

УДК 681.31 : 535

Б. Н. Панков

(Новосибирск)

О НОВЫХ СХЕМАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИЕМА ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассматриваются новые схемы интегральных дифференциальных фотоэлектрических преобразователей, выполняемых методами МДП-технологии, в которых для повышения пороговой фоточувствительности и устойчивости к разбросу параметров электронных элементов используется балансировка их начального разбаланса. Эффективность применяемой балансировки подтверждается результатами компьютерного моделирования преобразователей.

Дифференциальный фотоэлектрический преобразователь (ДФЭП) является важным средством повышения чувствительности интегральных многоэлементных фотоприсменных устройств (МФУ), а также их устойчивости к оптическим и электрическим помехам [1—3]. ДФЭП обеспечивает устойчивое преобразование входных оптических сигналов с низкими значениями контраста в условиях резких колебаний их уровней и переменного светового фона и позволяет добиться рекордных значений пороговой чувствительности к принимаемым оптическим сигналам, динамического диапазона, помехозащищенности и нечувствительности к фоновым засветкам фотоприемников.

Как известно [1—3], одним из основных факторов, вызывающих разброс и ограничение пороговой дифференциальной фоточувствительности ДФЭП (кроме спектральной чувствительности и собственной емкости фотоприемников), является начальный разбаланс используемого в ДФЭП дифференциального каскада (ДК). Начальный разбаланс возникает из-за несимметрии параметров элементов ДК (напряжение смещения нуля ДК) и элементов стирания ДФЭП, вызывающей неодинаковость начальной установки напряжений смещения на фотоприемниках. Начальный разбаланс напрямую ограничивает пороговую чувствительность ДФЭП, поскольку суммируется с полезным сигналом.

Кроме того, пороговая чувствительность ячеек МФУ ограничивается несимметрией параметров элементов буферных каскадов (БК), подключаемых к выходам ДК, — истоковых повторителей в ячейках с аналоговым дифференциальным выходом [1, 4, 5], компараторов в ячейках с нормированным (цифровым) выходом [6, 7].

Оценить влияние несимметрии параметров ДФЭП на его пороговую чувствительность несложно, если определить порог чувствительности ДФЭП как оптический сигнал, создающий на входах ДФЭП разность напряжений, равную начальному входному разбалансу. По данным [8, 9] для ДК на МДП-транзисторах, используемых в операционных усилителях, напряжение смещения нуля обычно составляет 10—30 мВ. Однако по другим данным [1, 2] только разброс пороговых напряжений используемых в ДФЭП пар активных транзисторов, расположенных на расстояниях 18 мкм один от другого, оценивается в 50 мВ. Разброс возрастает с увеличением расстояний между транзисторами.

Много это или мало для ДФЭП, если учитывать их реальные параметры, в частности, размеры, собственную емкость и спектральную чувствительность фотоприемников? Например, для ДФЭП с размерами фотодиодов 100×100 мкм напряжение смещения нуля 50 мВ для излучения на длине волны 0,63 мкм соответствует пороговой чувствительности $\sim 2 \times 10^{-13}$ Дж/яч.

[1, 2]. Очевидно, что для достижения повышенной пороговой чувствительности необходимо принимать меры по устранению или минимизации влияния указанного фактора на пороговую чувствительность ДФЭП.

В [3] нами рассмотрены возможности автоматической балансировки или учета начального разбаланса дифференциального усилителя, осуществляемого на каждом рабочем такте ДФЭП одновременно с установкой (стиранием) начальных напряжений смещения на емкостях фотоприемников ДФЭП в МФУ с повышенной фоточувствительностью и быстродействием. Однако предлагаемые в [3] схемотехнические решения имеют ограничения, снижающие эффективность применяемой автоматической балансировки. В частности, в ДФЭП с разделенными фотодиодами [4] необходимо выдерживать требуемую зависимость отношения емкостей в разделенных фотодиодах от коэффициента усиления ДК, в ДФЭП с запоминающими конденсаторами [6, 7] существует несимметрия по отношению к источнику коммутационных помех — сигналу стирания, а связь по постоянному току между ДК и сопряженными с ним элементами (в частности, компараторами) затрудняет их согласование по режимам.

Цель настоящей статьи — изложить более эффективные приемы балансировки ДФЭП для повышения его пороговой чувствительности и рассмотреть новые схемы интегральных фотозлектрических преобразователей с балансировкой их начального разбаланса. Будем полагать при этом, что ДФЭП выполняются методами *n*- или *p*-канальных МДП-технологий в условиях разброса параметров не только элементов ДФЭП, но и элементов, сопряженных с ДФЭП и входящих в состав элементарных ячеек МФУ.

Устранить или уменьшить влияние начального разбаланса ДФЭП на его пороговую чувствительность возможно следующим образом [3]:

1. Перед началом накопления оптического сигнала подать на электрические входы ДФЭП начальный дифференциальный сигнал, равный по величине и обратный по знаку приведенному ко входу ДФЭП начальному разбалансу. Поскольку при использовании режима накопления емкости смещаемых в обратном направлении фотоприемников выступают в роли элементов динамической памяти напряжений начальной установки (стирания) и результатов интегрирования входных оптических сигналов, то и вводимый в эти элементы корректирующий дифференциальный сигнал будет также сохраняться этими элементами на время интегрирования, а его действие — учитываться в выходном сигнале ДФЭП [4].

2. На каждом рабочем такте перед интегрированием входных оптических сигналов путем введения в ДФЭП дополнительных элементов динамической памяти — запоминающих конденсаторов (в [8, 10] эти элементы названы переключаемыми конденсаторами) — запомнить и учесть в дальнейшем имеющийся на выходах ДК его начальный разбаланс [6, 7]. Переключаемые конденсаторы используются при этом в качестве элементов памяти или напряжений разбаланса ДК [6, 7], или управляющих напряжений для дополнительных устройств в составе ДФЭП, обеспечивающих подавление на выходах ДК его начального разбаланса [5].

Эффективность подавления или учета действия начального разбаланса на результат фотозлектрического преобразования может быть существенно повышена, если балансировку ДФЭП или устройств, входящих в состав ячеек МФУ и сопрягаемых по входу с выходами ДФЭП, осуществлять отдельно от стирания. Для этого при создании новых ДФЭП необходимо предусмотреть в их структуре элементы балансировки, а для МФУ в целом — дополнительный сигнал управления балансировкой.

Рассмотрим новые схемы ДФЭП, в которых для обеспечения повышенной пороговой фоточувствительности и устойчивости к разбросу параметров элек-

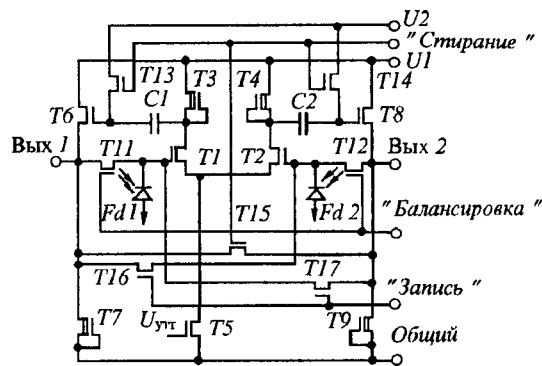


Рис. 1. ДФЭП с буферными каскадами и запоминающими конденсаторами

тронных элементов используется балансировка. Заметим, что эти схемы обсуждаются на функциональном уровне. Вопросы выбора конкретных параметров элементов таких схем при их проектировании под заданные технические требования решаются с использованием традиционных методов (см., например, [8, 9]).

На рис. 1 представлен ДФЭП, содержащий ДК на транзисторах $T1—T5$ с фотоприемниками $Fd1$ и $Fd2$ на его входах и два буферных каскада — истоковые повторители напряжений [11]. Фотоприемники в ДФЭП представляют собой фотодиоды, образованные $p-n$ -переходами между диффузионными областями МДП-транзисторов и подложкой [1, 2].

Два запоминающих (переключаемых) конденсатора $C1$ и $C2$ включены между выходами ДК и входами БК. Заряд емкостей фотодиодов до напряжений обратного смещения осуществляется аналоговыми ключами $T11$ и $T12$ с противофазных (по отношению ко входам ДК) выходов БК. В то же время источник смещения фотодиодов $U2$ подключается ко входам БК аналоговыми ключами $T13$, $T14$. Аналоговые ключи $T13$, $T14$ управляются сигналом стирания, а $T11$, $T12$ — сигналом балансировки. Еще один аналоговый ключ $T15$, управляемый сигналом стирания, соединяет между собой выходы БК. Источник напряжения $U_{\text{ут}}$ условно представляет управляющий сигнал для токостабилизирующего транзистора $T5$.

Рассматриваемый ДФЭП является универсальным в отношении его выхода (аналогового или цифрового). Выход нормированного вида (цифрового) получают в ДФЭП, используя два аналоговых ключа $T16$ и $T17$, которые соединяют между собой синфазные выходы БК и входы ДК и управляются сигналом записи.

Принцип действия ДФЭП состоит в следующем. По сигналам стирания и балансировки через открытые каналы аналоговых ключей стирания $T13$ и $T14$ на входы БК подается напряжение $U2$, а на входы ДК — напряжения с выходов БК. При этом собственные емкости фотодиодов заряжаются до напряжений выходов БК, соединяемых между собой через открытый канал аналогового ключа стирания $T15$, а на выходах ДК устанавливаются напряжения, соответствующие начальному разбалансу ДК. Емкости запоминающих конденсаторов $C1$ и $C2$ также заряжаются в соответствии с выходными напряжениями ДК и напряжением $U2$. Далее представляют интерес два возможных случая.

При одновременном окончании сигналов стирания и балансировки на фотодиодах оказываются напряжения обратного смещения, которые определяются зарядами, запасенными емкостями фотодиодов во время стирания, а начальный разбаланс ДК запоминается на конденсаторах $C1$ и $C2$, но не поступает на входы БК. Однако на информационных выходах ДФЭП устанавливается дифференциальное напряжение в соответствии с несимметрией параметров БК (например, пороговых напряжений усилительных транзисто-

ров). Таким образом, задача повышения пороговой чувствительности фотоприемного элемента решается, но только частично.

Если же сигналы стирания и балансировки заканчивать неодновременно, а задний фронт сигнала балансировки задерживать относительно заднего фронта сигнала стирания, то по окончании сигнала стирания входы БК оказываются отключенными от источника U_2 . Возникающий между выходами БК дифференциальный сигнал, обусловленный несимметрией БК, является источником возмущения в цепях отрицательной обратной связи, которой охвачены ДК через емкости запоминающих конденсаторов, БК и открытые аналоговые ключи балансировки T_{11} и T_{12} . За счет отрицательной обратной связи, при действии которой происходит перераспределение напряжений на входах и выходах ДК и соответственно на входах БК, начальный дифференциальный сигнал на выходах БК, вызванный несимметрией параметров буферных каскадов, уменьшается в F раз, где F — глубина отрицательной обратной связи. Таким образом, в результате стирания и балансировки на информационных выходах ДФЭП будет отсутствовать начальный разбаланс ДК, а действие несимметрии напряжений смещения между входами и выходами БК уменьшится. Поэтому задача повышения чувствительности решается более полно.

Далее, после балансировки усиленная ДК разность напряжений на емкостях фотодиодов, обусловленная интегрированием входных оптических сигналов, поступает через емкости запоминающих конденсаторов и БК на информационные выходы ДФЭП.

Для получения результата сравнения оптических сигналов в цифровой форме, т. е. в виде напряжений нормированных уровней на выходах БК, используется операция записи, для выполнения которой после заданного времени накопления на управляющие входы аналоговых ключей записи T_{16} , T_{17} подается сигнал записи. Открытые аналоговые ключи записи, соединяя выходы БК со входами ДК, образуют цепи положительной обратной связи, в результате действия которой ток токостабилизирующего транзистора T_5 направляется только в одно из плеч ДК, в то время как другое плечо запирается. Это состояние ДК повторяется на информационных выходах ДФЭП. Так производится компарирование сигнала ДК с фотодиодами на входах и его нормирование по уровню.

Следует заметить, что в рассматриваемом ДФЭП аналоговые ключи записи T_{16} и T_{17} могут быть использованы и при выполнении операции стирания для установки начальных напряжений на фотодиодах. Для этого одновременно с сигналом стирания должен быть подан сигнал записи, равный по длительности сигналу стирания. Что касается сигнала балансировки, то и его можно также использовать в соответствии с рассмотренными выше ситуациями.

Нетрудно видеть, что в рассмотренном ДФЭП повышение его пороговой чувствительности достигается как путем введения дополнительного дифференциального сигнала на электрические входы ДФЭП, так и за счет запоминания разбаланса на переключаемых конденсаторах.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования, проведенного на ПК IBM AT 386 для ДФЭП по рис. 1 с использованием пакета PSpice, версия 3.06, а также адаптированного к ПК пакета МДС-85 с учетом возможностей МДП-технологий [8—10]. При этом в ДФЭП с размерами фотоприемников 100×100 мкм

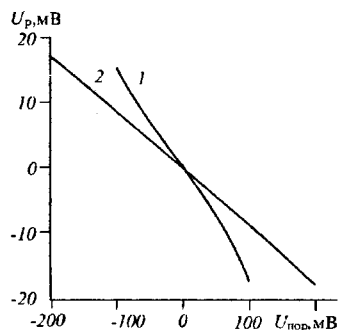


Рис. 2. Зависимость начального разбаланса U_p на информационных выходах балансируемого ДФЭП:

1 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор1} - U_{пор2}$ усилительных транзисторов T_1, T_2 ДК; 2 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор6} - U_{пор8}$ усилительных транзисторов T_6, T_8 БК

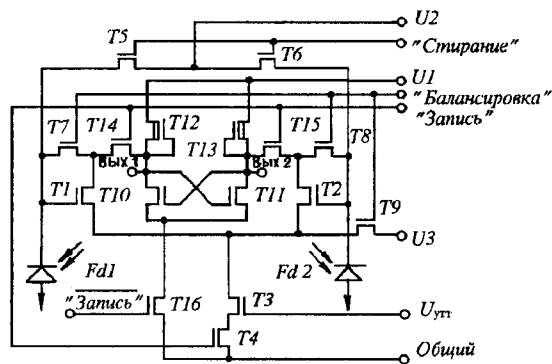


Рис. 3. ДФЭП с возможностью организации конвейера по накоплению и обработке входных оптических сигналов

использовался ДК, имеющий коэффициент усиления дифференциальной составляющей ~ 14 . Номинальные значения пороговых напряжений обогащенных и обедненных n -канальных транзисторов ДФЭП составляли соответственно $0,7$ и $-1,9$ В, а емкости запоминающих конденсаторов принимались равными $0,1$ пФ. На рис. 2 иллюстрируется высокая эффективность предлагаемой балансировки. Заметим, что разбаланс $U_p = \sim \pm 20$ мВ соответствует для данного ДФЭП расчетной пороговой чувствительности $\sim 0,57 \times 10^{-14}$ Дж/яч.

ДФЭП, схема которого приведена на рис. 3, позволяет в отличие от рассмотренного выше организовать конвейер по накоплению и обработке входных оптических сигналов, поскольку имеются независимо функционирующие фотоприемная часть и элемент памяти (триггер) [12, 13]. Балансировка в нем дифференциального каскада осуществляется с использованием аналоговых ключей $T7-T9$ и дополнительного источника напряжения $U3$ (назовем его условно источником смещения балансировки). Как известно [1, 2, 9], разброс и нестабильность пороговых напряжений усилительных транзисторов ДК являются основными источниками разбаланса. Влияния этих факторов на дифференциальную чувствительность ДФЭП можно избежать, если после стирания (установки) начальных напряжений на электрических входах ДФЭП ввести их дополнительную коррекцию в соответствии с разбросом пороговых напряжений усилительных транзисторов $T1$ и $T2$ и напряжением смещения балансировки $U3$.

С этой целью на аналоговые ключи $T7-T9$ подается сигнал балансировки, задний фронт которого задержан относительно заднего фронта сигнала стирания. Открытые каналы аналоговых ключей $T7$ и $T8$ соединяют стоки и затворы усилительных транзисторов $T1$ и $T2$, у которых каналы сток—исток будут проводящими, если напряжение на их затворах превысит напряжение на истоках на величину $U_{пор}$ соответствующего транзистора. При этом напряжение на истоках транзисторов $T1$ и $T2$ при наличии сигнала балансировки устанавливается через открытый канал аналогового ключа $T9$ равным напряжению $U3$ источника смещения балансировки. Источниками напряжений U_{g1} , U_{g2} на затворах транзисторов $T1$ и $T2$ будут заряды, накопленные емкостями фотодиодов $Fd1$, $Fd2$ во время стирания. Поэтому если после стирания во время балансировки на затворах транзисторов $T1$ и $T2$ обеспечить условия $U_{g1} > U_{пор1} + U3$, $U_{g2} > U_{пор2} + U3$, где U_{g1} и U_{g2} — напряжения на затворах транзисторов $T1$ и $T2$; $U_{пор1}$ и $U_{пор2}$ — пороговые напряжения транзисторов $T1$ и $T2$; $U3$ — напряжение смещения балансировки, то емкости фотодиодов будут разряжаться до тех пор, пока каналы сток—исток транзисторов $T1$ и $T2$ остаются проводящими, т. е. пока имеют место упомянутые выше условия. Таким образом, во время балансировки напряжения на затворах усилительных транзисторов $T1$ и $T2$ ДК ДФЭП (напряжения на емкостях фотодиодов

$Fd1, Fd2$ перед началом накопления) устанавливаются в соответствии с напряжением смещения балансировки и пороговыми напряжениями транзисторов $T1$ и $T2$, компенсируя тем самым разброс пороговых напряжений этих транзисторов и повышая пороговую чувствительность ДФЭП.

Триггер-защелка на транзисторах $T10—T16$ осуществляет компарирование сигнала с выходов ДФЭП, его нормирование по уровню и запись в триггер.

Нетрудно видеть, что в рассмотренном ДФЭП реализуется метод, при котором в результате балансировки на электрические входы ДФЭП вводится дополнительный дифференциальный сигнал. И хотя такая балансировка не устраняет разбаланс ДК, вызванный несимметрией других параметров элементов ДК, однако эффективность ее может быть достаточно высокой, учитывая доминирующее влияние разброса пороговых напряжений усилительных транзисторов ДК на его начальный разбаланс.

Если же изменить режим работы ДФЭП, отказавшись от конвейера по накоплению и обработке входных оптических сигналов, то можно уменьшить разбаланс ДК, вызванный несимметрией и других его параметров. Для этого в рассматриваемом ДФЭП необходимо включить одновременно с импульсом «Балансировка» импульсы «Запись» и «Запись» с задними фронтами, задержанными относительно заднего фронта импульса «Балансировка» на время накопления оптических сигналов. Образующиеся на время балансировки два отдельных инвертирующих усилителя с цепями отрицательной обратной связи имеют общие источники смещения $U3$ и питания. В результате действия в этих усилителях отрицательной обратной связи, осуществляемой транзисторами балансировки $T7$ и $T8$, напряжения на их входах, т. е. напряжения смещения на емкостях фотоприемников, устанавливаются в соответствии с параметрами элементов усилителей. Тем самым осуществляется коррекция напряжений на входе балансируемого ДК в зависимости от его разбаланса.

На рис. 4, 5 приведены результаты компьютерного моделирования ДФЭП по схеме на рис. 3 с элементами и параметрами ДК, используемыми при моделировании ДФЭП по схеме на рис. 1.

На рис. 6 представлена схема ДФЭП, обладающего более высокой пороговой чувствительностью [14] с функциональными возможностями ДФЭП по схеме на рис. 3. Последнее достигается тем, что в нем устраняются влияния не

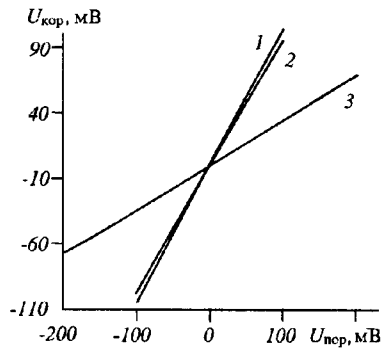


Рис. 4. Зависимость напряжения коррекции $U_{кор}$ на входах балансируемого ДФЭП:

1 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор1} - U_{пор2}$ усилительных транзисторов $T1, T2$ ДК при использовании конвейера по накоплению и обработке входных оптических сигналов; 2 и 3 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор1} - U_{пор2}$ усилительных транзисторов $T1, T2$ ДК и $\Delta U_{пор} = U_{пор12} - U_{пор13}$ нагрузочных транзисторов $T12, T13$ ДК при отказе от конвейера

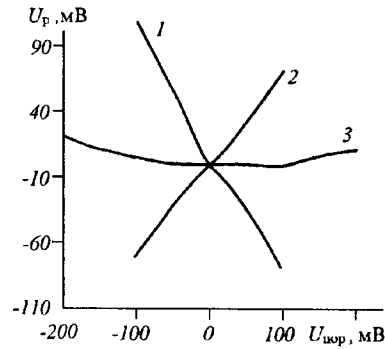


Рис. 5. Зависимость начального разбаланса U_p на информационных выходах балансируемого ДФЭП:

1 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор1} - U_{пор2}$ усилительных транзисторов $T1, T2$ ДК при использовании конвейера по накоплению и обработке входных оптических сигналов; 2 и 3 — от несимметрии пороговых напряжений $\Delta U_{пор} = U_{пор1} - U_{пор2}$ усилительных транзисторов $T1, T2$ ДК и $\Delta U_{пор} = U_{пор12} - U_{пор13}$ нагрузочных транзисторов $T12, T13$ ДК при отказе от конвейера

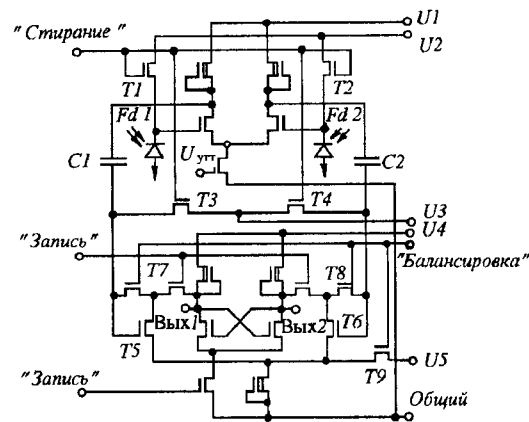


Рис. 6. ДФЭП с запоминающими конденсаторами и организацией конвейера по накоплению и обработке входных оптических сигналов

только начального разбаланса ДК с фотоприемниками на входах, но и разброса пороговых напряжений усилительных транзисторов $T5$, $T6$ триггер-защелки.

В рассматриваемом ДФЭП переключаемые конденсаторы $C1$, $C2$ используются для запоминания как начального разбаланса ДК с фотоприемниками на входах, так и по аналогии с ДФЭП по схеме на рис. 3 дополнительной коррекции запоминаемого разбаланса с учетом разброса пороговых напряжений усилительных транзисторов $T5$, $T6$ триггер-защелки и напряжения $U5$. И если для реализации первого используется стирание (ключевые транзисторы стирания $T1—T4$, источники смещения фотодиодов $U2$ и входов усилительных транзисторов триггер-защелки $U3$), то для реализации второго — балансировка (ключевые транзисторы балансировки $T7—T9$ и источник смещения $U4$). При этом требования к сигналам стирания и балансировки остаются прежними: задний фронт сигнала балансировки должен быть задержан относительно заднего фронта сигнала стирания.

Отсутствие на входном сигнале триггер-защелки начального разбаланса ДК, коррекция этого сигнала в соответствии с разбросом пороговых напряжений входных усилительных транзисторов триггер-защелки, симметрия схемы по отношению к источникам коммутационных помех (а эта симметрия характерна для всех рассмотренных ДФЭП) повышают отношение сигнал/помеха для ДФЭП в целом, а следовательно, увеличивают его пороговую чувствительность. При этом повышается устойчивость ДФЭП к действию технологического разброса параметров элементов, наличию паразитных параметров и связей между элементами, а также неоднородностей, вносимых технологией производства и условиями эксплуатации.

Как уже отмечалось, компьютерное моделирование рассмотренных ДФЭП полностью подтвердило высокую эффективность применяемых методов балансировки при подавлении влияния несимметрии параметров элементов ДФЭП на пороговую чувствительность. Следует подчеркнуть, что эффективность балансировки достигнута без усложнения схемной конфигурации и топологии ДФЭП и, что особенно важно, по сравнению с [4—7] при сокращении количества и снижении требований к размещению на кристалле МФУ входящих в ДФЭП интегральных элементов. В то же время устраняются ограничения, присущие ДФЭП [4—7], в которых балансировка и стирание совмещены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наймарк С. И., Третьяков В. М. Фотоприемный интегральный матричный элемент для считывания парафазного оптического кода // Автометрия. 1977. № 2.
2. Наймарк С. И. Многоэлементные МДП-интегральные фотодиодные преобразователи оптических сигналов. Ч. 2. Оптоэлектронные функциональные преобразователи оптических сигналов. Устройства и системы на их основе // Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ «Электроника». Сер. 3. Микроэлектроника. М., 1983. Вып. 2(937).
3. Панков Б. Н. Параллельная фотоматричная БИС с логической обработкой страниц данных // Автометрия. 1993. № 3.
4. А. с. 1619345 СССР. Фотоприемная ячейка /В. Е. Бутт, Б. Н. Панков, В. В. Савельев, П. Е. Твердохлеб. Заявл. 06.02.89; Оpubл. 07.01.91, Бюл. № 1.
5. А. с. 1626261 СССР. Фотоприемная ячейка /В. Е. Бутт, Б. Н. Панков, В. В. Савельев, П. Е. Твердохлеб. Заявл. 17.02.89; Оpubл. 07.02.91, Бюл. № 5.
6. А. с. 1619344 СССР. Фотоприемная ячейка /В. Е. Бутт, Б. Н. Панков, В. В. Савельев, П. Е. Твердохлеб. Заявл. 10.02.89; Оpubл. 07.01.91, Бюл. № 1.
7. А. с. 1709392 СССР. Ячейка фоточувствительного матричного запоминающего устройства /В. Е. Бутт, Б. Н. Панков, В. В. Савельев, П. Е. Твердохлеб. Заявл. 30.10.89; Оpubл. 30.01.92, Бюл. № 4.
8. Allen P. E., Sanches-Sinencio E. Switched Capacitor Circuits. New York: Van Nostrand, 1984. (Аллен Ф., Санчес-Синенсио Э. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами. М.: Радио и связь, 1989).
9. Проектирование и применение операционных усилителей /Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. М.: Мир, 1974.
10. Unbehauen R., Cichocki An. MOS Switched-Capacitor and Continuous-Time Integrated Circuits and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
11. Положительное решение на заявку 93-002831/24(001813). Фотоприемный интегральный элемент для сравнения оптических сигналов /Б. Н. Панков. Принято 08.11.94.
12. Положительное решение на заявку 92-012479/24(058768). Фотоприемный интегральный элемент памяти /Б. Н. Панков. Принято 18.05.94.
13. Панков Б. Н. Структура и схемная реализация ячейки оптического транспаранта на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Автометрия. 1993. № 3.
14. Пат. 2043665 России. Фотоприемный интегральный элемент памяти /Б. Н. Панков. Заявл. 15.01.93; Оpubл. 10.09.95, Бюл. № 25.

Поступило в редакцию 11 марта 1994 г.