

ЛИТЕРАТУРА

1. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы.— М.: Мир, 1981.
2. Клотиньш Э. Э. и др. Распределение электрического поля в электрооптическом модуляторе света с планарными электродами.— Учен. зап. ЛГУ им. П. Стучки, 1975, т. 230.
3. Усов А. А., Шермергор Т. Д. Рассеяние и скорость распространения электромагнитных волн в неоднородных диэлектриках.— ЖТФ, 1978, т. 48, вып. 6.
4. Ranganath G. S., Ramaseshan S. Optical transmission in polycrystals.— Optica Acta, 1972, vol. 19, N 9.
5. Thacher P. D. Refractive index and surface layer of ceramic (Pb, La)(ZrTi)O₃ compounds.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 12.
6. Luft V., Harris J. O., Jr. Electrode slotting process for thin PLZT wafers.— SAF Symposium Digest. Minneapolis, Minnesota, USA, 1979.
7. Kei-ichi Ueno, Tadashi Saky. PLZT spatial light modulator for a l-d hologram memory.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, N 1.

Поступила в редакцию 24 марта 1982 г.

УДК 681.327.68 : 621.383

С. И. НАЙМАРК
(Новосибирск)

К ВОПРОСУ ОБ ИНФОРМАТИВНОСТИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ МДП-ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОТОДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Введение. В работе [1] построена линейная модель многоэлементных МДП-интегральных фотодиодных преобразователей (МИФП) оптических сигналов (ОС), описаны функционирование и структурные схемы МИФП, предназначенных как для получения адекватного видеосигнала, так и для спектральных преобразований ОС. При построении модели использован аппарат линейных преобразований в M -мерном векторном пространстве, где M — число элементарных фотоприемников МИФП.

С точки зрения теории информации МИФП представляет собой канал связи, в котором входом является дискретизирующий растр элементарных фотоприемников, а выходом — выходные электроды МИФП. Как и для любого канала связи, информативность МИФП определяется отношением сигнал/шум и пропускной способностью (или количеством информации, принимаемым в течение длительности кадра).

Ниже на основе разработанной в [1] модели МИФП будут исследованы отношение сигнал/шум и количество принимаемой информации в зависимости от его схемы и способа функционирования.

Схемы и функционирование МИФП. Как следует из [1], при выборе МДП-фотодиода в качестве элементной базы МИФП матрица линейного преобразования (матрица выборки) фактически описывает схему МИФП и его функционирование с помощью мультипликативного разложения на кронекеровы сомножители и аддитивного разложения в ряд из m членов по бинарным матрицам, содержащим только числа $\{0, 1\}$:

$$C = \sum_{k=0}^{m-1} W^k C_k. \quad (1)$$

Рассмотрим для простоты МИФП с одномерной решеткой. Это означает, что его мультипликативное разложение тривиально, т. е. состоит только из одного сомножителя.

На рис. 1, а показана схема МИФП на одномерной решетке из m ячеек [1] при $m = 1$. Схема обрамления МИФП содержит память ем-

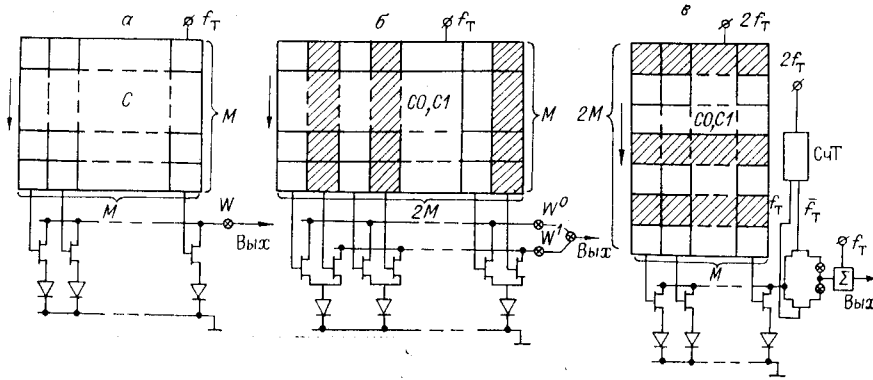


Рис. 1.

костью $M \times M$ бит для хранения матрицы выборки (состоящей в этом случае только из чисел $\{0, 1\}$, поскольку в разложение (1) входит лишь один член) и выходной усилитель с коэффициентом усиления W , который обозначен на схеме как узел умножения. Ясно, что значение коэффициента усиления несущественно, его наличие означает просто физическую нормировку входного оптического сигнала. Интересно, что МИФП при $m = 1$ функционально эквивалентен оптико-электронной системе со сменными черно-белыми масками для растровой модуляции ОС [2]. Каждая маска выполняет роль двоичного кода, занимающего строку матрицы выборки (M -разрядное слово в памяти), где «0» соответствует непрозрачному, а «1» — прозрачному участкам маски.

Рассмотрим схемы МИФП с решеткой при $m = 2$ [1], что означает наличие двух членов в разложении (1):

$$C = W^0 C_0 + W^1 C_1. \quad (2)$$

Формула (2) указывает на то, что решетка при $m = 2$ представлена как суперпозиция двух решеток при $m = 1$. На рис. 1, б изображена схема МИФП на параллельных, а на рис. 1, в — на последовательных m -ячейках [1]. На рис. 1, б суперпозиция имеет вид пространственного совмещения двух экземпляров решетки при $m = 1$. Таким образом, элементарные фотоприемники в соответствующих ячейках «сливаются» в один. Память имеет емкость $2M \times M$ бит и организована так, что содержит M слов по $2M$ разрядов каждое, причем на рис. 1, б элементы матрицы C_0 хранятся в незатрихованных, а элементы матрицы C_1 — в затрихованных ячейках блока памяти. Таким образом, поступление $2M$ -разрядного кода выборки вызывает появление выходных сигналов фотоячеек на выходе с коэффициентом W^0 либо с W^1 . На общем выходе с тактовой частотой f_T образуется сумма взвешенных с коэффициентами W^0 и W^1 пространственных отсчетов ОС. На рис. 1, в суперпозиция (2) соответствует разделению во времени работы одной и той же решетки при $m = 1$ на два подтакта. Блок памяти МИФП составлен из $2M$ слов по M разрядов каждое, которые подаются на управляющие входы решетки с частотой $2f_T$. Поступление каждого кода выборки обеспечивает считывание сигналов с тех фотоприемников, которые совпадают с единичными разрядами кода, а демультиплексор отводит суммарный сигнал в ветвь с коэффициентом W^0 либо W^1 . Результат аккумулируется в накопителе за два подтакта и сбрасывается с частотой f_T . Увеличивая m , можно продолжить построение схем МИФП совершенно аналогично случаю $m = 2$. Функционирование МИФП при $m > 1$ напоминает работу оптико-электронной системы с полутоновыми сменными масками.

Особый интерес вызывают ортогональные МИФП [1], которые описываются унитарными [3] матрицами выборки, содержащими в качестве своих элементов числа $e^{2\pi i(kl/m)}$, где $0 \leq k \leq M-1$, $0 \leq l \leq M-1$. При $m = 1$ существует единственная унитарная матрица — единичная. Схема

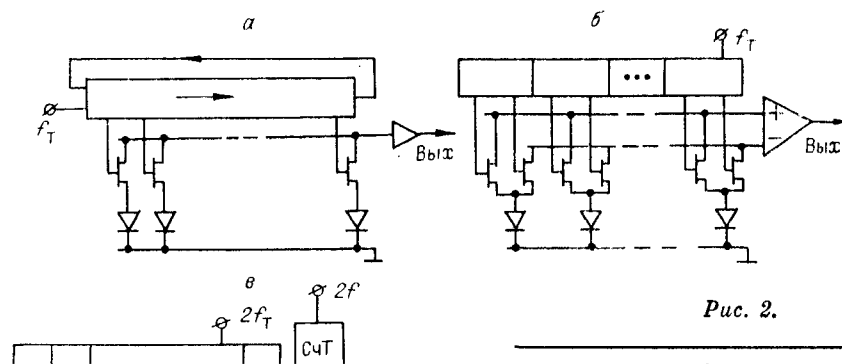


Рис. 2.

ется кольцевой генератор кода «бегущая единица» в виде кольцевого сдвигового регистра. Предварительно в один из разрядов регистра заносится «1», а в остальные — «0». В процессе работы на тактовый вход регистра с частотой f_T поступают импульсы, обеспечивающие перемещение «1» из разряда в разряд и поэлементную (последовательно один за другим) выборку выходных сигналов МДП-фотодиодов.

При $m = 2$ $e^{2\pi i(hl/2)} = \pm 1$ ($0 \leq k \leq M-1$, $0 \leq l \leq M-1$). Устройством, реализующим весовые коэффициенты ± 1 , может служить дифференциальный усилитель (рис. 2, б, в). Так как в качестве матрицы выборки используются различные системы функций Уолша, то память емкостью $2M \times M$ бит может быть заменена генераторами функций Уолша, которые широко описаны в литературе [4, 5] и требуют значительно меньших аппаратных затрат.

Двумерным решеткам МИФП будут соответствовать разделимые матрицы выборки. Для случая $m = 1$ разделимость тривиальна [1], а для $m > 1$ требуется, чтобы в каждой ячейке решетки обеспечивалось умножение по модулю m сигналов, поступающих по двум координатам [1]. Ортогональные МИФП с $m > 1$ уже не имеют аналогов — оптико-электронных систем со сменными масками.

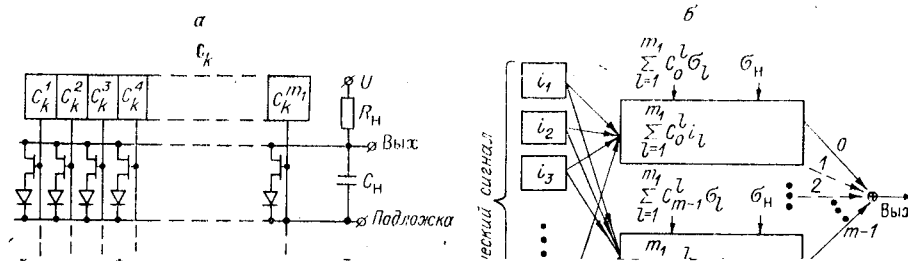
Важной особенностью ортогональных МИФП при $m > 1$ является то, что двоичные коды выборки, поступающие на управляющие входы решетки, обеспечивают интегральный сбор фотогенерированных носителей одновременно от всех элементарных фотоприемников, в результате чего поддерживается постоянство мощности выходного сигнала МИФП [1] в процессе выборки информации в течение всей длительности кадра.

Это обстоятельство будет использовано при оценке информативности ортогональных МИФП в последующих разделах.

Энергетические соотношения для сигнала и шума в зависимости от схемы и функционирования МИФП. В МИФП различают два типа шумов: искажения выходного сигнала, обусловленные неидентичностью фотоячеек, и флуктуационные шумы.

Первые имеют фиксированную реализацию для конкретного экземпляра МИФП. Они могут быть скомпенсированы различными способами [6], сводящимися к построению и предварительной калибровке устройства, реализующего инверсию искажения. Вторые обусловлены стохастическими процессами в элементах интегральной схемы.

С целью оценки шума по его нижней границе будем предполагать, что шумы первого типа скомпенсированы полностью. Шум второго типа будем считать белым. При этом каждая фотоячейка представляет собой $R_K C_D$ -фильтр нижних частот с постоянной времени $R_K C_D = \tau_D$, а выборки



Рассмотрим схему фрагмента МДП-фотодиодной решетки при $m = 1$ (рис. 3, а), выходной сигнал которой считывается на нагрузочном сопротивлении R_n . Согласно [7] мощность шума на выходе при коммутации одного из МДП-фотодиодов имеет вид

$$\langle Z^2 \rangle = [ei + ei_L + (4kT/R_n) + (4kT/R_k)](1/\tau), \quad (3)$$

где τ — время выборки одной компоненты выходного сигнала МИФП; i_L — темновой ток утечки фотодиода; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Простой подсчет показывает, что при типичных значениях $i_L = 10^{-10} \div 10^{-12}$ А можно пренебречь дробовым шумом тока утечки. Первый член представляет собой электрический аналог фотонного шума и исчезает при малом сигнале, так что энергия шума минимизируется величиной

$$\langle Z^2 \rangle \geq \langle \sigma^2 \rangle + \langle \sigma_n^2 \rangle = (4kT/R_k) (1/\tau) + (4kT/R_n) (1/\tau). \quad (4)$$

Схемотехническая особенность МДП-фотодиодных решеток заключается в том, что с увеличением числа МДП-фотодиодов, подключенных к выходу, линейно увеличивается емкость выходной шины C_n [6]. Выбор величины R_n продиктован обычно условием $R_k C_n \approx R_n C_n$, поскольку при уменьшении R_n увеличивается шум нагрузочного сопротивления, причем быстродействие МИФП не может быть лучше, чем быстродействие МДП-фотодиода. Увеличение же R_n с целью уменьшения шума ведет к падению быстродействия, причем шум нельзя сделать меньше, чем шум МДП-фотодиода. Отсюда следует, что

$$R_n \approx R_k/m_1.$$

В соответствии с уравнением выборки [1] и разложением (2) МДП-фотодиоды фрагмента подключаются к выходу в зависимости от кода выборки (рис. 3, б), следовательно, шумовой сигнал k -го такта выборки имеет вид

$$X_k = \sum_{i=1}^{m_1} C_k^i \sigma_i + \sigma_n. \quad (5)$$

Согласно [8] для мощности шума при выборке с вектор-строкой $C_k = \{C_k^i\}$ справедливо выражение

$$\langle X_k^2 \rangle = \|C_k\|^2 \langle \sigma^2 \rangle + \langle \sigma_n^2 \rangle = \langle \sigma^2 \rangle (\|C_k\|^2 + m_1), \quad (6)$$

где $\|C_k\|^2 = \sum_{i=1}^{m_1} |C_k^i|^2$ — квадрат нормы вектора C_k , имеющий смысл веса двоичного кода выборки. Перекрестные члены исчезают в (6) вследствие предположения о некоррелированности пространственных выборок шума. Очевидно, что

$$0 \leq \|C_k\|^2 \leq m_1.$$

При $m > 1$ можно определить мощность шума, используя представление m -решетки как суперпозиции m экземпляров решеток при $m = 1$, изображенных на рис. 3, а. Ясно, что на выходе m -решетки мощности шумов от m экземпляров элементарных решеток складываются:

$$\langle X_k^2 \rangle_m = \langle \sigma^2 \rangle \left(\sum_{l=0}^{m-1} \|C_k\|_l^2 + mm_1 \right), \quad (7)$$

где $\|C_k\|_l$ — норма вектора двоичного кода, поступающего на l -й экземпляр элементарной решетки. При $m = 1$ (7) совпадает с (6). Выражение (7) справедливо для m -решеток как на параллельных, так и на последовательных m -ячейках. Это следует из отсутствия корреляции как между временными, так и между пространственными выборками шума, поскольку в первом случае сигнал поступает от физически различных элементов схемы, а во втором — от одних и тех же, но в различные моменты времени с интервалом $\tau \geq \tau_D$. В формуле (7) шум суммирующего устройства не учитывается.

Задание сигнала на входе канала связи подразумевает задание ограничения на его среднеквадратическое значение [9]. Если считать сигнал детерминированным, то его мгновенная (или средняя) мощность может быть аналогом среднеквадратического значения. Для мультиплексной $m_1 \times m_2$ -решетки при $m = 1$ [1] имеем выражение для мощности, выделяемой на нагрузочном сопротивлении R_n :

$$P' = |(C_k, I)|^2 R_n \leq \|C_k\|^2 \|I\|^2 R_n = \|C_k\|^2 P, \quad (8)$$

где $P/R_n = \|I\|^2$ — норма вектора, составленного из выходных сигналов МДП-фотодиодов, подключенных к одной из m_2 выходных шин. Для $m > 1$ используем вновь представление m -решетки как суперпозиции с $m = 1$ решеток. Тогда ограничение мощности, рассеиваемой на нагрузочных сопротивлениях, имеет вид

$$P' \leq \sum_{k=0}^{m-1} \|C_k\|^2 |W^k|^2 P \quad (9)$$

и зависит от системотехнических параметров — матрицы выборки C и весовых коэффициентов $\{W^k\}$.

Отношение сигнал/шум и количество передаваемой МИФП информации. Рассмотрим отношение сигнал/шум для $m_1 \times m_2$ -решетки в случае произвольного m . Из (7) и (8) с учетом (4)

$$\gamma^2 \leq \gamma_0^2 / \left(1 + mm_1 / \sum_{k=0}^{m-1} \|C_k\|^2 |W^k|^2 \right), \quad (10)$$

где $\gamma_0^2 = P\Theta/4kT$. Для поэлементной выборки ($m = 1$) ограничение (10) оказывается чересчур завышенным. Так как в этом случае $\|C_k\|^2 = 1$, отношение сигнал/шум равно отношению средней мощности, выделяемой за один кадр на нагрузке R_n , к мощности шума:

$$\gamma^2 = \gamma_0^2 \leq \gamma_0^2 / m_1 (m_1 + 1) \cong (m_2^2 / M^2) \gamma_0^2. \quad (11)$$

Из (11) следует, что в МИФП с поэлементной выборкой отношение сигнал/шум γ_0 жестко зависит от степени распараллеливания выходных каналов m_2 . Для $m_1 = 1$, $m_2 = M$ отношение сигнал/шум максимизируется:

$$\gamma_0^2 = \gamma_{\max}^2 \leq P\Theta/8kT = \gamma_0^2/2, \quad (12)$$

а для противоположного крайнего случая $m_1 = M$, $m_2 = 1$ достигает минимума и при $M \gg 1$:

$$\gamma_0^2 = \gamma_{\min}^2 \leq P\Theta/M^2 4kT = \gamma_0^2/M^2. \quad (13)$$

Синтезируя ортогональные МИФП с $m > 1$ в [1], мы исходили из желания сохранить энергетические преимущества параллельной решетки и ввести структуру, обеспечивающую уменьшение числа ее внешних выво-

дов. Рассмотрим при этом отношение сигнал/шум. Так как $\sum_{k=0}^{m-1} \|C_k\|^2 |W^k|^2 = m_1$, то из (10)

$$\gamma^2 = \gamma_{\text{д}}^2 \leq \gamma_0^2 / (m + 1), \quad (14)$$

откуда следует, что отношение сигнал/шум γ_{\perp} не зависит от числа выходных каналов m_2 , а лишь от модуля m .

Очевидно, что на вид соотношения (14) не влияет также и то, как реализуются m -ячейки: параллельным или последовательным способом. Граница (14) при уменьшении m увеличивается и при $m = 1$ совпадает с (12) для параллельной структуры.

Для улучшения отношения сигнал/шум в МИФП с поэлементной выборкой используют режим накопления, который, как уже отмечалось в [1], сводится к измерению амплитуды сигнала в переходном процессе коммутации ключа выборки [6]. Суммарное значение сигнала пропорционально фотозаряду, накопленному на емкости фотодиода C_D в течение всей длительности кадра. Для отношения сигнал/шум имеем

$$\gamma^2 = \tilde{\gamma}_0^2 \leq \gamma_0^2 / (1 + m_1) \cong \gamma_0^2 (m_2 / M), \quad (15)$$

т. е. оно улучшается в $M/m_2 = m_1$ раз по сравнению с (11) ($1 \leq m_1 \leq M$). Однако остается множитель $(1 + m_1)^{-1}$, связанный с емкостью C_n .

Очевидно, что верхняя граница для отношения сигнал/шум не может превышать величины динамического диапазона, который определяется как отношение сигнала насыщения к шуму.

Удобно ввести вспомогательную величину κ_0^2 , равную отношению квадрата сигнала насыщения МДП-фотодиода к спектральной плотности шума:

$$2\kappa_0^2 \tau_D \leq \kappa_0^2 \tau \leq \kappa_0^2 \Theta \quad (16)$$

и

$$\kappa_0^2 = U / 4kTR_K, \quad (17)$$

где U — напряжение источника питания МДП-фотодиода (см. рис. 3, а). Величина κ_0^2 , нормированная на полосу частот выборки $1/\tau$, равна динамическому диапазону и может быть использована как физическое ограничение на отношение сигнал/шум. Предположим, что мощность ОС в каждой фотоячейке не превышает мощности сигнала насыщения; тогда

$$\gamma_0^2 \leq m_1 \kappa_0^2. \quad (18)$$

Подставляя (18) в формулы (10)–(15), получаем границу для отношений сигнал/шум в зависимости от параметра κ_0^2 , не используя характеристик сигнала.

Теперь можно теоретически оценить количество информации, которое способен воспринять МИФП, воспользовавшись теоремой Шеннона для непрерывного гауссова канала [9]. Рассмотрим случай $m = 1$ для индивидуального МДП-фотодиода. Верхняя граница для количества информации V описывается неравенством

$$V \leq (\Theta/\tau) \log(1 + \kappa_0^2 \tau)$$

(опущенное основание логарифма определяет единицы измерения информации). Это выражение при $\tau \rightarrow 0$ асимптотически стремится к величине $\kappa_0^2 \Theta \log_2 e$ бит.

При $m_2 = M$

$$V \leq M \kappa_0^2 \Theta \log_2 e, \quad (19)$$

а для произвольной $m_1 \times m_2$ -решетки с поэлементной выборкой

$$V \leq M \kappa_0^2 \Theta \log_2 e / m_1 = m_2 \kappa_0^2 \Theta \log_2 e. \quad (20)$$

При $m_1 = 1$, т. е. для решетки с единственным выходом,

$$V \leq \kappa_0^2 \Theta \log_2 e. \quad (21)$$

Рассмотрим реализацию МИФП на ортогональных решетках при $m > 1$. Используя (18) и (14), находим

$$V \leq m_2 \frac{\Theta}{\tau} \log \left(1 + \frac{m_1}{1+m} \kappa_0^2 \tau \right) \leq \frac{1}{1+m} M \kappa_0^2 \Theta \log_2 l_s, \quad (22)$$

так что количество информации не зависит от числа выходных каналов. Очевидно, что (22) справедливо и для МИФП на делимых решетках с единственным выходом.

Интересен другой предельный случай $m = M$, для которого ортогональная выборка эквивалентна ДПФ. Тогда из (14) и (22) следует, что

$$\gamma_{\text{ДПФ}}^2 \leq P \Theta / 8kT (1+m) = \gamma_0^2 / (M+1)$$

и

$$V \leq \kappa_0^2 \Theta \log_2 e,$$

т. е. по количеству принимаемой информации ДПФ эквивалентна поэлементной выборке (21).

Закключение. Аналитические оценки информативности МИФП, полученные выше, являются прямым следствием построенной в [1] модели и некоторой идеализации шумов, действующих в МИФП, т. е. игнорировалась неидентичность фотоячеек (которая, впрочем, всегда может быть скомпенсирована внешними устройствами) и принимались во внимание только флуктуационные шумы, обусловленные стохастическими процессами; выборки шума, взятые на различных дискретных тактах считывания выходных сигналов МИФП и из пространственно различных фотоячеек, считались некоррелированными. Такой подход обусловлен тремя обстоятельствами: во-первых, решетка, в которой отсутствуют связи между элементарными фотоприемниками (при фиксированном числе фотоприемников), имеет наилучшее пространственное разрешение; во-вторых, энергия шума оценивается по своему минимуму; в-третьих, обеспечивается наиболее ясная зависимость отношения сигнал/шум и количества информации от организации и функционирования МИФП.

Хотя в данной работе в явном виде рассматривались лишь одномерные фрагменты фоточувствительных решеток, обобщение результатов на делимые двумерные решетки, особенно для ортогональных МИФП, не представляет трудностей. Во всех случаях для получения оценок информативности недостаточно лишь описания схемы фоточувствительной решетки. Необходимо описание и способа его функционирования, т. е. схем обрамления. При представлении МИФП в качестве функционально законченного прибора оценки информативности следуют из его линейной модели [1].

Наиболее интересные результаты получены для МИФП ортогонального типа. Теоретически достижимое количество информации, которое способен воспринять и передать подобный МИФП, оказывается не зависящим ни от того, каким способом организована фоточувствительная решетка, ни от того, на каких m -ячейках (параллельных или последовательных) она построена. Физически этот факт является следствием инвариантности мощности выходного сигнала, а модуляция при выборке сводится лишь к перераспределению выходных сигналов на различные выходные электроды, число которых равно m .

Как было показано, структура матрицы выборки дает достаточно информации для синтеза решетки и схем обрамления. Однако конкретные реализации схем обрамления ортогональных МИФП известны лишь для случаев $m = 1$ (сканирование) и $m = 2$ (генерация функций Уолша). В литературе [10] встречаются теоретические способы построения быстрых алгоритмов преобразования Фурье в базисе ВКФ для произвольного m , которые могут быть использованы с целью синтеза соответствующих схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наймарк С. И. Линейная модель многоэлементных МДП-интегральных фотодиодных преобразований оптических сигналов.— Автометрия, 1984, № 5.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов.— Д.: Издательство ДПИ. Интегральные мдп-фотодиодные элементы, линейки и матрицы.— Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. М.: ЦНИИ-Электроника, 1980, вып. 2(743).
7. Басс Р. Р., Танака С. С., Веклер Дж. П. Принципы малопшумящего выделения сигнала в фотодиодных матрицах.— В кн.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображения: Пер. с англ. под ред. Р. А. Суриса. М.: Мир, 1979.
8. Наймарк С. И. Некоторые схмотехнические и структурные особенности многоэлементных МДП-фотодиодных устройств.— Автометрия, 1981, № 3.
9. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь: Пер. с англ./Под ред. М. С. Пинскера и Б. С. Цыбакова.— М.: Сов. радио, 1974.
10. Трахтман А. М., Трахтман В. А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах.— М.: Сов. радио, 1975.

Поступила в редакцию 26 апреля 1984 г.
