это положение иллюстрирует рис. 3, где характеристики $1-5$ получены соответственно для ряда напряжений питания $-5, \dots, -15$ В при $|U_{aj}| \geq |1,5 U_{п}|$, $U_{см} = 0$, но при двух разных нагрузках $R_{н} = 10^3$ и $5 \cdot 10^6$ Ом (точки). Аналогичным образом выходной сигнал ФПЭ зависит и от

1. Фотоприемный элемент.

Принципиальная схема фотоприемного элемента (ФПЭ) исследуемой матрицы приведена на рис. 2. Схема изводит заряд барьерной емкости обратносмещенного ФД и входной емкости транзистора $T3$ до уровня напряжения питания схемы $-U_{п}$. Транзистор $T2$ является ад-

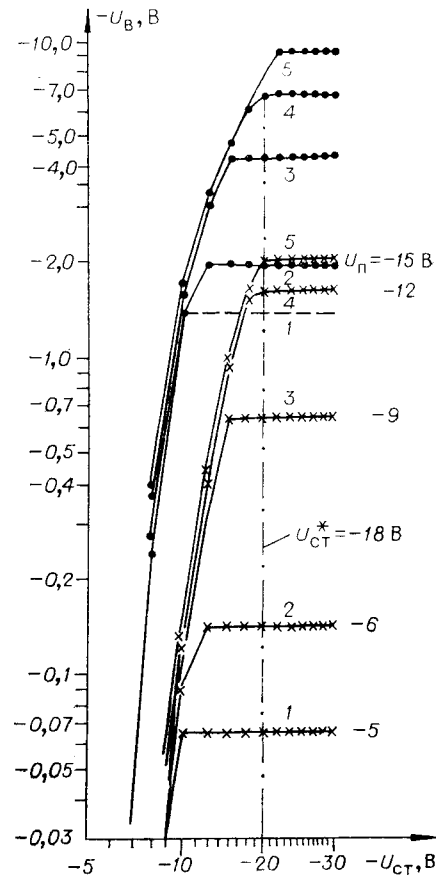


Рис. 3.

напряжения выборки при различных уровнях питания и смещения.

Эти зависимости показывают, что для любого напряжения питания из исследовавшегося ряда существуют вполне определенные уровни напряжений $-U_{ст}^*$ и $-U_{aj}^*$, при которых увеличения уровня выходного сигнала не происходит, если $|U_{ст}| \geq |U_{ст}^*|$, а $|U_{aj}| \geq |U_{aj}^*|$. Например, на рис. 3 $U_{ст}^* = U_{ст} = -18$ В, что обеспечивает независимость выходного сигнала от напряжения стирания в диапазоне значений питающих напряжений от -5 до -15 В. Отметим, что увеличение величины нагрузки схемы R_n более чем на три порядка не изменило положение точек $-U_{ст}^*$ на рис. 3, а подача напряжения смещения на подложку и увеличение R_n несущественно сдвигают точки U_{aj}^* в сторону больших по модулю значений. Таким образом, элементы фотоматрицы полностью описываются статической характеристикой f_2 при условии, что $|U_{ст}^*| \approx |U_{aj}^*| \approx |2U_{п}|$.

Вид характеристики f_2 по ряду напряжений питания и различным величинам нагрузки ($R_n = 10^3, 5 \cdot 10^3, 10^4, \dots, 5 \cdot 10^6$ Ом) при $U_{см} = 0$ показан на рис. 4, где I — данные измерений, а II — расчетные точки, полученные после обработки данных измерений по одному из алгоритмов метода наименьших квадратов (МНК) [3]. Отметим, что наилучшее приближение к данным измерений (при оценке по величине стандартной ошибки аппроксимации Δ и коэффициенту корреляции r (см. п. 4)) по сравнению с рядом других гипотез было получено при аппроксимации функции f_2 полиномом, т. е. $f_2 = \sum_{i=0}^n a_i p_i$ при $n=4$, где $p_i = \ln^i R_n$. В табл. 1 (см. строки 1, 2) приведены значения коэффициентов a_0, \dots, a_4 для двух кривых на рис. 4. Представленные и обработанные данные измерений относятся к одному образцу, и их количество ($N=31$) для каждого значения R_n было выбрано равным числу ФПЭ на диагоналях матрицы.

Статическая характеристика f_2 (см. рис. 4) позволяет оценить два важных параметра ФПЭ: статическую мощность, рассеиваемую элементом в режиме чтения (вывода) информации, и разброс уровней тем-

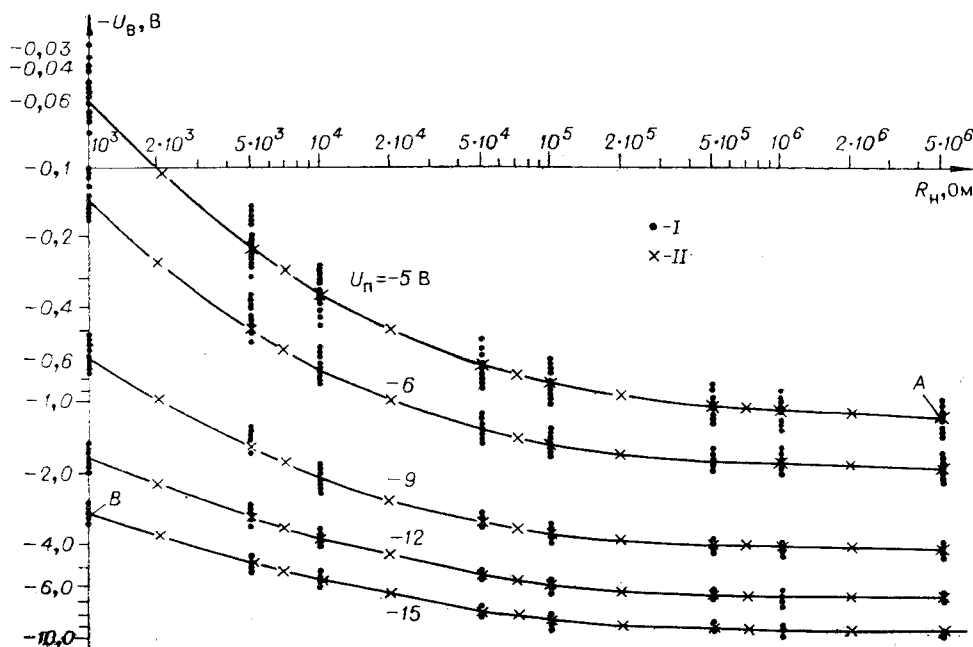


Рис. 4.

Таблица 1

| Номер п/п | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | Δ_1 | r_1 | $U_{ВГ}^{\min}$ | $U_{ВГ}^{\max}$ | $U_{п, В}$ |
|-----------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|------------------------|-----------------|------------|
| 1 | 13,415 | 1,727 | $3,13 \cdot 10^{-2}$ | $-1,15 \cdot 10^{-2}$ | $3,83 \cdot 10^{-4}$ | $2,97 \cdot 10^{-1}$ | 0,964 | $-5,498 \cdot 10^{-2}$ | -1,207 | -5 |
| 2 | 0,6594 | -0,6142 | 0,171 | $-1,25 \cdot 10^{-2}$ | $3,09 \cdot 10^{-4}$ | $3,1 \cdot 10^{-2}$ | 0,997 | -2,9545 | -9,8322 | -15 |
| 3 | $R_{н, Ом}$ Характеристика | 10^3 | $5 \cdot 10^3$ | 10^4 | $5 \cdot 10^4$ | 10^5 | $5 \cdot 10^5$ | 10^6 | $5 \cdot 10^6$ | $U_{п, В}$ |
| 4 | $\bar{X}^{(0)}, В$ | $-5,15 \cdot 10^{-2}$ | $-2,147 \cdot 10^{-1}$ | $-3,69 \cdot 10^{-1}$ | $-7,115 \cdot 10^{-1}$ | $-8,4 \cdot 10^{-1}$ | -1,048 | -1,103 | -1,2118 | -5 |
| 5 | $\phi^{(0)}, \%$ | 22,74 | 18,42 | 15,59 | 13,33 | 12,31 | 10,91 | 10,67 | 9,919 | -5 |
| 6 | $\bar{X}^{(0)}, В$ | -2,968 | -4,831 | -5,631 | -7,765 | -8,403 | -9,340 | -9,546 | -9,860 | -15 |
| 7 | $\phi^{(0)}, \%$ | 5,18 | 3,39 | 3,32 | 2,307 | 2,209 | 1,904 | 1,88 | 1,58 | -15 |
| 8 | Номер образца | Объем выборки | $\bar{X}^{(0)}, В$ | $\sigma^{(0)}$ | $\Theta^{(0)}$ | $0,79786\sigma^{(0)}$ | $\phi^{(0)}$ | α | i | $U_{п, В}$ |
| 9 | 85 | $N=90$ | -0,925 | $2,6748 \cdot 10^{-2}$ | $2,229 \cdot 10^{-2}$ | $2,133 \cdot 10^{-2}$ | 2,889 | 1,5597 | 0,16738 | -12 |
| 10 | 30 | $N=68$ | -1,258 | $9,215 \cdot 10^{-2}$ | $7,584 \cdot 10^{-2}$ | $7,353 \cdot 10^{-2}$ | 7,323 | 1,5267 | -0,2597 | -12 |
| 11 | 62 | $N=79$ | -1,134 | $1,971 \cdot 10^{-2}$ | $1,578 \cdot 10^{-2}$ | $1,578 \cdot 10^{-2}$ | 1,737 | 1,6395 | 0,2348 | -12 |
| 12 | 94 | $N=90$ | -0,835 | $2,871 \cdot 10^{-2}$ | $2,145 \cdot 10^{-2}$ | $2,290 \cdot 10^{-2}$ | 3,439 | 1,9486 | 1,7751 | -12 |

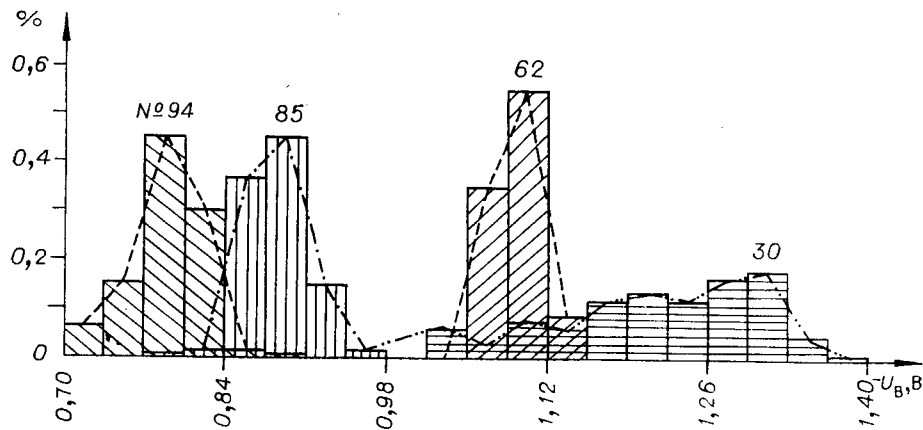


Рис. 5.

новых сигналов. Используя, например, приведенные в табл. 1 расчетные значения напряжений $-U_{вi}$ при $R_n=10^3$ Ом ($-U_{н\text{ min}}$) и $R_n=5 \times 10^6$ Ом ($-U_{н\text{ max}}$), можно установить, что статическая мощность, рассеиваемая одним фотоприемным элементом в режиме чтения, в точках А и В характеристики на рис. 4 соответственно равна $1,207 \cdot 10^{-6}$ и $4,432 \cdot 10^{-2}$ Вт.

Для оценки разброса уровней темновых сигналов удобно использовать известный статистический критерий — меру изменчивости ϑ [4]:

$$\vartheta^{(0)} = \frac{\sigma^{(0)}}{\bar{X}^{(0)}} 100\% = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{вi}^{(0)} - \bar{X}^{(0)})^2}{N}}{\left(\sum_{i=1}^N U_{вi}^{(0)} / N\right)} \right] 100\%, \quad (1)$$

где $\sigma^{(0)}$ — основное отклонение (дисперсия), $\bar{X}^{(0)}$ — среднее, а $U_{вi}^{(0)}$ ($i=1, 2, \dots, N$) — измеренные значения уровней выходных темновых сигналов. Для проведения оценок важно было выяснить, являются ли нормальными полученные при измерениях ряды распределений величины $U_{вi}$. С этой целью были проведены дополнительные измерения с несколькими образцами. Часть результатов, относящихся к 4 образцам, показана на рис. 5 в виде гистограмм и данных табл. 1 (см. строки 8—12). Данные на рисунке и в таблице получены при $U_n=-12$ В, $U_{см}=0$, $R_n=10^3$ Ом и числе измерений $N=68-90$.

Проверка этих (и других) данных измерений уровней темновых сигналов по характерному для нормального закона [4] приближенному критерию $\Theta^{(0)} \approx \sigma^{(0)} \approx \sqrt{2\pi} \approx 0,79786 \sigma^{(0)}$, где среднее отклонение $\Theta^{(0)} = \left(\sum_{i=1}^N |U_{вi}^{(0)} - \bar{X}^{(0)}| \right) / N$, показала хорошее совпадение (в пределах от долей до единиц процентов). Правда, вычисленные через моменты 3-го и 4-го порядка меры косости (α) и крутости (i) распределений [4] указали на наличие в них асимметрий, дефектов и эксцессов.

С учетом изложенного выше разброс темновых сигналов в любом сечении характеристики f_2 по аргументу R_n приближенно может быть описан нормальной кривой, симметричной относительно среднего значения \bar{X} . Величины $6\sigma^{(0)}$ и $6\Theta^{(0)}$ можно при этом условии считать соответственно мерами абсолютного и относительного разброса уровней темновых сигналов (см. строки 3—7, табл. 1). Например, при напряжении питания -15 В и нагрузке $5 \cdot 10^6$ Ом величина 6Θ равна 9,48%, а при минимальных значениях $-U_n$ и R_n она достигает 136,44%, т. е. перекрывает уровень полезного сигнала. Последняя цифра не является,

вообще говоря, типичной, но она показывает те реальные трудности, которые возникают при создании и практическом использовании многоэлементных, многокристальных гибридно-интегральных фотоэлектрических преобразователей, собранных из рассматриваемых фотоматриц.

Таким образом, исследование статических характеристик ФПЭ показало, что относительная величина разброса уровней темновых сигналов уменьшается по мере роста величины нагрузки и напряжения питания схемы. Причины разброса характеристик весьма многочисленны. Это изменения порогов и геометрии МОП-транзисторов, влияние неоднородности характеристик кремния, конструкции схемы и т. д. Влияние этих и других факторов на разброс характеристик исследуемых ФПЭ довольно подробно рассмотрено в работе [5].

3. Ограничение на электрические режимы работы. Возможность использования повышенных напряжений питания (стирания, выборки, смещения) на практике ограничена вполне определенными пределами по причинам физико-технологического характера. При увеличении рабочих напряжений схемы резко возрастает вероятность пробоя, и в первую очередь полевого пробоя, свойственного сравнительно неглубоким (2—4 мкм) $p-n$ -переходам фотоматрицы. Другими факторами, существенно ограничивающими в ряде случаев возможности увеличения питающих напряжений, являются относительно низкие пороги паразитных МОП-транзисторов. Кроме того, у кристалла фотоматрицы большая поражаемая площадь и всегда существует опасность проколов из-за дефектов при их изготовлении. Таким образом, предельные рабочие напряжения схемы определяются совместно разработчиками и технологами.

У исследованных экспериментальных фотоматриц максимальные напряжения стирания и выборки (с учетом смещения) не превышали — (24÷27) В, а напряжение питания — 15 В. Вызваны эти ограничения были реально достигнутыми при изготовлении параметрами микросхем.

Характер изменения обратных токов по адресным цепям фотоматриц в этом диапазоне напряжений показан на рис. 6. Заштрихованные области на рис. 6, а для каждого из 3 исследованных образцов показывают зону разброса величин обратных токов $I_{ут\ a_j} = f_3(-U_{a_j})$ по 16 адресам. На рис. 6, б характер изменения тока $I_{ут\ a_j}$ для 4 адресных шин у одного из исследованных кристаллов показан на микроамперной шкале. Аналогичный характер и порядок величин имеют обратные то-

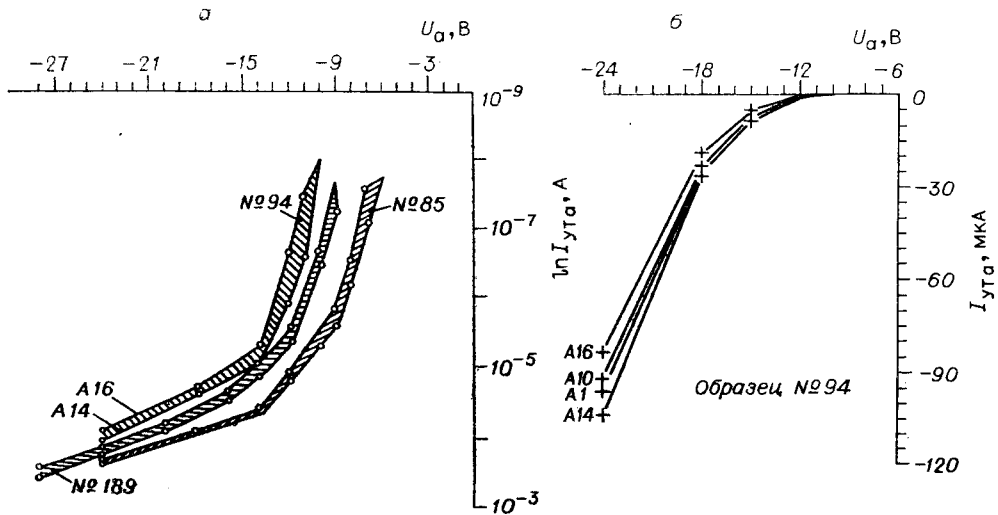


Рис. 6.

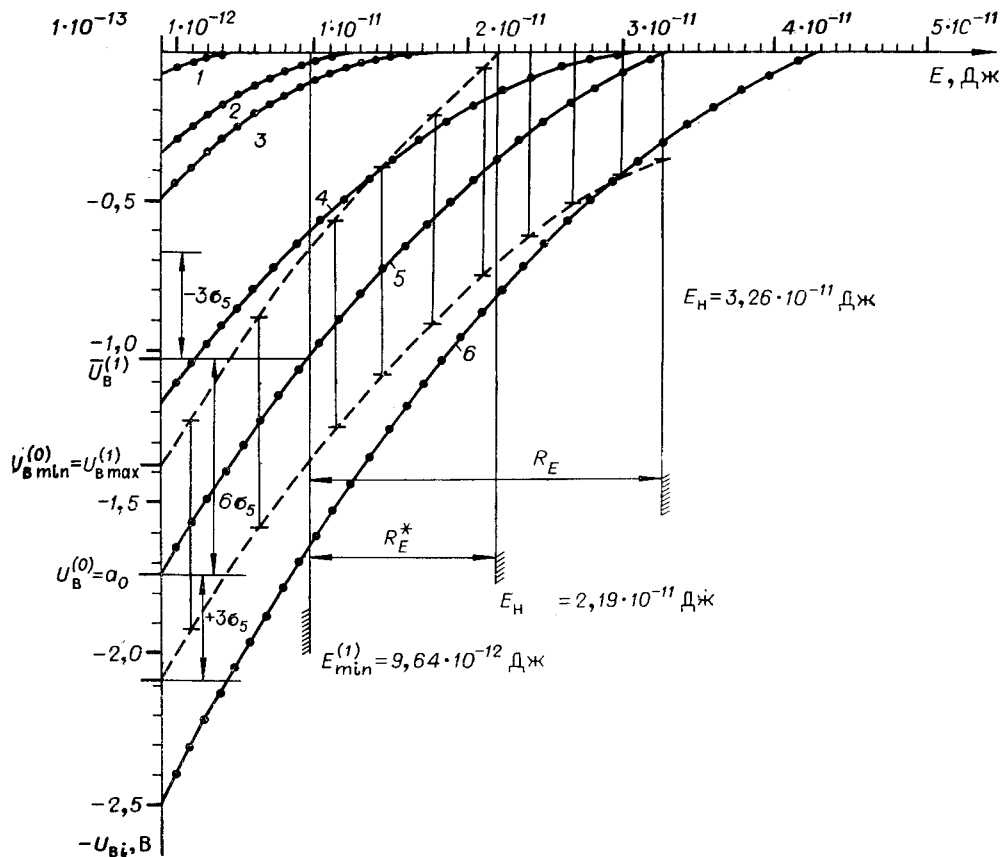


Рис. 7.

ки по цепям стирания $I_{\text{ут ст}} = f_4(-U_{\text{ст}})$ и числовым (выходным) шинам $I_{\text{ут ви}} = f_5(-U_{\text{ви}})$. Характеристики f_3 и f_4 позволяют правильно выбрать режимы работы формирователей импульсных сигналов электронных схем обрамления фотоматриц.

4. Фотоэлектрические характеристики. Фоточувствительность матрицы на длине волны света λ обычно характеризуется двумя параметрами: крутизной фотоэлектрической характеристики в вольтах/джоуль (ампер/джоуль) и порогом чувствительности в ваттах/см².

Вид фотоэлектрической характеристики $-U_{\text{ви}} = f_6(E, -U_{\pi}, R_{\text{H}}, -U_{\text{aj}}^*, -U_{\text{ст}}^*, U_{\text{см}})$, типичной для исследуемой матрицы, представлен на рис. 7, где E — энергия засветки фотоприемников в джоулях, $|U_{\text{ст}}^*| = |U_{\text{aj}}^*| \geq \geq |2U_{\pi}|$, смещение на подложку $U_{\text{см}} = 0$, а $R_{\text{H}} = 10^3$ Ом. За темновой уровень на характеристике принята энергия в $1 \cdot 10^{-13}$ Дж. Отметим, что темновые сигналы фотоматрицы в режиме динамического считывания имеют большую амплитуду, чем статические, вследствие заряда фотодиода до уровня напряжения питания. Минимальный уровень энергии световых сигналов при измерениях характеристики на рис. 7 составлял $5 \cdot 10^{-13}$ Дж.

Характер изменения крутизны фотоэлектрической характеристики df_6/dE показан в логарифмическом масштабе на рис. 8. На рис. 7 и 8 кривые 1 получены при $U_{\pi} = -3$ В, 2 — при $U_{\pi} = -5$ В, 3 — при $U_{\pi} = -6$ В, 4 — при $U_{\pi} = -9$ В, 5 — при $U_{\pi} = -12$ В, 6 — при $U_{\pi} = -15$ В. При выборе для f_6 вида аппроксимирующей функции наилуч-

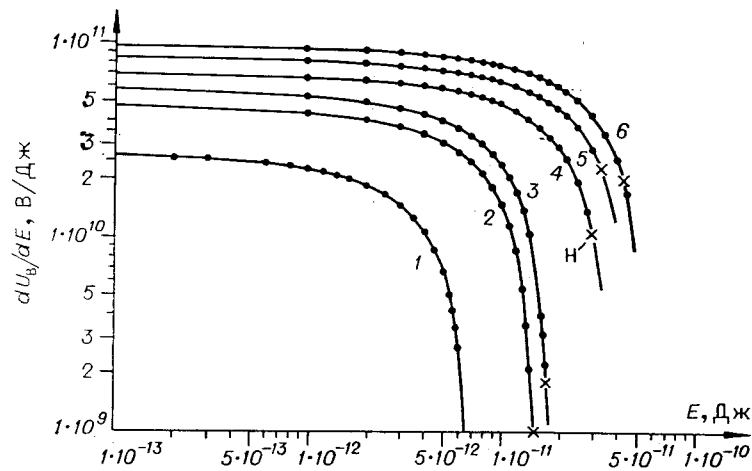


Рис. 8.

шее приближение к данным измерений по величине стандартной ошибки аппроксимации и коэффициенту корреляции* по сравнению с линейной, степенной, экспоненциальной и некоторыми другими функциями было получено при использовании полиномиальных зависимостей вида

$$f_7(a_0, a_1, \dots, a_n, E) = a_0 + a_1 E + \dots + a_n E^n, \quad (2)$$

где a_0, a_1, \dots, a_n — коэффициенты, определяемые по МНК.

В табл. 2 вошли данные 575 измерений, выполненных при исследовании характеристик ФПЭ нескольких фотоматриц, взятых из различных технологических партий. Как следует из сопоставления коэффициентов корреляции и величин стандартных ошибок аппроксимации (см. r_1, r_2, r_3 и $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$), исследуемые фотоэлектрические характеристики наилучшим образом аппроксимируются полиномами степени $n=2$. При расчетах графиков 1—6 рис. 7 и 8 были использованы приведенные в табл. 2 полиномиальные коэффициенты a_{0k}, a_{1k}, a_{2k} ($k=1, 2, \dots, 6$).

Используя полученное выше аналитическое описание фотоэлектрических характеристик, можно вычислить для каждого используемого напряжения питания величину энергии насыщения $E_{нк}$ фотоприемных элементов, при которой происходит разряд фотодиода до уровня порогового напряжения следящего транзистора (T_3 на рис. 2). При $U_n = -9, -12$ и -15 В алгебраические уравнения $f_7(a_{0k}, a_{1k}, a_{2k}, E_{нк}) = 0$ имеют вещественные корни, что позволяет найти три соответствующих значения $E_{нк}$ непосредственно (см. табл. 2). Для остальных трех напряжений питания уравнения f_7 не имеют вещественных корней и значения $E_{нк}$ были найдены приближенно из уравнений $df_7/dE = 0$ (эти значения $E_{нк}$ отмечены в табл. знаком «*»).

Данные, приведенные на рис. 8, показывают, что при напряжениях питания фотоматрицы от -5 до -15 В в диапазоне от нижнего предела измерения, равного $5 \cdot 10^{-13}$ Дж, до энергий порядка $(3-5) \times 10^{-12}$ Дж крутизна максимальна, близка к постоянной и равна $(4,6 \div 9,6) \cdot 10^{10}$ В/Дж. На кривых 2—5 рис. 8 отмечены ограничения в виде

* Для полиномиальных функций $y = a_0 + a_1 x + \dots + a_n x^n$ коэффициент корреляции $r_n = (1 - \Delta_n^2 / S_y^2)$ и изменяется в пределах $0 \leq r_n \leq 1$. Стандартная ошибка аппроксимации $\Delta_n = [(\sum y^2 - a_0 \sum y - a_1 \sum xy - \dots - a_n \sum x^n y) / (N - n - 1)]^{1/2}$, а стандартное отклонение $S_y = \{[\sum y^2 - (\sum y)^2 / N] / (N - 1)\}^{1/2}$, где все суммы берутся от $i=1$ до N [6].

Таблица 2

| $U_{п'}$ | -3 | -5 | -6 | -9 | -12 | -15 |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| $N_{изм}$ | 70 | 95 | 94 | 103 | 106 | 106 |
| a_0 | $-8,81285 \cdot 10^{-2}$ | $-3,45259 \cdot 10^{-1}$ | $-5,02029 \cdot 10^{-1}$ | $-1,173623$ | $-1,741529$ | $-2,492699$ |
| a_1 | $2,62683 \cdot 10^{10}$ | $4,67003 \cdot 10^{10}$ | $5,65499 \cdot 10^{10}$ | $6,84702 \cdot 10^{10}$ | $8,27845 \cdot 10^{10}$ | $9,61447 \cdot 10^{10}$ |
| a_2 | $-1,96376 \cdot 10^{21}$ | $-1,59172 \cdot 10^{21}$ | $-1,64722 \cdot 10^{21}$ | $-9,75119 \cdot 10^{20}$ | $-9,02190 \cdot 10^{20}$ | $-8,8575 \cdot 10^{20}$ |
| Δ_{E2} | $1,00633 \cdot 10^{-2}$ | $5,98394 \cdot 10^{-2}$ | $8,08096 \cdot 10^{-2}$ | $1,54460 \cdot 10^{-1}$ | $1,20770 \cdot 10^{-1}$ | $1,96393 \cdot 10^{-1}$ |
| r_{E2} | $0,945728$ | $0,894521$ | $0,903781$ | $0,929166$ | $0,978926$ | $0,972142$ |
| E_{HK} | $(6,6883 \cdot 10^{12})^*$ | $(1,4669 \cdot 10^{-11})^*$ | $(1,7165 \cdot 10^{-11})^*$ | $2,9719 \cdot 10^{-11}$ | $3,2665 \cdot 10^{-11}$ | $4,2813 \cdot 10^{-11}$ |
| 6σ | $8,4894 \cdot 10^{-2}$ | $3,5332 \cdot 10^{-1}$ | $4,7706 \cdot 10^{-1}$ | $9,1316 \cdot 10^{-1}$ | $7,1429 \cdot 10^{-1}$ | $1,16174$ |
| \emptyset | $16,05$ | $17,05$ | $15,83$ | $12,96$ | $6,835$ | $7,767$ |
| γ | $1,0382$ | $0,977$ | $1,0523$ | $1,2852$ | $2,4381$ | $2,1456$ |
| Θ | $9,0802 \cdot 10^{-3}$ | $4,8965 \cdot 10^{-2}$ | $6,3656 \cdot 10^{-2}$ | $1,2496 \cdot 10^{-1}$ | $9,5697 \cdot 10^{-2}$ | $1,5895 \cdot 10^{-1}$ |
| $0,79\sigma$ | $1,1289 \cdot 10^{-2}$ | $4,6983 \cdot 10^{-2}$ | $6,3448 \cdot 10^{-2}$ | $1,2142 \cdot 10^{-1}$ | $9,4984 \cdot 10^{-2}$ | $1,5448 \cdot 10^{-1}$ |
| Δ_{E1} | $1,33436 \cdot 10^{-2}$ | $7,03563 \cdot 10^{-2}$ | $9,53116 \cdot 10^{-2}$ | $1,68895 \cdot 10^{-1}$ | $1,49711 \cdot 10^{-1}$ | $2,43929 \cdot 10^{-1}$ |
| r_{E1} | $0,900872$ | $0,84871$ | $0,861611$ | $0,913772$ | $0,967105$ | $0,956259$ |
| Δ_{E3} | $1,01392 \cdot 10^{-2}$ | $6,01673 \cdot 10^{-2}$ | $8,12574 \cdot 10^{-2}$ | $1,55238 \cdot 10^{-5}$ | $1,21361 \cdot 10^{-1}$ | $1,97345 \cdot 10^{-1}$ |
| r_{E3} | $0,945728$ | $0,894521$ | $0,903781$ | $0,928166$ | $0,978926$ | $0,972142$ |

2 || 2

2 || 2

2 || 2

пересечений с соответствующими значениями $E_{нк}$ (точки Н). Отмеченный выше характер изменения крутизны свидетельствует о возможности и целесообразности применения фотоматрицы при малых (меньших $5 \cdot 10^{-12}$ Дж) энергиях, когда можно использовать линейный участок ее фотоэлектрической характеристики.

С целью оценки величин разброса уравней «световых» сигналов для каждой из k рассмотренных на рис. 7 фотоэлектрических характеристик, где $k=1, 2, \dots, 6$, были рассчитаны дисперсия $\sigma_k^{(1)} = \left[\sum_{i=1}^N (\bar{U}_{vi} - U_{vi})/N \right]^{1/2}$ и среднее отклонение $\Theta_k^{(1)} = \left(\sum_{i=1}^N |\bar{U}_{vi} - U_{vi}| \right) / N$, где U_{vi} — измеренные, а \bar{U}_{vi} — рассчитанные с помощью полиномов наилучшего приближения (2) значения выходных сигналов при соответствующих напряжениях питания и энергиях засветки E . Данные измерений выходных сигналов удовлетворяют приближенному критерию $\Theta_k^{(1)} \approx 0,79786\sigma_k^{(1)}$ [4] (см. табл. 2). Это позволяет приближенно считать, что разброс выходных сигналов в любом сечении по аргументу E характеристик f_7 на рис. 9 подчинен нормальному закону распределения, и оценивать максимальные его значения величинами $6\sigma_k^{(1)}$. В табл. 2 также приведены значения меры изменчивости $\Theta_k^{(1)}$, вычисленные по аналогии с (1) из отношения $\sigma_k^{(1)}/a_{0k}$, где a_{0k} — коэффициент соответствующего полинома (2) степени $n=2$. Меры изменчивости, рассчитанные с использованием фотоэлектрических характеристик, оказываются близкими к аналогичным показателям, полученным из статических характеристик (см. табл. 1).

Для практических целей необходимо рассматривать реальное соотношение между разбросом и амплитудой полезного сигнала. С этой точки зрения важным показателем является отношение $\gamma_k = |\bar{U}_{vi}/6\sigma_k^{(1)}|$, принимающее максимальное значение при $E=0$ и значение, равное нулю при $E=E_{нк}$. Данные по γ_k , приведенные в табл. 2, показывают, что разброс существенно снижает функциональные возможности фотоматрицы. Наибольшее значение $\gamma_5=2,43$ у исследуемой фотоматрицы достигается при $E=0$, напряжении питания — 12 В и амплитуде темнового сигнала, равной —1,74 В. Интересно отметить [5], что для фотоприемной линейки типа IPL-20, содержащей 50 ФПЭ, выполненных по схеме патента [2], аналогичный показатель равен 20 при напряжении питания —22 В и выходном сигнале —12 В.

5. Характеристики фотоматрицы в режиме хранения информации. Весьма важной для практических приложений характеристикой рассматриваемого фотоэлектрического преобразователя является время хранения страницы оптической информации, записанной в динамической памяти фотоматрицы. При использовании такой памяти неизбежно искажение сигналов, хранимых на емкостях фотодиодов, за счет токов утечки и фоновой их засветки [7, 8].

В исследуемой фотоприемной матрице характер изменения напряжений на емкостях фотодиодов может быть прослежен по выходному сигналу ФПЭ на нагрузке. Измерения позволяют установить времена перехода напряжений от одного зафиксированного уровня до другого. Такая информация показана на рис. 9, где каждая точка — уровень выходного сигнала при отсутствии засветки в режиме хранения данных — $U_{vi xp}$ в тот или иной момент времени. Показанные на этом рисунке экспериментальные точки относятся к трем различным напряжениям питания: серия точек *I* снята при $U_n=-5$ В, *II* — при $U_n=-8$ В, *III* — при $U_n=-15$ В. Наименьшим регистрируемым уровнем сигнала — $U_{vi xp}$ было напряжение в 10 (5) мВ.

В табл. 3 вошли данные 1048 измерений, выполненных при исследовании времен хранения у ФПЭ нескольких фотоматриц, взятых из

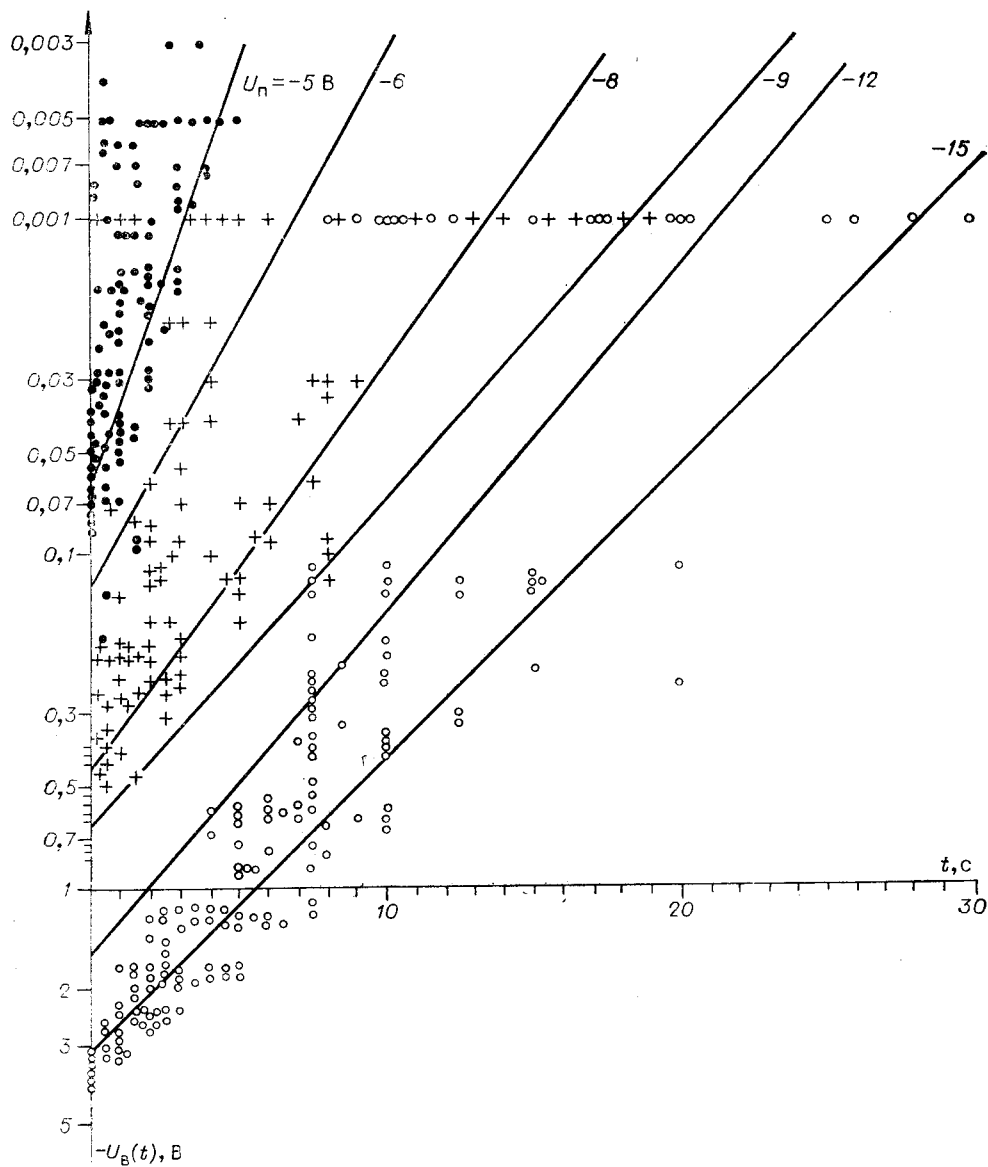


Рис. 9.

различных технологических партий. Характеристики в режиме хранения исследовались при 6 различных напряжениях питания. Искомые аналитические зависимости между уровнем выходного сигнала в режиме хранения информации и напряжениями питания, временем хранения — $U_{\text{в.кп}} = f_8(-U_n, t)$ можно найти путем обработки данных измерений по методу наименьших квадратов (МНК) [3]. Искомую зависимость удобно вначале описать степенной функцией вида ab^t , а затем перейти от нее к характерной для эксперимента экспоненциальной зависимости, т. е.

$$-U_{\text{в.кп}} = -a_k b_k^{(t)} = -a_k e^{-\alpha_{\text{кп}k} t} = -a_k e^{-\frac{t}{\tau_{\text{кп}k}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{кп}k} = \tau_{\text{кп}k}^{-1} = \ln b$. Полученные расчетным путем коэффициенты a_k , b_k , $\tau_{\text{кп}k}$ приведены в табл. 3 ($k=1, 2, \dots, 6$). Графики рис. 9 построены по данным табл. 3.

Таблица 3

| Номер п/п | $U_{пк'}$, В | $U_{aj'}$, В | $U_{ст}$, В | Число измерений | a_k , В | b_k , В | $\tau_{хрк}$, с | $\alpha_{хрк}$, с ⁻¹ |
|-----------|---------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------------|----------------------------------|
| 1 | -5 | -12 | -12 | 138 | $-6,36 \cdot 10^{-2}$ | 0,5597 | 1,7231 | 0,5803 |
| 2 | -6 | -12 | -12 | 180 | $-1,28 \cdot 10^{-1}$ | 0,6982 | 2,7853 | 0,3592 |
| 3 | -8 | -15 | -15 | 143 | $-4,36 \cdot 10^{-1}$ | 0,7545 | 3,5498 | 0,2817 |
| 4 | -9 | -15 | -15 | 193 | $-6,67 \cdot 10^{-1}$ | 0,7954 | 4,3685 | 0,2289 |
| 5 | -12 | -18 | -18 | 198 | -1,644 | 0,7853 | 4,1375 | 0,2416 |
| 6 | -15 | -18 | -18 | 196 | -3,089 | 0,8167 | 4,9386 | 0,2024 |

По мере увеличения напряжения питания схемы возрастают постоянная времени саморазряда $\tau_{хрк}$ и начальный уровень темновых сигналов — a_k . Данные табл. 3 позволяют расчетным путем оценить изменения темновых сигналов для любого напряжения питания и времени хранения в пределах исследованных диапазонов. Интересно отметить, что из общего числа 1048 измерений разряд до уровня 10 мВ у 67,1% сигналов занял до 10 с, у 29,16% — 20 с, а у 3,64% — до 30 с.

6. **Динамический диапазон по энергии.** Необходимые для определения динамического диапазона параметры рассмотрим на примере фотоэлектрической характеристики 5 (см. рис. 7), полученной при напряжении питания —12 В.

Эта характеристика показана на рисунке с зоной разброса $\pm 3\sigma_5 = \pm 0,3571$ В, позволяющей установить наименьшие уровни световой энергии $E_{\min}^{(1)}$, при которых вырабатываются соответствующие минимальные выходные электрические сигналы от засветки фотодиодов. Показанное на рис. 7 значение выходного сигнала $U_{в}^{(1)}$ соответствует среднему значению $E_{\min}^{(1)}$ и смещено относительно среднего уровня темнового сигнала на величину $6\sigma_5$. С учетом разброса фотоэлектрической характеристики необходимо рассматривать наименьшее значение $E_{\min}^{(1)*}$ (порог), при которой $|U_{в\max}^{(1)}| = |U_{в\min}^{(0)}|$, и наибольшее значение $E_{\min}^{(1)**}$, соответствующее уровню $U_{в\min}^{(1)}$. Очевидно, что искомые значения энергии $E_{\min}^{(1)*}$, $E_{\min}^{(1)}$, $E_{\min}^{(1)**}$ могут быть найдены как точки пересечения соответствующих уровней выходных сигналов с рассматриваемой фотоэлектрической кривой. Они сдвинуты относительно среднего уровня темновых сигналов $U_{в}^{(0)} = -a_0$ соответственно на величины $3\sigma_5$, $6\sigma_5$, $9\sigma_5$. Аналогичные рассуждения могут быть проведены для остальных фотоэлектрических характеристик.

В табл. 4 приведены значения $E_{k\min}^{(1)*}$, $E_{k\min}^{(1)}$, $E_{k\min}^{(1)**}$, найденные из уравнений вида $f_7(a_0^*, a_{1k}, a_{2k}, E_{\min}^{(1)}) = 0$. Величины минимальной энергии насыщения $E_{нк\min}$ были получены из уравнений $f_7(a_0 + 3\sigma_k, a_{1k}, a_{2k}, E_{нк\min}) = 0$.

Динамический диапазон находится по этим данным, причем возможно три случая: «номинальный» диапазон $R_k = E_{нк}/E_{k\min}^{(1)}$ (где $E_{нк}$ — энергия насыщения), максимальный $R_{k\max} = E_{нк}/E_{k\min}^{(1)*}$ и минимальный $R_{k\min} = E_{нк\min}/E_{k\min}^{(1)**}$, отвечающий наиболее неблагоприятным сочетаниям уровней световой энергии. Эти данные для 4 напряжений питания приведены в табл. 4 (исключения касаются 2 случаев, когда соответствующие уравнения не имели вещественных корней).

Таким образом, расчеты, выполненные с учетом разброса фотоэлектрических характеристик, показали, что фотоматрица имеет наибольший динамический диапазон (до 7,19 раз) при напряжении питания

—12 В, которое и необходимо использовать при решении практических задач.

7. **Заключение.** В работе рассмотрены статические и фотоэлектрические характеристики экспериментальных МОП-фотодиодных матриц, содержащих 256 фотоприемных элементов (ФПЭ) на кристалле.

Для получения аналитической взаимосвязи между исследуемыми параметрами фотоматрицы была использована обработка данных измерений по методу наименьших квадратов. Найдены аналитические аппроксимации для статических и фотоэлектрических характеристик, включая режим хранения информации. Показано, что разброс выходных электрических сигналов подчинены нормальным законам распределения.

С помощью статических характеристик исследованы абсолютные и относительные величины разброса уровней темновых сигналов фотоматрицы. Установлено, что относительная величина разброса существенно уменьшается по мере увеличения напряжения питания и нагрузки. Рассмотрены ограничения схемы по рабочим напряжениям и показано, что величины обратных токов по цепям стирания, выборки и числовым шинам имеют примерно одинаковый характер.

Исследование фотоэлектрических свойств матрицы позволило установить, что ее чувствительность максимальна в области линейного участка характеристики и в зависимости от напряжения питания равна от $2,6 \cdot 10^{10}$ до $9,6 \cdot 10^{10}$ В/Дж, а динамический диапазон по энергии с учетом разброса фотоэлектрических характеристик меняется от 1,1 до 7,2 раза. Наибольший динамический диапазон и наилучшее соотношение между выходными темновыми сигналами и величиной разброса достигается при напряжении питания —12 В, а наивысшая фоточувствительность — при —15 В.

Автор пользуется возможностью поблагодарить канд. техн. наук Б. Н. Панкова и канд. техн. наук Е. А. Фигуровского за обсуждение данной работы.

Таблица 4

| Номер п/п | Значения коэффициента a_{0k} , В | Уровни энергии, Дж | Напряжения питания, В | | | |
|-----------|------------------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | | —6 | —9 | —12 | —15 |
| 1 | $-a_{0k}$ | E_{nk} | $1,7165 \cdot 10^{-11}*$ | $2,9721 \cdot 10^{-11}$ | $3,2665 \cdot 10^{-11}$ | $4,2813 \cdot 10^{-11}$ |
| 2 | $-a_{0k} + 3\sigma_k$ | $E_{nk \min}$ | $5,5601 \cdot 10^{-12}$ | $1,2809 \cdot 10^{-11}$ | $2,1995 \cdot 10^{-11}$ | $2,6217 \cdot 10^{-11}$ |
| 3 | $-3\sigma_k$ | $E_k^{(1)* \min}$ | $4,9243 \cdot 10^{-12}$ | $7,4619 \cdot 10^{-12}$ | $4,5387 \cdot 10^{-12}$ | $6,4215 \cdot 10^{-12}$ |
| 4 | $-6\sigma_k$ | $E_k^{(1) \min}$ | $1,4938 \cdot 10^{-11}$ | $1,7901 \cdot 10^{-11}$ | $9,6414 \cdot 10^{-12}$ | $1,3850 \cdot 10^{-11}$ |
| 5 | $-9\sigma_k$ | $E_{k \min}^{(1)*}$ | — | — | $1,5592 \cdot 10^{-11}$ | $2,2991 \cdot 10^{-11}$ |
| 6 | Динамический диапазон | $R_{k \max}$ | $3,4857*$ | $3,9829$ | $7,1969$ | $6,6671$ |
| 7 | | R_k | $1,1491*$ | $1,6602$ | $3,3879$ | $3,0912$ |
| 8 | | $R_{k \min}$ | — | — | $1,4106$ | $1,1403$ |

ЛИТЕРАТУРА

1. Белан В. В., Гутов В. И., Дейс Г. А., Коган Г. Л., Кашлатый Р. Е., Фигуровский Е. А., Матиенко Б. Г., Хлебникова Г. И., Штырова А. И. Разработка и исследование многоэлементных полупроводниковых и гибридно-интегральных фотоматриц для голограммных запоминающих устройств.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977, с. 64.
2. Styan P. O., Noble P. J. W. Improvements in or relating to integrated circuit devices. Pat. Spec. N 1268905 Cl H1R. Great Britain, 1972.
3. Мелентьев П. В. Приближенные вычисления. М., ФМ, 1962.
4. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., ФМ, 1971.
5. Fry P. W., Noble P. J. W., Rycroft R. S. Fixed — pattern noise in photomatrices.— "IEEE J. of Solid-State Circuits", 1970, vol. SC-5, N 5, p. 250—254.
6. Johnson N. L., Leone F. C. Statistics and experimental design in engineering and physical sciences. Vol. 1. J. Wiley and Sons. N.-Y., 1964.
7. Vann M. A. Self-scanned photo-diode arrays — characteristics and applications.— "Opt. and Laser Technology", 1974, vol. 6, N 5, p. 209—218.
8. Кашлатый Р. Е., Логвинский Л. М., Пальчиков Е. П., Рябченко В. В., Цукерман В. Г. Кремниевые фотодiodы для интегральных фотоприемных матриц.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 53—61.

Поступила в редакцию 11 декабря 1978 г.

УДК 621.383.181.48 : 681.327.68.778.38

**В. В. БЕЛАН, В. И. ГУТОВ, Р. Е. КАШЛАТЫЙ,
Б. Г. МАТИЕНКО, В. П. РОМАНОВ, Е. А. ФИГУРОВСКИЙ,
Г. И. ХЛЕБНИКОВА, А. С. ШТЫРОВА**
(Новосибирск)

ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОПРИЕМНАЯ МАТРИЦА С ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТЬЮ 128×128 бит

В настоящее время активно ведутся исследования, направленные на создание элементной базы оптической цифровой вычислительной техники. В данном сообщении обсуждаются результаты и некоторые технические проблемы, связанные с созданием гибридно-интегральных фотоматриц (ГИФ) большой информационной емкости.

Важнейшими требованиями к фотоэлектрическим преобразователям оптической цифровой вычислительной техники являются многоканальность, необходимость высокоточного разнесения каналов с заданным шагом в плоскости приема (обработки) страниц данных, высокая фоточувствительность, надежность, помехоустойчивость по оптическим и электрическим каналам, быстроедействие. В зависимости от выбранных параметров элементов оптического тракта шаг между фотоприемниками каналов может колебаться от 0,2 до 2,5 мм. На современном этапе развития полупроводниковой технологии невозможно изготовить кристаллы размерами свыше 10×10 мм², что приводит к необходимости рассмотрения гибридно-интегральных вариантов конструкций фотоматриц. Отметим, что увеличение шага между фотоприемниками облегчает требования к изготовлению элементов оптического тракта, но усложняет изготовление фотоматриц из полупроводниковых кристаллов ввиду роста числа наружных межсоединений.

Конструкция гибридно-интегральной фотоматрицы может быть многокорпусной (каждый кристалл в отдельном корпусе) и однокорпусной