

Current transport mechanisms of photodiodes for the spectral range 8—12 μm based on MBE-grown heteroepitaxial HgCdTe layers

J. V. Gumenjuk-Sichevska, V. V. Zabudsky, I. A. Lysiuk, F. F. Sizov
Institute of Semiconductor Physics, Kyiv, Ukraine

V. V. Vasiliev, V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

Charge transport mechanisms of n^+-n^-p and n^+-p photodiodes, obtained by boron ion doping of MBE-grown heteroepitaxial HgCdT layers have been studied. Results of model calculations performed within the balance equations scheme show that the dark current of n^+-n^-p diodes is limited by the diffusion current in the junction and by the current through a midgap donor-type trap level with the energy $E_t = 0.7 E_g$.

PACS: 72.80.Ey; 73.61.Ga

УДК 535.247.049.7:621.383.52

Многоканальные устройства предпроцессорной обработки сигналов для многоэлементных ИК ФПУ

И. И. Ли

Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены системные и схемотехнические решения построения интегрированных с устройствами считывания адаптивных многоканальных устройств предпроцессорной обработки сигналов как в аналоговой, так и в цифровой форме. Приведены экспериментальные результаты обследования многоканальных устройств считывания с предпроцессорной обработкой сигналов и ИК ФПУ на их основе.

PACS: 07.57.Kp

Введение

Низкий контраст изображения в ИК-диапазоне, разброс фотоэлектрических и электрофизических параметров в многоэлементных ИК ФПУ определяют необходимость начальной (предпроцессорной) обработки фотосигналов. Неоднородность параметров часто является основной причиной, ограничивающей чувствительность многоэлементных ИК ФПУ [1, 2]. Это относится практически к любым многоэлементным сенсорам, в которых всегда присутствует определенный разброс фотоэлектрических, электрофизических либо других параметров.

К настоящему времени решены основные материаловедческие, технологические и схемотехниче-

ские проблемы производства многоэлементных ИК-фотоприемников и многоэлементных ИК ФПУ второго поколения с чувствительностью, близкой к теоретическому пределу — обнаружительной способности, ограниченной флуктуациями фонового излучения (режим ОФ). Пространственное и временное разрешение различных типов многоэлементных ИК ФПУ превышает телевизионный стандарт при высокой надежности и приемлемой стоимости. Эти достижения позволили тепловизионным системам, и в более широком смысле различными методикам, основанным на регистрации излучения в ИК-области спектра, найти применение не только в интересах оборонной техники, но и в гражданских отраслях промышленности, медицине, научных исследованиях [3].

Для ИК ФПУ следующих поколений одной из основных задач становится формирование ИК-видеоизображений и последующей процессорной обработки сигналов, таких как распознавание образов и т. д. в фокальной плоскости ИК ФПУ кремниевыми устройствами считывания. Реализация таких устройств позволит уменьшить объем информации, поступающей с многоэлементных ИК-фотоприемников, снизить требования к динамическому диапазону внешних устройств, существенно снизить стоимость, энергопотребление, уменьшить массогабаритные показатели и, следовательно, повысить экономическую эффективность и расширить области применения тепловизионных систем.

Разработка систем формирования ИК-видеосигналов в интегральном исполнении с устройствами считывания началась практически одновременно с разработкой гибридных, многоэлементных ИК ФПУ [4, 5]. Однако вследствие конструктивных недостатков такие устройства не нашли широкого

применения. В данной работе рассмотрены системные и схемотехнические решения построения устройств для обработки и формирования ИК-видеосигналов.

Устройства считывания с вычитанием аддитивных, постоянных во времени, неинформационных компонент фотосигналов

Принципиальная схема устройства, успешно решающая задачу вычитания аддитивных, постоянных во времени, неинформационных компонент фотосигналов Φ в аналоговой форме приведена на рис. 1 [6]. На рис. 1, а в качестве фотоприемника показан ПЗИ-элемент, но могут быть использованы фотодиод или фотосопротивление. В этом случае МДП-транзистор Т1, необходимый для задания режима неравновесного обеднения ПЗИ-элемента и шины управления Φ_{pr} и U_{dis} можно исключить.

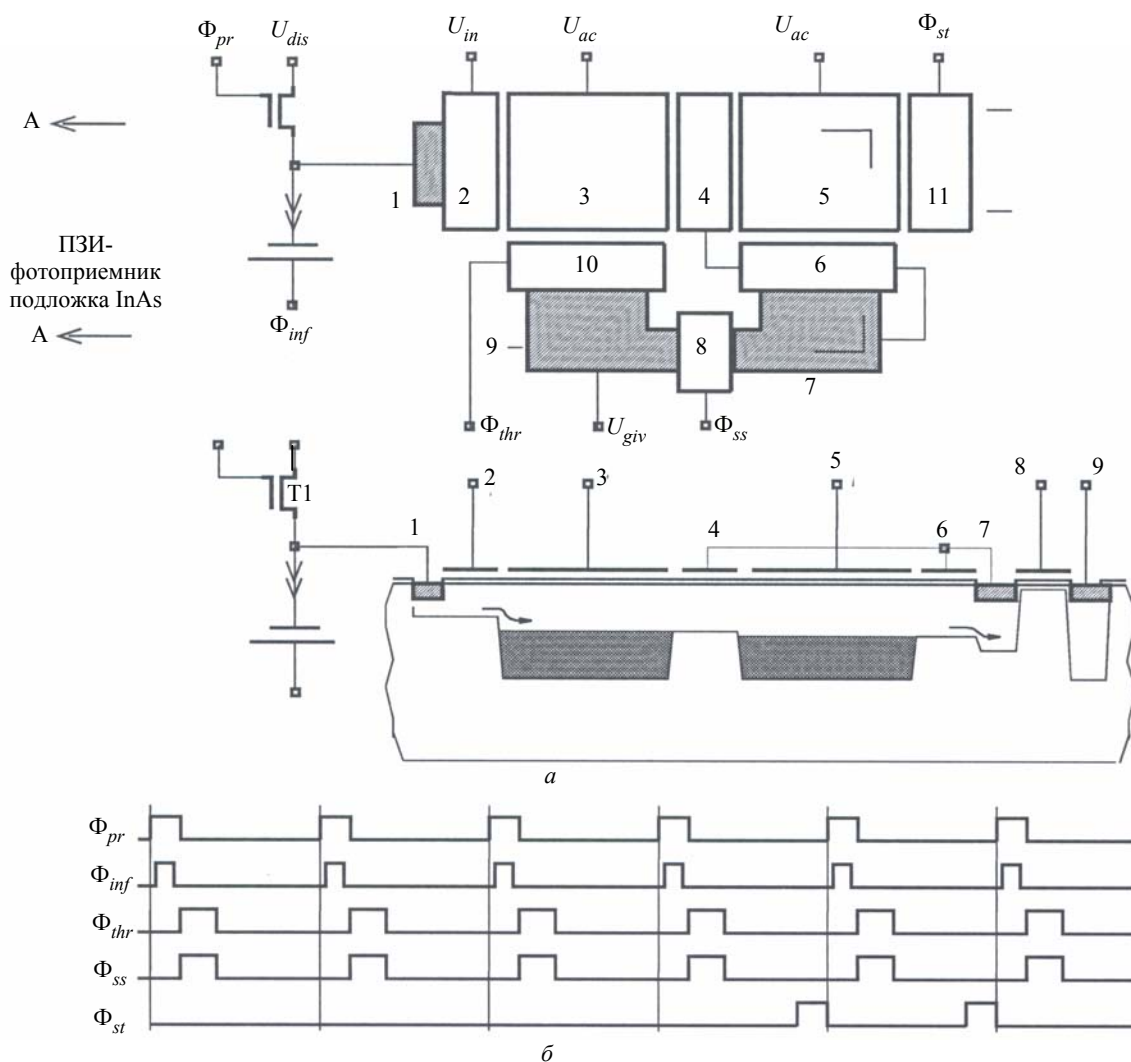


Рис. 1. Ячейка устройства считывания с прямой инъекцией заряда и устройством предпроцессорной обработки фотосигналов Φ :

а — принципиальная схема устройства; б — временные диаграммы управляющих напряжений

Устройство работает следующим образом. При подаче отпирающего импульса на затвор 8 (см. Φ_{ss} на рис. 1, *a*) на диффузионной области 7 и электрически связанных с ней затворах 4, 6 устанавливается напряжение U_{div} . После окончания отпирающего импульса на затворе 8 диффузионная область 7 и затворы 4, 6 изолируются от внешних источников напряжения (см. рис. 1, *б*). Поверхностный потенциал на диффузионной области 7 ниже, чем поверхностный потенциал под затворами 4, 6 на величину порогового напряжения под затвором 6. Заряд с ПЗИ-элемента по цепи: входная диффузионная область 1, входной затвор 2, затвор накопления 3, затвор 4, затвор накопления 5 и затвор 6 начинает поступать в диффузионную область 7, уменьшая напряжения на ней и затворах 4 и 6. Проводимость подложек ПЗИ-элемента и кремниевого устройства считывания должна быть одного типа, а поверхностный потенциал под затвором 5 по абсолютной величине — выше, поверхностных потенциалов под затворами 4 и 6.

По мере уменьшения напряжения на затворе 4 увеличивается зарядовая емкость затвора накопления 3, определяемая произведением его емкости на разность поверхностных потенциалов под затворами 3 и 4. С увеличением информационной емкости затвора накопления уменьшается количество заряда, ответвляющегося через затвор 6 в диффузионную область 7. С подачей отпирающего импульса на затвор 10 заряд из-под затвора накопления 3 вытягивается в стоковую диффузионную область 9. Время между отпирающими импульсами на затворе 10 определяет длительность ввода опорного заряда в устройство ввода. С окончанием отпирающего импульса на затворе 10 начинается новый цикл записи опорного заряда. После нескольких циклов записи емкость затвора накопления 3 становится достаточной, чтобы вместить весь заряд, вводимый в устройство ввода (УВ) за время между отпирающими импульсами, подаваемыми на затвор 10.

Уровень напряжения на диффузионной области 7 и электрически связанных с ней затворах 4, 6 несет информацию об уровне опорного "темнового" сигнала, индивидуально для каждого фотоприемного канала. В информационных циклах считывания (ИЦС) на затвор переноса 11 подается отпирающий импульс. При увеличении входного тока в ИЦС сначала заполнится яма под затвором накопления 3, зарядовая емкость которой определяется "темновым" сигналом фотоприемников. Избыток заряда, пропорциональный освещенности фотоприемников в ИЦС, минуя истоковую диффузионную область 7, через затвор переноса передается в ПЗС-регистр считывания.

На рис. 2, *a* приведена осциллограмма сигналов с выхода 64-элементного ИК ФПУ с InSb ПЗИ-фотоприемниками размером 85×100 мкм. В первом ИЦС считывается опорный "темновой" фотосигнал, обусловленный фоновым излучением и термогенерационными токами InSb ПЗИ-фотоприемников, находящихся в режиме неравновесного обеднения. Мощность фонового ИК-излучения P_f в спектральном диапазоне 1—5,4 мкм при апертуре 50° и температуре фона 300 К равнялась $1,8 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². Опорный сигнал формировался в течение 10—15 предварительных циклов считывания. Начиная с третьего ИЦС добавляется излучение от абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 500 К. Мощность излучения АЧТ в спектральном диапазоне 1—5,5 мкм составляла $1,5 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² (во время третьего ИЦС излучение от АЧТ частично перекрыто модулятором). На выходе ИК ФПУ формируются сигналы, пропорциональные разности фотосигналов в опорных и ИЦС.

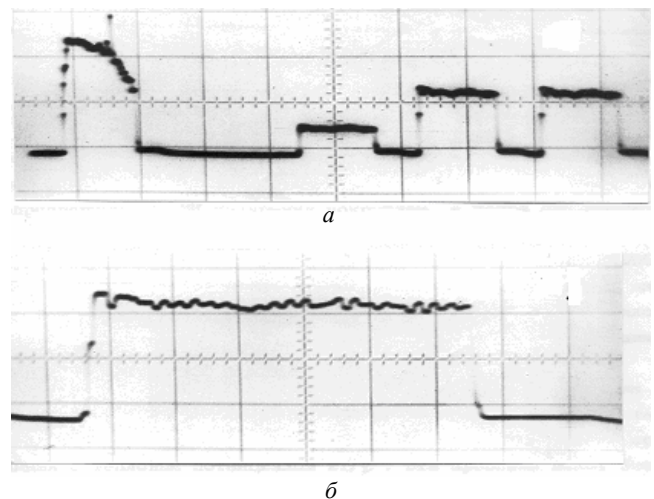


Рис. 2. Осциллограммы фотосигналов с выхода 64-элементного ИК ФПУ с ценной деления:

a — по оси $Y = 1$ В/деление, по оси $X = 100$ мкс/деление;
б — по оси $Y = 0,5$ В/деление, по оси $X = 20$ мкс/деление

Осциллограмма фотосигналов снята при времени накопления (T_{ac}) 40 мкс — рис. 2, *a*, на рис. 2, *б* показан ИЦС. Неоднородность фотосигналов в ИЦС $\sim 15\%$ (см. рис. 2, *б*), и наряду с разбросом фотоэлектрических характеристик фотоприемников, в частности квантовой эффективности, главным образом обусловлена недостатками технологии изготовления фотоприемников (разводка и затвор ПЗИ-элемента выполнены одним слоем металлизации) и низкой эффективностью ПЗС-регистра считывания.

Расчеты показывают, что при использовании доступной в настоящее время технологии изготовления фотоприемников однородность сигналов в ИЦС была бы не хуже 3—5%. В отличие от уст-

роиств считывания и устройств предпроцессорной обработки использование ПЗС-регистра не является принципиальным. Многовходной регистр считывания удобнее реализовать на основе динамического сдвигового регистра на МДП-транзисторах [7]. В этом случае для входных устройств использование двух, трех каскадов, зарядно-связанных МДП-затвором, не требует высокой эффективности переноса. В этом случае не требуется дорогостоящая технология изготовления ПЗС-приборов, и может быть применена стандартная МОП-технология.

Обнаружительная способность ИК ФПУ с устройствами предпроцессорной обработки сигналов и ПЗИ-фотоприемниками на InSb составила $1,4 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и соответствует обнаружительной способности в режиме ОФ при квантовой эффективности $\eta \sim 0,7$. Более 80 % фотоприемных каналов имели обнаружительную способность не хуже $1,2 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

На основе 64-элементного ИК ФПУ совместно с Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова был разработан динамический ИК-спектрометр. Сигнал с выхода ИК ФПУ поступал с частотой 1 МГц на 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Отметим, что без предпроцессорной обработки потребовался бы 14-разрядный АЦП, который на момент разработки ИК-спектрометра в 1982 г. был недоступен.

Адаптивные устройства предпроцессорной обработки фотосигналов

Вычитание постоянных во времени аддитивных, неинформационных компонент сигналов не решает многих проблем из-за временных изменений фотозлектрических параметров фотоприемни-

ков и передаточных характеристик устройств считывания. Это приводит к необходимости регулярно проводить калибровку ИК ФПУ, что существенно ограничивает возможности их использования в автономных системах и для исследования временных зависимостей. Для решения этих проблем необходимы адаптивные системы предпроцессорной обработки, обеспечивающие компенсацию временных изменений (дрейфа) всех компонентов ИК ФПУ. Необходимость адаптивных систем предпроцессорной обработки сигналов особенно важна для ИК ФПУ длинноволнового диапазона, так как с ростом длины волны уменьшается контрастность изображения. Это приводит к возрастанию требований к стабильности поддержания температуры фотоприемного модуля, временной стабильности электронного блока управления и т. д., которые не всегда могут быть выполнены и приводят к росту стоимости, энергопотребления, массогабаритных показателей тепловизионных систем в длинноволновом ИК-диапазоне.

Структурная схема многоканального процессора с адаптивными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов показана на рис. 3 [8].

Адаптивность устройств предпроцессорной обработки сигналов обеспечивается структурной схемой измерительного канала, введением дополнительной шины управления (шина коррекции 14) и схемой УВ с дополнительным корректирующим входом 3. После предварительного усиления 2 фотосигнал последовательно поступает по общей шине считывания 13 на устройство двойной коррелированной выборки измерительного канала ДКВ — 11, оцифровывается АЦП — 12 и подается на один из входов компаратора 7. На другой вход компаратора подается "опорный" код.

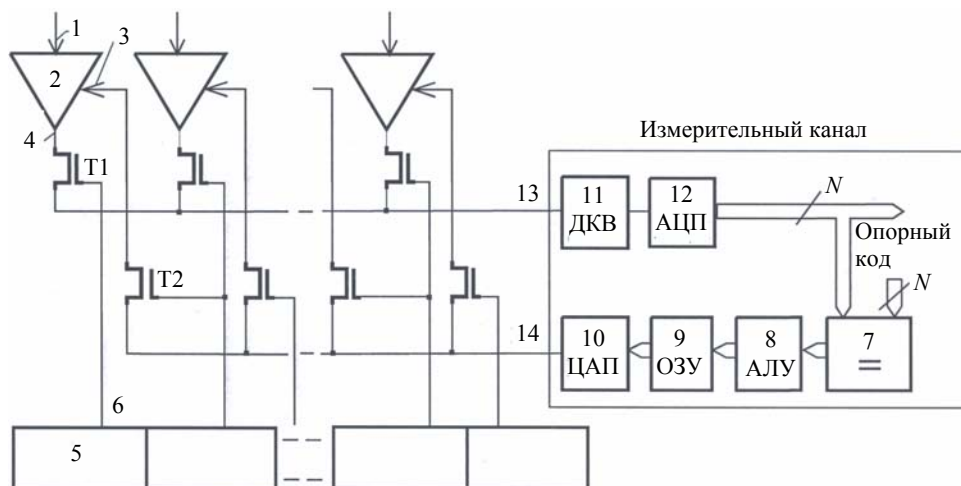


Рис. 3. Структурная схема многоканального процессора с адаптивными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов:

- 1 — вход УВ; 2 — УВ с корректирующим входом; 3 — корректирующий вход УВ; 4 — выход УВ; 5 — ячейка сдвигового регистра; 6 — выход ячейки сдвигового регистра; 7—12 — блоки измерительного канала; 7—12 — компаратор; 7 — ОЗУ; 8 — АЛУ; 9 — ЦАП; 10 — опорный код; 11 — ДКВ; 12 — АЦП; 13 — общая шина считывания; 14 — шина коррекции; T1, T2 — транзисторы

В зависимости от соотношения информационных сигналов и "опорного" кода на выходе арифметико-логического устройства (АЛУ) вырабатываются коды: +1 при $U_{sig} < U_{str}$; -1 при $U_{sig} > U_{str}$; 0 при $U_{sig} = U_{str}$. При коде +1 информация в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) разрядностью $N \times M$ (N — число каналов устройств считывания, M — разрядность цифроаналогового преобразователя — ЦАП) увеличивается на единицу младшего разряда ОЗУ, при коде -1 — уменьшается.

Таким образом, при считывании сигнала с $i+1$ входного устройства по шине коррекции 14 и далее через открытый транзистор Т2 происходит коррекция потенциала на корректирующем входе i -го устройства ввода 3. Эта информация сохраняется в аналоговом виде до следующего цикла считывания (коррекции). Максимум через 2^N цикла коррекции и при постоянном фотосигнале на всех затворах записи устанавливаются напряжения, обеспечивающие уровень сигналов на выходе, равные "опорному" коду.

Выбором "опорного" кода индивидуально для каждого фотоприемного канала многоэлементного ИК ФПУ можно регулировать потенциалы, поступающие на корректирующие входы усилителей кремниевого мультиплексора, и, следовательно, уровень вычитаемых из фотосигнала неинформационных компонент сигналов и, таким образом, повысить контраст изображения.

Таким образом, предлагаемое устройство предпроцессорной обработки обеспечивает вычитание индивидуально для каждого фотоприемного канала аддитивных неинформационных компонент фотосигналов и одновременно реализует функцию фильтра высоких частот. При этом граница полосы пропускания в области низких частот определяется режимом работы и параметрами измерительного канала. Скорость адаптации можно регулировать несколькими путями: изменением величины кванта ЦАП; изменением логики работы АЛУ, например, коррекцию можно проводить только в каждом N -м цикле считывания, где N — произвольное число. Можно изменять содержимое соответствующей ячейки ОЗУ не на квант младшего разряда, а на некоторое количество квантов, пропорциональных разнице сигнала и "опорного" кода и т. д.

Возможность изменения скорости адаптации и, следовательно, полосы пропускания фильтра высоких частот в режиме реального времени в пределах не менее 2—4 порядков величины позволит решить проблему временного дрейфа параметров ИК ФПУ.

Предлагаемая структура блока предпроцессорной обработки сигналов дает дополнительные возможности для решения задач идентификации и

распознавания образов. В ОЗУ за один цикл считывания можно ввести "образ" какого-либо объекта без потери информации об неинформационных компонентах сигналов. При появлении этого объекта в поле зрения ИК ФПУ на выходе получим разностный сигнал от реального объекта и введенного в ОЗУ "образа".

Пример реализации устройства, обеспечивающего адаптивную предпроцессорную обработку фотосигналов, приведен на рис. 4. Процессор содержит линейку устройств считывания, каждая ячейка которой состоит из УВ с прямой инжекцией (диффузионные области 1, 9, 10 и зарядосвязанные затворы 2—8), предусилителя (ПУ) (МДП-транзисторы Т1—Т5), а также динамического сдвигового регистра с общими шинами считывания 11 и коррекции 12. При подключении входного затвора 2 к источнику питания U_2 , а затворов накопления 3 и 6 — к U_3 на входной диффузионной области 1 и соединенным с ней фотоприемнике (например фотодиодом) устанавливается напряжение, определяемое поверхностным потенциалом под входным затвором. Фототок интегрируется под затвором накопления 3 (см. рис. 4, а). С подачей Φ_0 (запуск сдвигового регистра и открывание затворов переноса 4) заканчивается накопление фотосигналов. Часть сигнального заряда, в зависимости от потенциалов на затворах 5, перетекает одновременно во всех УВ через затвор записи 5 под вторые затворы накопления 6 (см. рис. 4, б). При подаче открывающего импульса на затвор сброса 8 Φ_{thr} оставшийся заряд под первым затвором накопления 3 стекает в источник питания. С окончанием импульса Φ_{thr} начинается новый цикл накопления. Сдвиговый регистр обеспечивает последовательное подключение устройств считывания на общий выход 11. При считывании информации с $i+1$ -й ячейки, в зависимости от соотношения информационных и опорного сигналов в предыдущем цикле считывания, по общей шине 12 происходит коррекция потенциала затвора записи 5 i -й ячейки устройства считывания.

Некоторым недостатком устройств приведенных на рис. 3, 4, является необходимость передавать по общей шине коррекции аналоговый уровень с ЦАП. Принципиальная схема устройства предпроцессорной обработки фотосигналов, приведенная на рис. 5, позволяет реализовать адаптивную коррекцию потенциалов на корректирующих входах устройств ввода по общей шине коррекции 13 двоичным кодом и значительно упростить структуру внешнего измерительного канала. Как видно из рис. 5, по сравнению с измерительным каналом, приведенным на рис. 3, в данной схеме исключаются ЦАП и ОЗУ. Корректирующий блок (КБ) 7 может быть реализован различными способами.

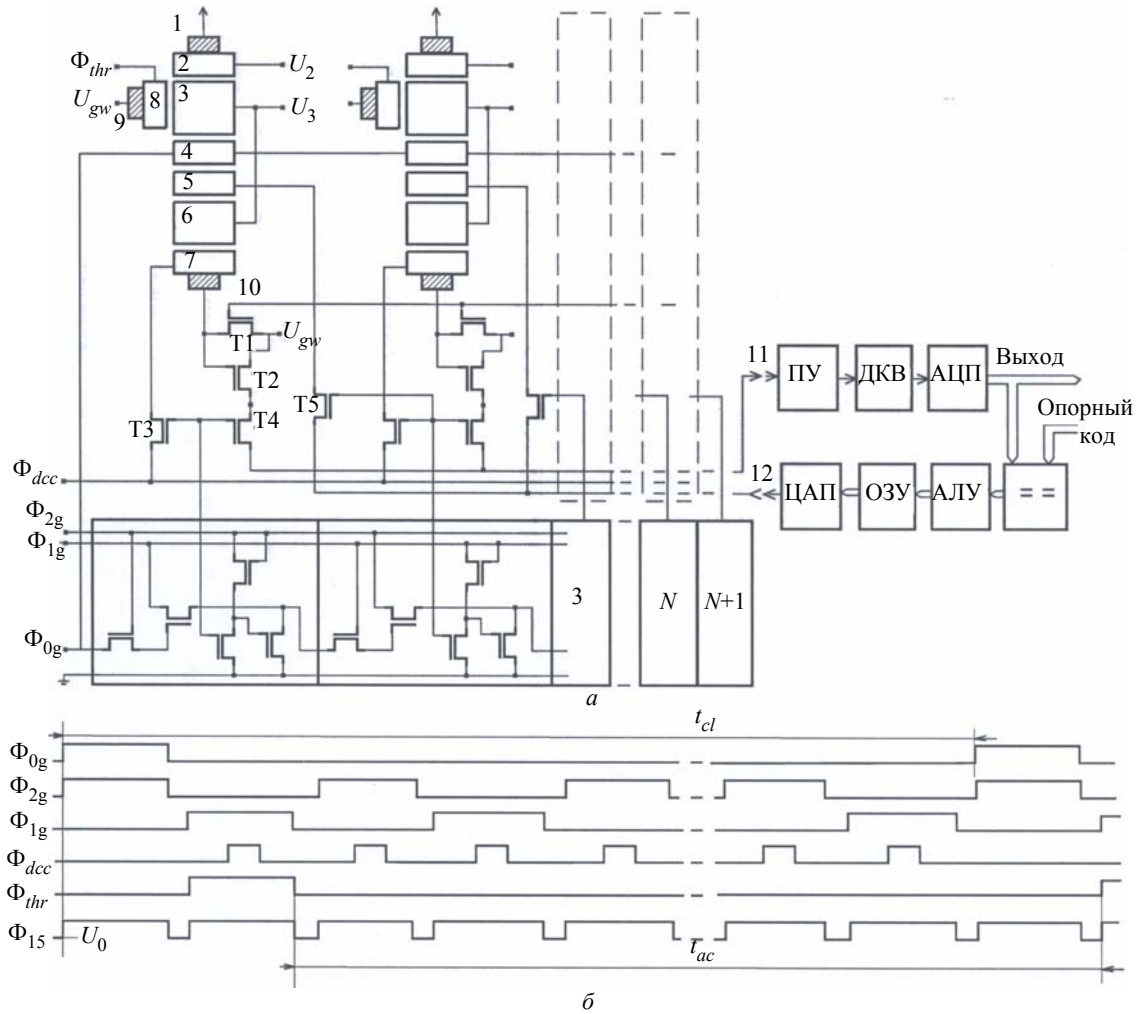


Рис. 4. Устройство считывания с интегрированными адаптивными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов Φ и с цифровой шиной коррекции:
 а — принципиальная схема; б — временные диаграммы управляющих напряжений:
 t_{cl} , t_{ac} — время считывания строки и накопления, соответственно

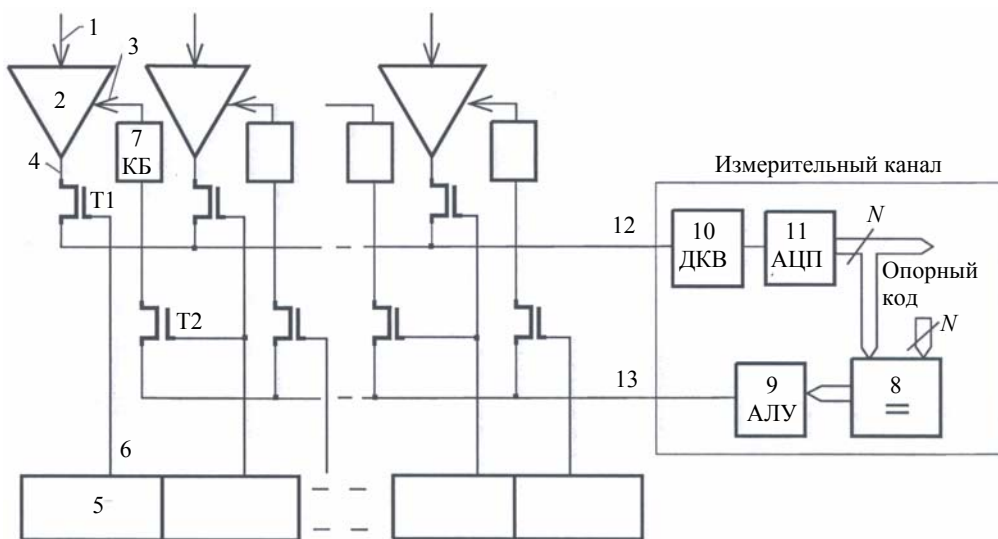


Рис. 5. Структурная схема адаптивного устройства предпроцессорной обработки фотосигналов с коррекцией двоичным кодом:
 1 — вход УВ; 2 — УВ с корректирующим входом; 3 — корректирующий вход УВ; 4 — выход УВ;
 5 — ячейка сдвигового регистра; 6 — выход ячейки сдвигового регистра; 7 — КБ;
 8—11 — блоки измерительного канала; 12 — общая шина считывания; 13 — шина коррекции

Один из возможных вариантов реализации КБ показан на рис. 6, а [9]. Считывание фотосигналов осуществляется аналогично процессору, приведенному на рис. 3. Отличие состоит в способах хранения и коррекции потенциалов затворов записи. Коррекция потенциалов последних осуществляется следующим образом. В зависимости от соотношения информационных сигналов и опорного кода, в данном случае при кодах -1 и 0 , на шину коррекции 12 с блока АЛУ подается напряжение U_0 , которое должно быть меньше потенциала на затворе записи. Коррекция (уменьшение) потенциала затвора записи 5 (см. рис. 6, а, б) происходит за счет токов утечки, разряжающих диффузионную область 13 за время между циклами считывания и, соответственно, уменьшающих потенциал затвора записи 5. Если сигнал меньше опорного (код $+1$), то необходимо повысить напряжение на затворе записи. Для этого достаточно

во время считывания сигнала с $i+1$ -й ячейки изменить потенциал i -го МДП-затвора 14 от U_0 до уровня U_1 , который должен быть больше, чем напряжение на затворе записи. Это достигается подачей импульсного напряжения Φ_{15} (временные диаграммы управляющих напряжений аналогичны показанным на рис. 4, б). При этом заряд из диффузионной области 13 затекает под МДП-затвор 14, а после окончания импульса Φ_{15} возвращается в диффузионную область 13. Часть этого заряда рекомбинирует на поверхностных состояниях под МДП-затвором 14 и, следовательно, в эту область не возвращается. При этом потенциал диффузионной области 13 и соединенного с ней затвора записи повышается на некоторое значение, величина которого определяется площадью МДП-затвора 14, напряжением U_0 и плотностью поверхностных состояний под затвором 14.

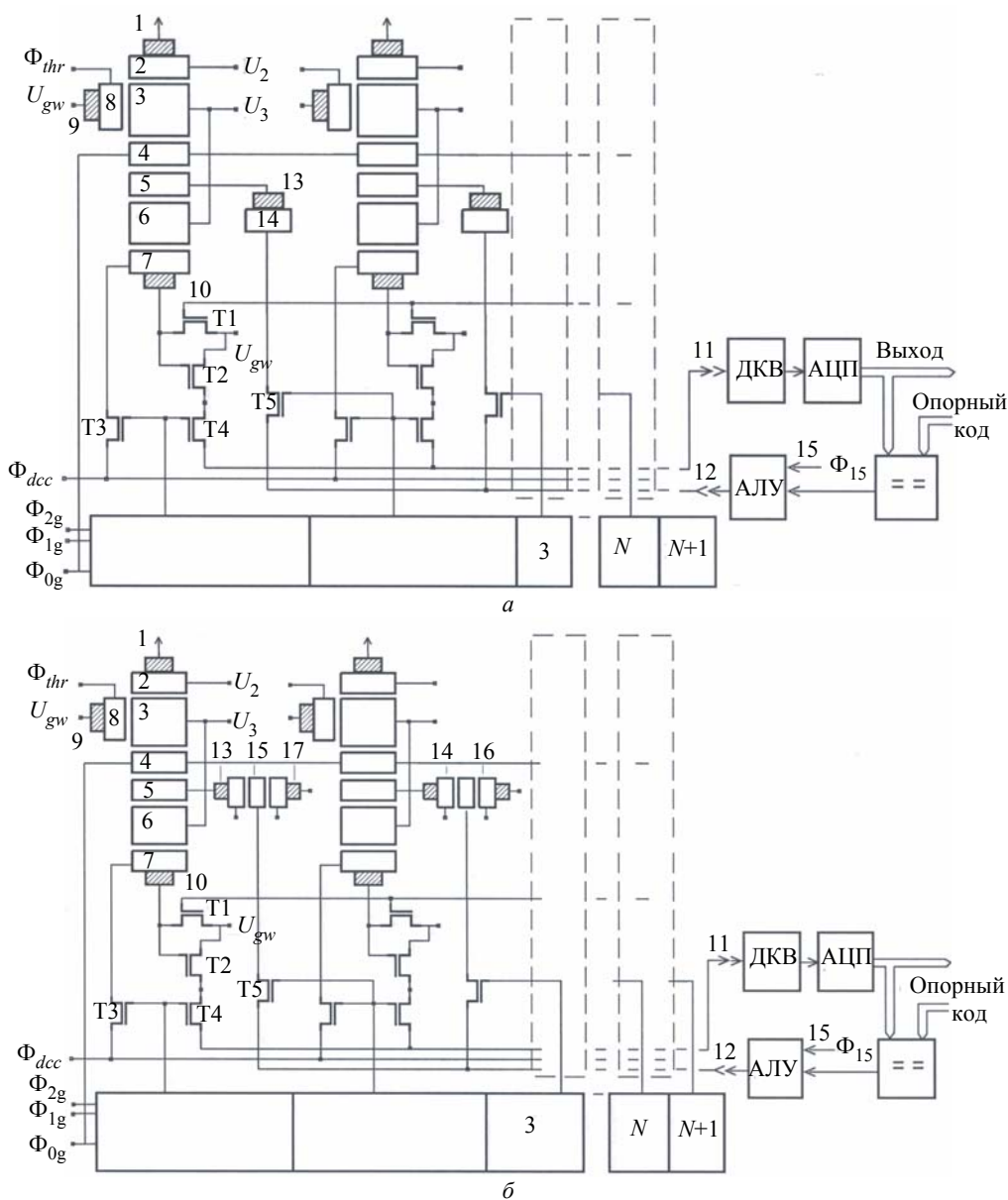


Рис. 6. Принципиальная схема устройства считывания с интегрированными адаптивными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов с коррекцией двоичным кодом:
 а — 1-й способ реализации КБ; б — 2-й способ

Другой способ коррекции потенциала на затворе записи 5 представлен на рис. 6, б [10]. Способ коррекции потенциала в этом случае близок к способу для устройства считывания на рис. 4. В зависимости от соотношения информационных сигналов и опорного кода, в данном случае при кодах +1, на выходе АЛУ формируется "лог 1". На шину коррекции 12 подается высокое напряжение U_0 (в нашем случае оно должно быть больше порогового напряжения под затвором 15). Коррекция (увеличение) потенциала затвора записи 5 производится следующим образом. С диффузионной области 17, подключенной к внешнему источнику питания, через зарядно-связанный затвор 16 под затвор 15 вводится заряд, величина которого определяется площадью затвора 15 и напряжением U_0 . Далее этот заряд через зарядно-связанный затвор 14 поступает на затвор записи 5, увеличивая его потенциал. При кодах 0 и -1 на выходе АЛУ формируется "лог 0". На шину коррекции 12 подается низкое напряжение. В этом случае коррекция (уменьшение) потенциала затвора записи 5 происходит за счет темновых токов утечки, разряжающих диффузионную область 13 за время между циклами считывания и, соответственно, уменьшающих потенциал затвора записи 5.

По принципиальным схемам, приведенным на рис. 4 и 6, а, были спроектированы и изготовлены 16-входные устройства считывания [11]. На рис. 7 приведены осциллограммы сигналов с выхода 16-входного процессора с цифровой шиной коррекции при отключенном корректирующем узле измерительного канала (КУИК) (компаратор отключен, а на затвор записи по шине коррекции 12 (см. рис. 6, б) подается постоянное напряжение). Заряд в УВ вводился через сопротивления $R = 2$ МОм. Как видно из осциллограммы на рис. 7, сигналы на выходе характеризуются большим разбросом, основной причиной которого является разброс пороговых напряжений под входными затворами 2 (см. рис. 4). На рис. 7, б приведена осциллограмма сигналов после включения КУИК. Уровни сигналов на выходе всех 16 УВ равны опорному напряжению.

Для процессора с аналоговой шиной коррекции при отключении КУИК темновые токи разряжают затворы записи (потенциалы на затворах записи $4 \sim 0$ В), и сигналы на шину считывания 11 не проходят. После включения корректирующего узла сигналы на выходе полностью аналогичны сигналам, приведенным на рис. 7. Скорость адаптации (в сторону понижения) потенциалов затворов записи так же, как и в случае с цифровой шиной коррекции, ограничивается темновыми токами утечки узла затвора записи, а скорость адаптации (в сторону повышения) — регулируется напряжением U_0 .

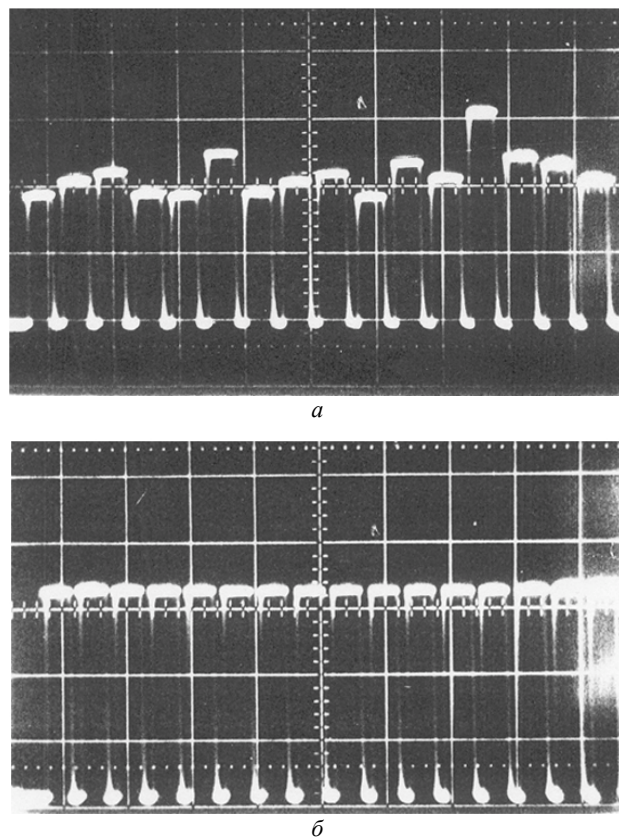


Рис. 7. Осциллограммы сигналов на выходе 16-входного процессора с ценной деления по оси Y — 0,5 В/деление, по оси X — 10 мкс/деление: а — с отключенным КУИК; б — после включения КУИК

Работа устройства предпроцессорной обработки сигналов основана на хорошо известном методе выравнивания потенциалов. Дополнительный уровень шума, вносимый устройствами предпроцессорной обработки сигналов, приведенный к узлу затвора записи 5, определяется $k \cdot T \cdot C$ -шумом. При типичных значениях емкостей первого затвора накопления $3 C_3$, равного $1,0—5,0$ пФ (см. рис. 4), и затвора записи $C_5 \sim 1$ пФ уровень $k \cdot T \cdot C$ -шума $U_{nk \cdot T \cdot C} \sim (2—4) \cdot 10^{-5}$ В, тогда как при вводимом в УВ фотосигнальном заряде $\sim 5—10$ пКл (типичная величина уровня информационных сигналов в среднем и дальнем ИК-диапазонах) уровень шума, обусловленный флуктуациями фонового излучения (режим ОФ), равен $U_{nlf} \sim 8 \cdot 10^{-4}$ В.

Следовательно, устройства предпроцессорной обработки, основанные на методе выравнивания потенциалов, не ограничивают предельной чувствительности ИК ФПУ на их основе, что подтверждается результатами экспериментального обследования тестовых 16-входных устройств. Динамический диапазон УВ после тракта предпроцессорной обработки выше 60 дБ, а в целом этот диапазон превышает 75 дБ.

Введение "опорного" уровня позволяет за счет увеличения разности поверхностных потенциалов

под первым затвором накопления 3 и затвором записи 5 (см. рис. 4) устранить один из основных недостатков метода выравнивания потенциалов — возрастание нелинейности передаточных характеристик при малых сигналах $\sim kT/q$ [12]. Величина этого потенциала зависит от величины "опорного" уровня, времени "слива" (длительности импульса Φ_0), геометрических размеров и емкостей затворов накопления 3 и 6. Все эти величины могут регулироваться в широких пределах в целях обеспечения максимальной линейности передаточных характеристик устройств предпроцессорной обработки и УВ в целом. Введение опорного уровня позволяет также решить проблему передачи сигналов как больше, так и меньше опорного.

Если для ФПУ видимого диапазона в большинстве случаев достаточно (8—10)-разрядных АЦП, то для ИК ФПУ, особенно в длинноволновом диапазоне, вследствие низкой контрастности изображения необходимо использовать 16- и более разрядных АЦП. Такие многоканальные АЦП до сих пор недоступны, поэтому для цифровой обработки сигналов необходима структура устройств предпроцессорной обработки сигналов, обеспечивающая при использовании доступных по разрядности и быстродействию многоканальных АЦП обработку фотосигналов с динамическим диапазоном более 80—90 дБ.

Структурная схема адаптивных устройств предпроцессорной обработки фотосигналов в цифровой форме

Совершенствование кремниевой технологии и успехи в реализации многовыходных АЦП с шагом 10—50 мкм позволили приступить к созданию устройств предпроцессорной обработки сигналов в цифровой форме [13, 14]. На рис. 8 приведена принципиальная схема кремниевого устройства считывания с интегрированными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов в цифровой форме [15].

Устройство работает следующим образом. Сигнал со столбцовой шины считывания после предварительного усиления (предусилитель 2 на рис. 8) оцифровывается АЦП и через ключи (транзисторы $T1.1-T1.K$, где K — разрядность АЦП) поступает в цифровой форме на общую шину считывания 11 на один из N -разрядных входов компаратора 3. Работа данного устройства считывания с блоком цифровой предпроцессорной обработки сигналов аналогична работе устройства, приведенного на рис. 1. Предложенная структура позволит при использовании K -разрядных АЦП и N -разрядных ЦАП реализовать адаптивную предпроцессорную обработку фотосигналов с разрядностью $(K+N)$, т. е. достаточно иметь (8—10)-разрядные АЦП, (10—12)-разрядные ЦАП, чтобы обеспечить обработку фотосигналов с 16—18-разрядами.

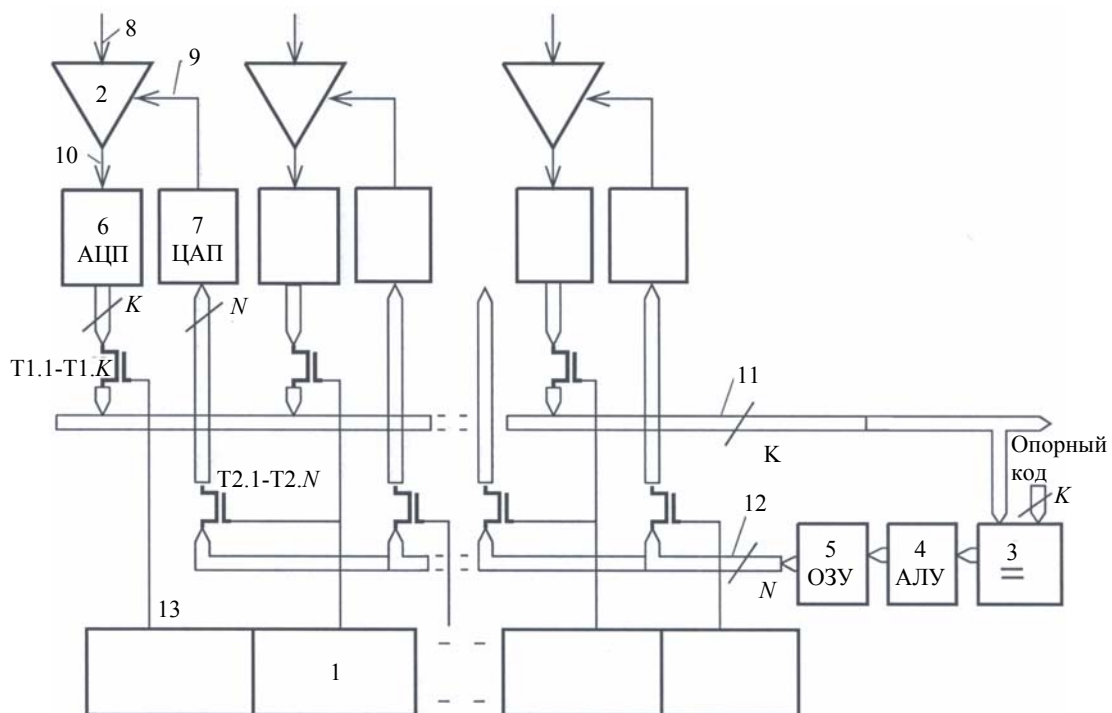


Рис. 8. Структурная схема устройства считывания с интегрированными адаптивными устройствами предпроцессорной обработки фотосигналов и цифровой обработкой сигналов:

1 — многовыходной коммутатор; 2 — предусилитель; 3 — компаратор; 4 — АЛУ; 5 — ОЗУ; 6 — АЦП; 7 — ЦАП; 8 — вход предусилителя; 9 — корректирующий вход предусилителя; 10 — аналоговый выход АЦП; 11 — общая шина считывания; 12 — шина коррекции; 13 — выход многовыходного коммутатора

Структурные схемы адаптивных устройств предпроцессорной обработки сигналов, приведенные на рис. 3 и 8, могут быть использованы как в линейчатых, так и в матричных ИК ФПУ. Отличие состоит только в организации ОЗУ в блоке измерительного канала. Для линейчатых ИК ФПУ достаточно иметь ОЗУ с организацией $N \times m$ ЦАП (где N — разрядность, m — число элементов в линейке). Для матричных ИК ФПУ формат ОЗУ должен быть $N \times m \times k$, где $m \times k$ — формат матрицы фотоприемных элементов. В ряде случаев для реализации адаптивных устройств предпроцессорной обработки сигналов матричные устройства считывания должны иметь специальную конфигурацию, как это показано на рис. 9 [16]. Каждая ячейка входных устройств дополнительно содержит затвор 5, на который последовательно подается потенциал с ЦАП, формирующий ИК-видеосигналы на каждую ячейку матрицы входных устройств. В этом случае отпадает необходимость в использовании более сложных предусилителей с дополнительным корректирующим входом, как это было

необходимо в устройствах, приведенных на рис. 3 и 8.

Заключение

Рассмотрены системные и схемотехнические решения построения адаптивных устройств предпроцессорной обработки сигналов в интегральном исполнении с устройствами считывания, которые раскрывают основную задачу формирования ИК-видеосигналов — вычитание аддитивных неинформационных компонент сигналов индивидуально для каждого фотоприемного канала. Показано, что предложенные схемотехнические решения адаптивных устройств предпроцессорной обработки не ограничивают чувствительности ИК ФПУ и позволят решить проблему временного дрейфа параметров ИК ФПУ, существенно снизить энергопотребление, стоимость, массогабаритные показатели тепловизионных систем на их основе.

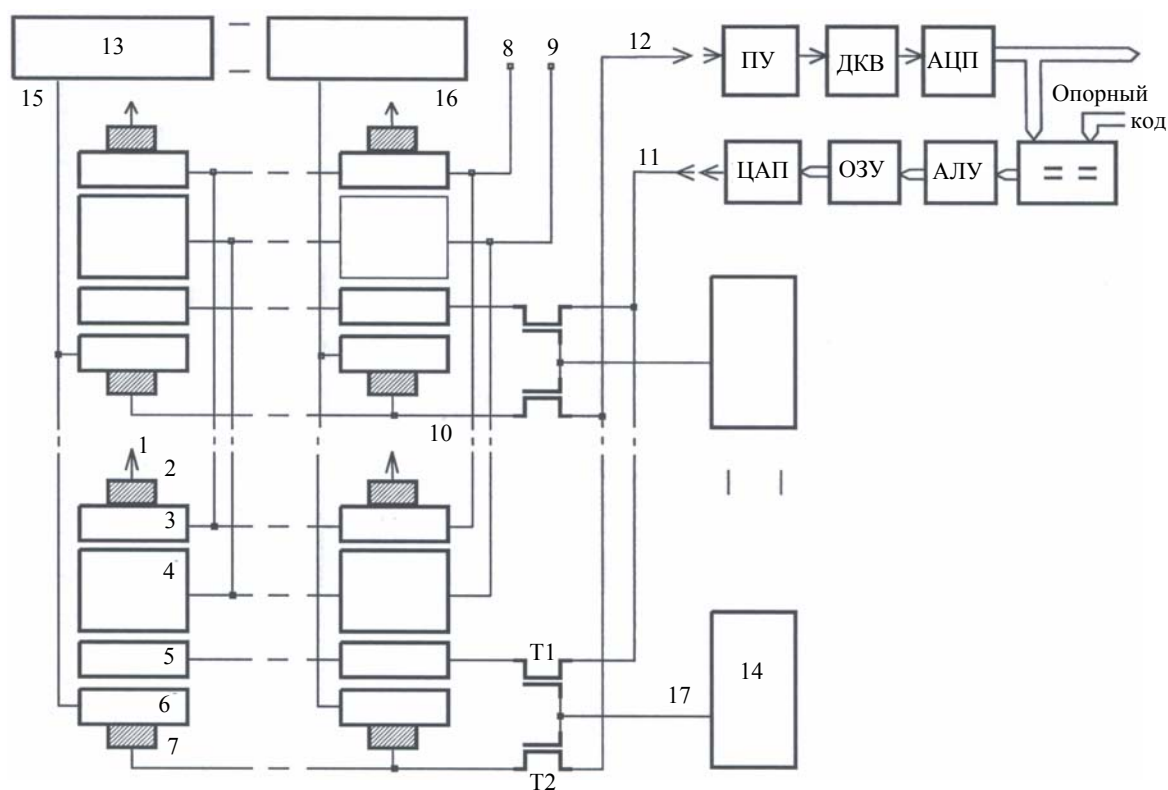


Рис. 9. Структурная схема устройств предпроцессорной обработки сигналов, интегрированных с устройствами считывания для двухмерных ФПУ:

- 1 — вход ячейки УВ; 2 — входная диффузионная область; 3 — входной затвор;
- 4 — затвор накопления; 5 — затвор коррекции; 6 — выходной затвор;
- 7 — выходная диффузионная область; 8, 9 — шины управления входными затворами 3 и затворами накопления 4; 10 — строчная шина считывания; 11 — шина коррекции;
- 12 — общая шина считывания; 13, 14 — ячейки строчного и столбцового сдвиговых регистров; 15, 16 — ячейки выхода сдвиговых регистров; 17 — шина

Л и т е р а т у р а

1. Milton A. F., Barone F. R., Kruer M. R. Influence of non-uniformity on infrared focal plane array//Optical engineering. 1985. V. 24. No. 5. P. 855—862.
2. Scriber D. A., Schuler J. M., Warren P. et al. Image Preprocessing for the infrared//SPIE. 2000. V. 4028. P. 222—232.
3. Рогольский А. Инфракрасные детекторы. — г. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 2003.
4. Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза, Д. М. Моргана. — М.: Энергоиздат, 1981.
5. Chen L., Hewitt M., et al. Overview of advances in high performance ROIC designs for use with IR FPAs//SPIE. 2000. V. 4028. P. 124—138.
6. Канакин В. А., Ли И. И. Прибор с зарядовой связью// А. с. 795343; приоритет от 11.04.1979; Бюл. № 20.
7. Кляус Х. И., Ли И. И., Черепов Е. И. Многоканальное устройство ввода на приборах с зарядовой связью: А. с. 1044204; приоритет от 18.03.1982; Бюл. № 17, 1995. С. 288.
8. Кляус Х. И., Крымский А. И., Ли И. И. и др. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1429855; приоритет от 11.07.1988; Бюл. № 23 от 20.08.95. С. 306.
9. Крымский А. И., Ли И. И., Ольшанецкая В. В. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1702829; приоритет от 11.07.1988; Бюл. № 23 от 23.08.95.
10. Крымский А. И., Ли И. И., Ольшанецкая В. В. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1776164; приоритет от 28.09.1988; Бюл. № 14 от 20.05.95.
11. Ли И. И., Попов М. В. Многоходовой процессор с адаптивными устройствами предпроцессорной обработки сигналов для многоэлементных датчиков//Автометрия. 1997. № 6.
12. Винецкий Ю. Р., Трищенко М. А. Потенциальное входное устройство прибора с зарядовой связью в режиме слабых сигналов//Радиотехника и электроника. 1981. № 4. С. 852—865.
13. Martijn H. H., Andersson J. Y. On-chip analog to digital conversion for cooled infrared detector arrays//SPIE. 2000. V. 4028. P. 183—191.
14. Zhou Z., Pain B., Panicacci R. et al. On-focal plane ADC: Recent progress at JPL//Ibid. 1996. V. 2745. P. 111—122.
15. Ли И. И. Многоканальное устройство считывания// Пат. 2282269; приоритет от 31.03.05; Бюл. № 23, 2006.
16. Ли И. И. Устройство ввода сигнала на приборах с зарядовой связью: А. с. 1625292; приоритет от 07.03.1989; Бюл. № 29 от 20.10.95. С. 335.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

Multichannel signal preprocessors for multielement IR FPA

I. I. Lee

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

Structure and circuit solutions for implementing adaptive multichannel analog and digital signal preprocessing circuits integrated with readout circuits are considered. Experimental results of investigating multichannel signal preprocessing readout circuits and IR FPA based on them are represented.

PACS: 07.57.Kp

УДК 621.383.3

Предельные параметры многоэлементных гибридных МДП ИК ФПУ на InAs и приборов на их основе

Г. Л. Курышев, И. И. Ли, В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев, В. М. Ефимов,
А. П. Ковчавцев, В. Г. Половинкин, А. С. Строганов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты экспериментального обследования различных линейчатых и матричных гибридных модулей и инфракрасных (ИК) систем (матричного термографа с температурным разрешением 4—8 мК, ИК-микроскопа с пространственным разрешением 3—4 мкм, быстродействующего спектрографа $\sim 10^4$ спектр/с) на основе InAs ПЗИ-приемников излучения. Достигнутые параметры для тепловизионных систем данного диапазона являются близкими к предельно достижимым.

PACS: 85.60.Gz