

6. И. С. Гибин и др. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации.— «Автометрия», 1975, № 3.  
7. С. В. Богданов и др. Двухосевый голограммный регистратор.

УДК 621.382.8 : 681.327

Г. Л. КОГАН, Е. Ф. ПЕН

(Новосибирск)

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОМАТРИЦ ДЛЯ ГОЛОГРАММНЫХ ЗУ

В [1—6] показано, что параметры основных элементов голограммных ЗУ (транспарант данных, матрица голограмм, фотоматрица, объективы и другие) взаимосвязаны и не могут быть выбраны произвольно.

Чаще всего оптимизация параметров оптических систем голограммных ЗУ (ГЗУ) производится с целью обеспечения максимальной плотности записи информации. При этом принимаются во внимание геометрические, абберационные и дифракционные ограничения, шумы и нелинейные свойства регистрирующей среды и другие ограничения технического характера.

Недостатки известных работ состоят в том, что в процессе оптимизации параметров ГЗУ не учитываются особенности и режимы работы фотоматриц, являющихся важными элементами ГЗУ. Исключение составляет работа [5], в которой выбор параметров ГЗУ производится в предположении, что фотоматрица преобразует воспринимаемый световой поток в электрический сигнал линейным образом (например, фотоматрица с токовым отсчетом) [7]. Однако в общем случае это преобразование является нелинейным, что справедливо, в частности, для применяемых в ГЗУ интегральных (интегрально-гибридных) фотоматриц, работающих в режиме накопления заряда [8].

Целью данной работы является определение оптимальных геометрических параметров интегральных фотоматриц (размера фотодиодов, расстояния между ними), а также параметров оптических элементов ГЗУ с учетом нелинейного характера преобразования воспринимаемого светового потока в электрический сигнал.

I. Найдем зависимость светового потока, воспринимаемого фотоприемником, от его собственных размеров и параметров оптической системы ГЗУ.

Пусть при записи и восстановлении голограммы используется опорный пучок света с гауссовым распределением интенсивности

$$I_R(u, v) = \exp \left[ -\frac{8}{D_R^2} (u^2 + v^2) \right],$$

где  $u, v$  — координаты в плоскости голограммы,  $D_R$  — диаметр опор-

ного пучка на уровне  $1/e^2$  интенсивности. Интенсивность сигнального пучка в той же плоскости, согласно [1], может быть аппроксимирована функцией вида

$$I_S(u, v) = \exp \left[ -\frac{k^2 b^2}{4\pi f^2} (u^2 + v^2) \right],$$

где  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны света;  $b$  — линейный размер разрядной ячейки на транспаранте данных;  $f$  — фокусное расстояние объективов, применяемых для преобразования Фурье и переноса изображения из плоскости транспаранта в плоскость фотоматрицы. Если принять  $b = \frac{\sqrt{32\pi}f}{kD_R}$ , то распределение интенсивности в восстановленном изображении разрядной ячейки в плоскости фотоматрицы описывается выражением

$$I'_S(x, y) \sim \exp \left[ -\frac{k^2 (x^2 + y^2)}{24f^2} D_R^2 \right],$$

а коэффициент полезного использования светового потока, воспринимаемого фотоприемника, вычисляется по формуле

$$S = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} \int_{-d/2}^{d/2} I'_S(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I'_S(x, y) dx dy} = \frac{4}{\pi} \operatorname{erf}^2(D/2), \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты в плоскости фотоматрицы, а  $d$  и  $D = \frac{kdD_R}{2f\sqrt{6}}$  — соответственно линейный и относительный размеры фотоприемника.

Отметим, что для фотоматриц с линейным преобразованием светового потока в электрический сигнал значение выходного сигнала возрастает при увеличении размера фотоприемника в соответствии с зависимостью  $S(D)$ , показанной на рис. 1 (кривая 1). В этом случае размер фотоприемника выбирается по критерию оптимальности, равному произведению плотности записи информации на мощность принимаемого сигнала [3].

Ниже показано, что при нелинейном преобразовании светового потока в электрический сигнал оптимальный размер фотоприемника определяется только из условия максимума сигнала.

Пусть элементом интегральной фотоматрицы является фотодиод, соединенный с затвором полевого транзистора (рис. 2, а). Работа этого элемента в режиме накопления заряда протекает следующим образом.

Вначале через МОП-транзисторный ключ К производится заряд барьерной емкости фотодиода и емкости затвора транзистора до на-

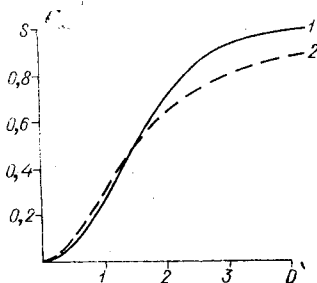


Рис. 1.

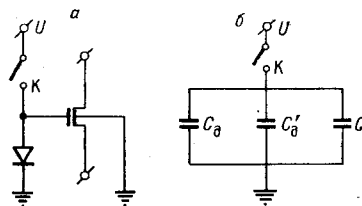


Рис. 2.

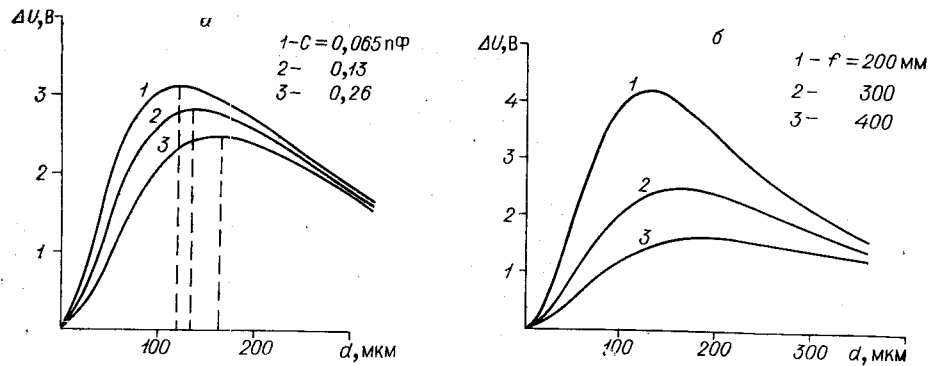


Рис. 3.

пряжения  $U$  (предустановка). Если затем ключ  $K$  разомкнуть и произвести засветку фотодиода, то заряд на емкости фоточувствительного элемента уменьшится на величину

$$\Delta Q = \eta W \tau S, \quad (2)$$

где  $\eta$  — чувствительность фотодиода в  $A/Vt$ ;  $W$  — мощность света, приходящаяся на одну разрядную ячейку восстановленного изображения в ваттах;  $\tau$  — время засветки в секундах;  $S$  — коэффициент полезного использования светового потока, воспринимаемого фотодиодом.

Предположим, что  $p$  —  $n$ -переход фотодиода резкий, а емкость затвора транзистора линейная, тогда эквивалентная схема фотоэлемента примет вид, изображенный на рис. 2, б, где  $C$  — емкость затвора транзистора,  $C_d$  и  $C'_d$  — емкости светочувствительной и паразитной частей фотодиода.

Определим качественную зависимость изменения напряжения на емкости затвора фотоэлемента от размера фотодиода  $d$ . Если предположить, что все рассматриваемые емкости постоянны, то

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_d + C'_d + C} = \frac{\eta W \tau S(D)}{C_d + C'_d + C}. \quad (3)$$

Поскольку емкость фотодиода пропорциональна  $d^2$ , то с учетом характера зависимости  $S(D)$  [или  $S(d)$ ] из формулы (3) следует, что  $\Delta U$  с ростом  $d$  вначале увеличивается, затем достигает максимального значения и далее уменьшается. График этой зависимости показан на рис. 3.

Таким образом, существует оптимальный размер фотодиода, при котором электрический сигнал на выходе фотоэлемента будет максимальным.

Для выяснения зависимости оптимального размера фотодиода от параметров фотоэлемента и оптической системы ГЗУ аппроксимируем  $S(d)$  более простой функцией вида

$$S(d) \sim \frac{(ad)^2}{1 + (ad)^2}, \quad (4)$$

где  $a = \frac{kD_R}{3\sqrt{6}f}$ . График этой функции для сравнения изображен на рис. 1 (кривая 2). Видно, что исходная и аппроксимирующая зависимости близки между собой и имеют примерно одинаковый характер. С учетом (4) получим, что  $\Delta U$  достигнет максимального значения при

$$d_{\text{опт}} = \sqrt[4]{\frac{(C'_d + C) 27 (\lambda f)^2}{2\pi^2 D_R^2}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что оптимальный размер фотодиода зависит как от параметров фотоэлемента ( $C'_d, C$ ), так и от параметров оптической системы ГЗУ ( $\lambda, f, D_R$ ).

С целью более точного определения оптимальных размеров фотодиодов и расстояний между ними учтем нелинейный характер емкости  $p-n$ -перехода.

Известно, что заряд на емкости резкого  $p^+-n$ -перехода равен

$$Q(U) = S_0 \sqrt{2gN\epsilon\epsilon_0(U + \varphi_k)},$$

где  $U$  — приложенная к  $p-n$ -переходу разность потенциалов,  $\varphi_k$  — контактная разность потенциалов  $p-n$ -перехода,  $g$  — заряд электрона,  $N$  — концентрация примеси в подложке,  $\epsilon\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость кремния,  $S_0$  — площадь  $p-n$ -перехода. Тогда

$$\Delta Q = \eta W \tau S(D) = (S_d + S'_d) \sqrt{2gN\epsilon\epsilon_0} [(U + \varphi_k)^{1/2} - (U + \varphi_k - \Delta U)^{1/2}] + C \Delta U, \quad (6)$$

где  $S_d = d^2$  и  $S'_d$  — площади светочувствительной и паразитной частей фотодиода.

Из (6) находим, что

$$\Delta U = (U + \varphi_k) - \left\{ \left[ \frac{(d^2 + S'_d) \sqrt{gN\epsilon\epsilon_0/2}}{C} + \sqrt{U + \varphi_k} \right]^2 - \frac{\eta W \tau}{C} S \left( \frac{dkD_R}{4\sqrt{6}f} \right) \right\}^{1/2} - \frac{(d^2 + S'_d) \sqrt{gN\epsilon\epsilon_0/2}}{C}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что значение электрического сигнала  $\Delta U$  зависит от размера фотодиода  $d$ , емкости затвора  $C$ , энергии засветки  $W\tau$ , относительного размера голограммы  $h/f$  (эффективный линейный размер голограммы  $h$  равен  $D_R\sqrt{3}$  [1]), а также других параметров, значения которых выбираются из конструктивных или иных соображений и считаются постоянными.

На рис. 3, а показаны графики зависимости изменения напряжения  $\Delta U$  от размера фотодиода  $d$ , полученные при различных значениях емкости  $C$ . Кривая 1 соответствует емкости  $C = C_0 = 0,065$  пФ (это соответствует транзистору с  $H/L = 2$ , где  $H$  — ширина, а  $L$  — длина канала); кривая 2 —  $C = 2C_0$ ; кривая 3 —  $C = 4C_0$ . Видно, что при увеличении емкости  $C$  максимум  $\Delta U$  уменьшается и смещается в сторону больших значений  $d$ . (Графики получены при  $\varphi_k = 0,8$  В;  $U = 10$  В;  $S'_d = 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>;  $\eta = 0,25$  А/Вт;  $W\tau = 10^{-10}$  Дж;  $\lambda = 0,63$  мкм;  $f = 400$  мм;  $h = 1$  мм).

Изменение напряжения  $\Delta U$  определяется также относительным размером голограммы  $h/f$ , поскольку от этого параметра зависит коэффициент полезного использования воспринимаемого фотоприемником светового потока (при фиксированном линейном размере фотодиода). На рис. 3, б изображены графики зависимости  $\Delta U$  от размера фотодиода  $d$ , полученные при  $h/f = 2,2 \times 10^{-3}$ ;  $1,5 \times 10^{-3}$  и  $1,08 \times 10^{-3}$ , что соответствует оптической системе ГЗУ с параметрами  $h = 1$  мм;  $f = 270$  мм, 400 мм и 550 мм. Видно, что  $\Delta U$  возрастает с уменьшением  $f$ . Однако фокусное расстояние применяемых объективов тесно связано с емкостью памяти ГЗУ и не может быть выбрано меньше определенного значения.

Расстояние между фотодиодами  $t$  выбирается таким, чтобы отношение сигнал/фон  $S/\Phi = \Delta U/\Delta U_\Phi$  было не ниже определенного уровня. Здесь  $\Delta U$  и  $\Delta U_\Phi$  — изменения напряжения, вызванные действием соответственно «полезного» светового сигнала и перекрестных помех [1, 5].

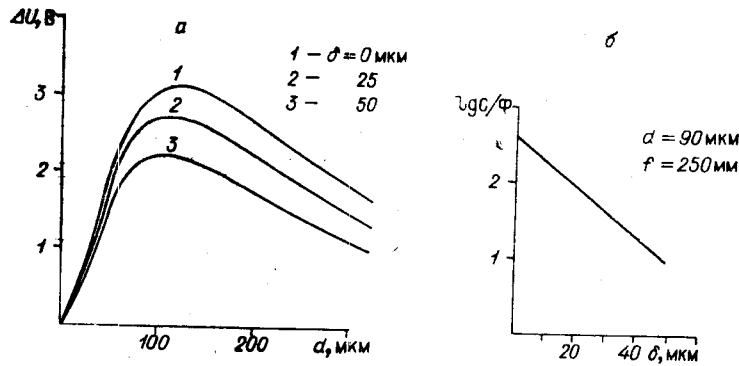


Рис. 4.

Из-за неточности размещения фотодиодов, а также aberrаций объективов [5] возможен сдвиг  $\delta$  восстановленного изображения относительно фотодиодов. На рис. 4, а показано изменение электрического сигнала  $\Delta U$  при различных значениях  $\delta$  (кривая 1 —  $\delta = 0 \mu\text{м}$ , 2 — 25, 3 — 50  $\mu\text{м}$ ), а на рис. 4, б можно видеть степень ухудшения отношения  $C/\Phi$  из-за сдвига изображения. Из графиков ясно, что смещение восстановленного изображения оказывает существенное влияние на выбор параметров фотоматрицы.

II. Оптимальные геометрические соотношения для параметров фотоматриц ГЗУ представлены на рис. 5, где кривая 1 соответствует оптимальным размерам фотодиодов, 2 — расстояниям между ними (в зависимости от фокусного расстояния объективов  $f$ ), а кривая 3 показывает, какая емкость памяти ГЗУ может быть получена при этих параметрах фотоматриц и оптической системы.

Емкость памяти ГЗУ определяется по формуле

$$V = NM,$$

где  $N = \left(\frac{A}{\sqrt{2}t}\right)^2$  — максимальное количество разрядных ячеек на транспаранте данных, равное количеству элементов в фотоматрице (предполагается, что коэффициент полезного использования площади фотоматрицы равен единице);  $M = \left(\frac{A}{\sqrt{2}h\gamma}\right)^2$  — максимальное количество голограмм,  $A$  — световой диаметр объективов,  $\gamma$  — скважность расположения голограмм.

При расчетах предполагалось, что длина волны света  $\lambda = 0,63 \mu\text{м}$ ; относительное отверстие объективов  $A/f = 1:4$ ; размер голограммы  $h = 1 \text{ мм}$ ; скважность  $\gamma = 1,5$  [1]; емкость затвора транзистора  $C = 0,065 \text{ пФ}$ ; допустимое смещение восстановленного изображения  $\delta = 50 \mu\text{м}$  (при технологической точности расположения фотодиодов  $\pm 20 \mu\text{м}$  и сдвигах из-за aberrаций объективов  $\pm 30 \mu\text{м}$ ); отношение  $C/\Phi$  с учетом сдвигов не менее 10.

Из графиков видно, что для ГЗУ емкостью памяти  $\sim 10^8$  бит оптимальный размер фотодиода составляет 105  $\mu\text{м}$ , а расстояние между ними 260  $\mu\text{м}$  (параметры оптиче-

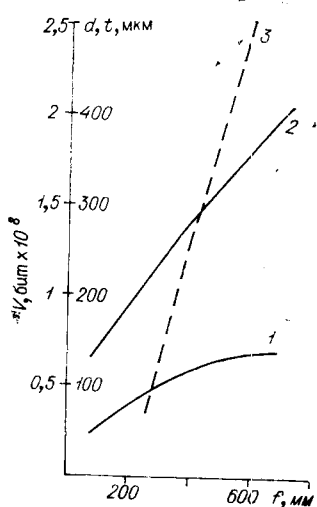


Рис. 5.

ской системы:  $\lambda=0,63$  мкм;  $f=350$  мм;  $h=1$  мм;  $b=0,2$  мм).

Ранее предполагалось, что длина волны света  $\lambda$  и размер голограммы  $h$  имеют постоянные значения. Однако оптимальные значения геометрических параметров фотоматриц останутся прежними, если при изменении  $\lambda$ ,  $h$  и  $f$  неизменным является значение параметра  $\lambda f/h$ .

Полученные результаты существенно отличаются от результатов работ [1, 5]. Так, например, из [1] следует, что при параметрах оптической системы ГЗУ  $f=300$  мм,  $h=0,8$  мм,  $\lambda=0,63$  мкм размер фотодиода должен быть равен примерно 290 мкм, а шаг между ними—300 мкм. Наши данные свидетельствуют, что при тех же условиях оптимальный размер фотодиода составляет 110 мкм, а шаг—270 мкм.

**Заключение.** Нелинейный характер преобразования светового потока в электрический сигнал существенно влияет на выбор геометрических параметров элементов фотоматрицы и оптической системы ГЗУ. Зависимость величины электрического сигнала от размеров фотодиода и параметров оптической системы ГЗУ позволяет оптимизировать не только размер фотоприемника, но и параметры оптической системы.

Полученные результаты использованы при разработке интегрально-гибридной фотоматрицы для экспериментального голограммного ЗУ с записью и считыванием информации [9].

Авторы выражают благодарность И. С. Гибину за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Hill. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 1.  
(Рус. пер. «Зарубежная радиоэлектроника», 1972, № 10, с. 39).
2. P. Graf, M. Lang. Geometrical Aspects of Consistent Holographic Memory Design.—“Appl. Opt.”, 1972, v. 11, № 6.
3. В. А. Вуль, М. С. Шмуйлович. Некоторые вопросы оптимизации голографических запоминающих устройств.—«Квантовая электроника», 1973, № 4.
4. A. Vander Lugt. Design Relationships for Holographic Memories.—“Appl. Opt.”, 1973, v. 12, № 7.
5. И. С. Гибин. Расчет и выбор параметров оптических систем голограммных запоминающих устройств.—«Автометрия», 1974, № 6.
6. А. Акаев, Л. В. Ковалевский, С. А. Майоров, Э. В. Стародубцев. Расчет геометрических параметров оптимальной конструкции голографической памяти большой емкости.—«Автометрия», 1975, № 3.
7. J. M. Assouf, R. D. Lohman. A Photodetector Array for Holographic Optical Memories.—“RCA Rev.”, 1959, v. 30, № 4.
8. O. Jäntschi, U. V. Hundelshausen, I. Feigt, W. Hering. Detector Matrix for a Holographic Memory.—“Siemens Forsch.—u. Entwickl.”, 1973, b. 2, № 1.
9. И. С. Гибин, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации.—«Автометрия», 1975, № 3.

Поступила в редакцию 25 декабря 1974 г.