

С применением вышеописанных полимерных клеев марок УК-1, УК-1У, УК-1М и УК-1МУ, разработанных в ГНЦ ФГУП «НПО "Орион"», и отработанной технологии склейки и герметизации основных узлов фотоприемника ФЭМ на основе халькогенидов свинца были изготовлены, испытаны и сданы заказчику опытные образцы изделий.

Л и т е р а т у р а

1. Антипова М. А., Макарова Л. И. и др. Клеевая композиция: Пат. 2048485, 1995
2. Антипова М. А., Макарова Л. И. и др. Способ получения полисилоксануретанов: А. с. 294472, 1970.

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2006 г.

Technological aspects of assembling the photoelectronic array modules on basis of lead chalcogenide with application of polymeric materials

M. A. Antipova, V. D. Bochkov, S. E. Davydov, Yu., A. Kazarova
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Consideration is made to technological aspects of assembling the cooled photoelectronic array modules on basis of chalcogenide lead with application of polymeric glues. Account is taken of structures, chemical bases, operational characteristics of the chosen glues, and also technology of their application.

УДК 621.383.4/5

КМОП-мультиплексор с аналоговым ВЗН-режимом для гибридных ФПУ

Г. Х. Аветисян, Д. В. Бородин, Ю. В. Осипов
Государственное унитарное предприятие «НПП "Пульсар"», Москва, Россия

Предложены КМОП-ВЗН-схемы, позволяющие значительно уменьшить вклад паразитных емкостей в емкость интегрирования. Разработанные схемы предназначены для низкофоновых фотоприемных устройств (ФПУ), а также приборов с прецизионным скиммингом темновой и фоновой составляющих фототока детекторов, использующих емкости интегрирования порядка 0,1 пФ и менее. В ВЗН-схемах с емкостями интегрирования более единиц пикофарад возможен значительный выигрыш в площади микросхемы.

В системах регистрации линейно перемещающихся или сканируемых объектов часто используют фокальные процессоры, работающие в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) сигналов от отдельных детекторов фотоприемной (суб-)матрицы, расположенных вдоль линии перемещения изображения объекта. Режим ВЗН позволяет увеличить соотношение сигнал/шум, уменьшить вклад шума типа $1/f$, увеличить однородность выходного сигнала [1].

Имеются отечественные МОП- и КМОП-мультиплексоры форматов 288×4 [2] и 576×16 [3], позволяющие реализовать ВЗН-режим во внешних устройствах, в которых проводятся необходимые арифметические вычисления с выведенной из ФПУ и оцифрованной информацией. Внешнее ВЗН возможно и с матричными мультиплексорами, нап-

пример [4, 5] форматов 256×256 и 640×512, имеющими режим функционирования “snapshot”, когда начало и окончание интегрирования всех элементов матрицы едины. Однако при этом объем передаваемой от ФПУ информации избыточен в n раз, где n — число шагов (глубина) ВЗН.

Естественными являются схемы с ВЗН на основе ПЗС-структур, в которых скорость перемещения зарядового пакета задана равной скорости перемещения изображения объекта по фотоприемной матрице [6]. Однако ПЗС-схемы по сравнению с КМОП более требовательны к технологическому процессу, необходимы большее напряжение питания и управляющие импульсы определенной формы, что может привести к значительным помехам. Кроме того, в гибридных ФПУ с фотоприемными матрицами на основе узкозонных материалов,

стыкуемых с кремниевой микросхемой посредством флип-чип-сборки на индиевых столбах, велика вероятность появления отдельных дефектных чувствительных элементов. Эти дефектные элементы в ВЗН-схемах необходимо исключать (деселектировать), что крайне затруднительно в ПЗС-схемах. Деселекция возможна в смешанных ПЗС-КМОП-схемах [7], являющихся по существу переходными от ПЗС-ВЗН к КМОП-ВЗН-схемам.

В КМОП-ВЗН-схемах в отличие от ПЗС-переноса зарядового пакета как такового нет, и суммируемый заряд формируется в некоторой геометрически фиксированной точке микросхемы, где расположена интегрирующая емкость, а необходимые подключения детекторов и синхронизация осуществляются набором ключей под управлением цифровой части микросхемы [8, 9]. К каждой такой емкости непосредственно или в определенные моменты времени оказываются подключенными $n+1$ аналоговые КМОП-ключи, суммарная паразитная емкость которых, как правило, превышает $(n+1) \cdot 0,01$ пФ. С учетом емкости межсоединений для $n > 4$ паразитная емкость узла интегрирования может превышать 0,1 пФ. В ФПУ с детекторами, имеющими большой темновой и фоновый токи (десятки наноампер), когда суммирующие емкости составляют единицы и более пикофарад, паразитная емкость этих ключей и шин коммутации незначительна. В низкофоновых приборах, а также в приборах с прецизионным скиммингом (т. е. в приборах, в которых из тока каждого детектора до интегрирования удаляется его темновая и фоновая составляющие [8]) накопительную емкость можно и необходимо уменьшить до 0,1 пФ и менее. Значительная емкость истоков транзисторов и шин ограничивает минимальную емкость интегрирования, а значит, максимальный коэффициент преобразования заряда в напряжение, т. е. собственный шум микросхемы более существенно ограничивает глубину ВЗН.

В таких и подобных схемах (например, на "пожарных цепочках") есть одна общая черта, а именно заряд, который накапливается в яме (для ПЗС-схем) или конденсаторе (для КМОП-схем) на определенном шаге ВЗН, все дальнейшее время, вплоть до вывода из схемы, по существу, лишь хранится в ней. В каждом канале достаточно иметь емкость, которая бы не переполнялась фотозарядом не за n шагов ВЗН, а лишь за один шаг. В конце каждого шага информация сохраняется (например, в виде напряжения или части накопленного заряда) на дополнительных устройствах в канале (УВХ), а сама емкость сбрасывается в исходное состояние. Если в какой-либо схеме даже такая емкость должна составлять пикофарады (т. е. значительно превышать как паразитные ем-

кости, так и емкости выборок), то устройством выборки может быть небольшая емкость выборки, которая на время интегрирования подключается посредством аналогового ключа к емкости интегрирования. При малой емкости интегрирования она должна отделяться от емкости выборки повторителем напряжения с малой входной емкостью.

Один из вариантов такой КМОП-ВЗН-схемы для $n = 4$ представлен на рис. 1 [10], где A — входные узлы, содержащие входной буфер A_b , C_{int} — емкость интегрирования, K_{res} — ключ ее сброса; B — повторитель напряжения; K — блок ключей коммутации; $n+1$ — блоки выборки C , каждый из которых содержит n ключей выборок K_s , n — емкостей выборок C_{sample} и n выходных ключей K_{out} . Диаграммы управления схемой (импульсы $T_1—T_5$, T_{reset}) представлены на рис. 2.

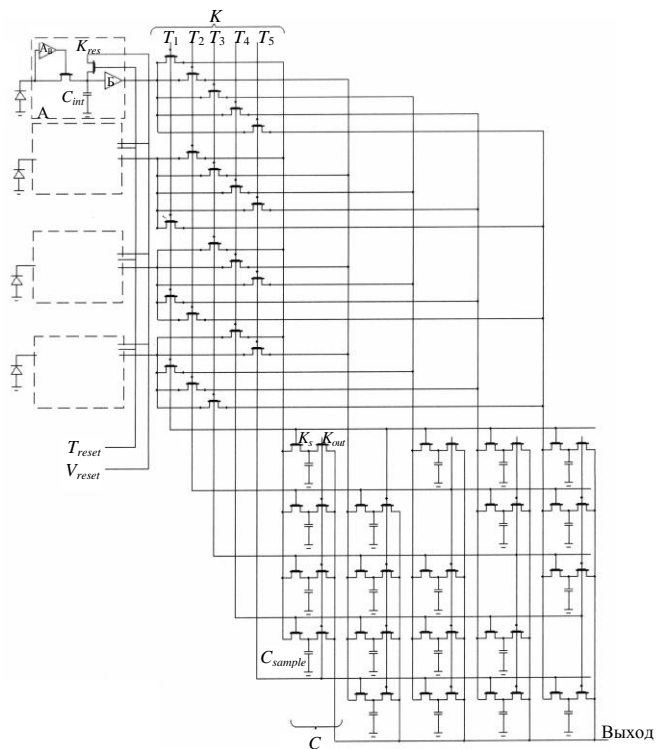


Рис. 1. Вариант КМОП-ВЗН-схемы глубины $n = 4$

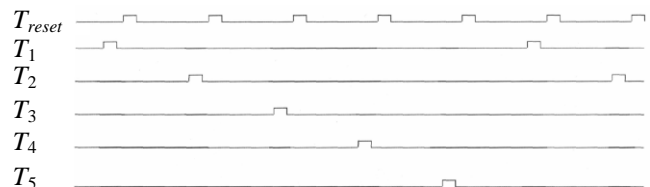


Рис. 2. Диаграммы управления схемой

Из сравнения представленной схемы с известной [8] видно, что каждая емкость как бы разделена на $n+1$ частей, одна из которых (C_{int}) вынесена как можно ближе к детектору, а остальные n (C_{sample}) изменены до минимальных значений, при которых

обеспечивается их достаточная идентичность, допустимая коммутационная помеха, малость паразитной емкости выходной шины "out" по сравнению с суммарной емкостью n емкостей выборок и др. Отношение сигнал/шум $(S/N)_{TDI}$ пропорционально \sqrt{n} , что видно из следующих выражений:

$$(S/N)_{TDI} = U_s / U_{noise};$$

$$U_s = \frac{I_s T_{int}}{C_{int}} K C_{sample} \frac{n}{nC_{sample}} = \frac{I_s T_{int}}{C_{int}} K;$$

$$U_{noise} = \frac{\sqrt{2eI_s} \frac{1}{2T_{int}}}{C_{int}} T_{int} K C_{sample} \times \frac{\sqrt{n}}{nC_{sample}} = \frac{I_{noise} T_{int}}{C_{int}} K \frac{1}{\sqrt{n}};$$

$$(S/N)_{TDI} = \frac{U_s}{U_{noise}} = \frac{I_s}{I_{noise}} \sqrt{n},$$

где I_s и I_{noise} — ток детектора и его шум при времени интегрирования T_{int} , равном длительности одного шага ВЗН;

K — коэффициент передачи буфера Б.

В уравнениях учтено, что после замыкания ключей K_{out} емкости выборок включаются параллельно, и их суммарная емкость составляет nC_{sample} , информационный заряд складывается (увеличивается в n раз), а шумовой заряд выборок не коррелирован и увеличивается в \sqrt{n} раз.

Каждый узел микросхемы производит некоторый шум, который существенно ограничивает параметры ФПУ, в частности, глубину ВЗН. Разделим все шумы микросхемы на шум входных узлов U_{n1} (до каскадов ВЗН), мощность которых складывается с мощностью шумов детекторов, и шум выходных узлов U_{n2} (после каскадов ВЗН). С учетом шумов микросхемы отношение $(S/N)_{TDI}$ принимает следующий вид:

$$(S/N)_{TDI} = \frac{U_s}{U_{noise}} = \frac{I_s}{I_{noise}} \sqrt{n} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{U_{n1}}{U_{noiseD}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{n}U_{n2}}{U_{noiseD}}\right)^2}},$$

$$\text{где } U_{noise} = \sqrt{\frac{U_{noiseD}^2 + U_{n1}^2 + U_{n2}^2}{n}}, \quad U_{noiseD} = \frac{I_{noise} T_{int}}{C_{int}} K.$$

Допустим, что шум микросхемы составляет 400 мкВ, поскольку именно такой шум был получен для ВЗН-схемы, изготовленной по КМОП-технологии (0,6 мкм) [11]. При этом предположим, что мощность этого шума делится поровну между

входными и выходными узлами (по 280 мкВ). Зависимость $(S/N)_{TDI}$ от глубины ВЗН (в соответствии с вышеприведенным уравнением) для разных типов ФПУ при сделанных предположениях показана на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 приведена также прямая 1, соответствующая случаю пренебрежимо малых шумов микросхемы ($U_{n1}, U_{n2} \ll U_{noiseD}$).

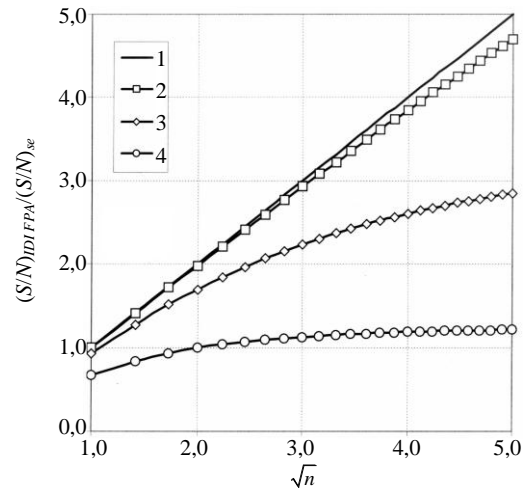


Рис. 3. Зависимости отношения сигнал/шум от числа n шагов ВЗН:

1 — шум микросхемы пренебрежимо мал; 2 — шум микросхемы $U_{n1} = U_{n2} = 280$ мкВ, низкофонный детектор, емкость интегрирования 0,03 пФ; 3 — то же, что и 2, но присутствует паразитная емкость 0,09 пФ; 4 — тот же шум микросхемы, ток детектора 100 нА, емкость интегрирования 5 пФ

Кривая 2 соответствует низкофоновому приемнику (например, на основе фотодиодов InSb с толстой базой, $I_s = 30$ пА, $T_{int} = 3$ мс), с емкостью интегрирования $C_{int} = 0,03$ пФ, а кривая 3 — при наличии дополнительной паразитной емкости 0,09 пФ. Кривая 4 относится к случаю детекторов с большими токами (например, фотодиоды КРТ, диапазон 8—12 мкм, $I_s = 100$ нА, $T_{int} = 0,2$ мс, $C_{int} = 5$ пФ).

Видно, что значительное улучшение отношения $(S/N)_{TDI}$ получаем при малых токах детектора (малых емкостях интегрирования), поскольку именно в этом случае обеспечивается значительный коэффициент преобразования заряда в напряжение на входе микросхемы, а вклад от шума ее последующих каскадов оказывается мал. Для ФПУ с большими емкостями C_{int} (см. кривую 4) эффект как от устранения паразитной емкости, так и от увеличения глубины ВЗН более чем до $n = 4—10$ оказывается незначительным. Прогресс возможен при существенном уменьшении шумов микросхемы и (или) увеличении коэффициента преобразования заряда в напряжение, для чего необходимо из токов детекторов удалить их темновую и фоновую составляющие до интегрирования, например с использованием схем, приведенных в работах [8, 12, 13].

Другим ограничивающим фактором увеличения глубины ВЗН является площадь микросхемы. Действительно, суммарная емкость всех емкостей интегрирования в каждом канале для схемы [8] составляет $C_8 = nC_{int}(n+1)$, а для $C_{int} = 5$ пФ, удельной емкости $2 \cdot 10^{-3}$ пФ/мкм², $n = 10$, ширины канала 50 мкм уже дает линейный размер емкостей (минимальный размер микросхемы) в направлении сканирования 5,5 мм. Для схемы по рис. 1 суммарная емкость составляет $C_1 = nC_{int} + n(n+1) C_{sample}$. Отношение суммарных емкостей равно

$$C_1 / C_8 = C_{sample} / C_{int} + 1 / (n+1).$$

Для $C_{sample} / C_{int} = 0,1$ и $n = 10$ схема (см. рис. 1) дает пятикратное уменьшение суммарной площади емкостей (с учетом площади ключей K_s и K_{out} , уменьшение площади 2—4-кратное в зависимости от используемой технологии).

Возможны и другие варианты схемы с аналоговым ВЗН, основанные на принципе, изложенном в схеме на рис. 4. В ней (по сравнению со схемой

дов связан с обрывом, закороткой и избыточным шумом. При отработанной технологии можно надеяться, что избыточный шум обусловлен избыточным током детектора. Избыточный ток одного детектора приведет к насыщению только одной емкости выборки C_{sample} . А поскольку произойдет насыщение, то шум будет незначителен. Остальные емкости выборки сохраняют полезную информацию и можно ожидать, что на выходе канала произойдет лишь изменение среднего уровня выходного сигнала при сохранении его работоспособности. Тем самым, например, неожиданно возникший дефект одного детектора не приведет к выходу из строя всего канала, а может потребоваться лишь перекалибровка. И только в случае избыточного шума детектора при “нормальном” токе потребуются деселекция.

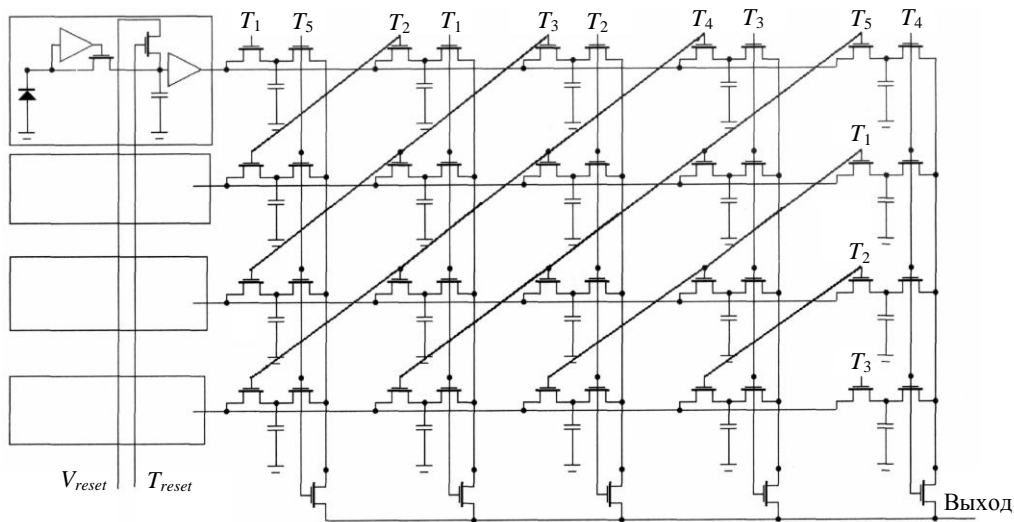


Рис. 4. Вариант КМОП-ВЗН-схемы

на рис. 1) отсутствует блок коммутации K , изменены диаграммы управления ключами выборок K_s , добавлен ключ K_c , уменьшающий паразитную емкость выходной шины. Усложнение диаграмм управления и добавление одного УВХ на выход схемы позволяют сократить число блоков выборки с $(n+1)$ до n . Выбор схемы определяется соотношением технологических возможностей и требований к микросхеме.

Как отмечалось, КМОП-ВЗН-схемы дают возможность проводить деселекцию бракованных детекторов. Узел деселекции легко встраивается в схемы и на рис. 1, и на рис. 4. Однако в ряде слу-

чаев в предложенных схемах деселекция может и не потребоваться. Действительно, брак фотодио-

Л и т е р а т у р а

1. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992. — 400 с.
2. Акимов В. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Лисейкин В. П., Сагинов Л. Д., Соляков В. Н., Шукин С. В., Хромов С. С. Кремниевые мультиплексоры формата 4x288 для многорядных ИК-приемников// Прикладная физика. 2003. № 2. С. 83, 84.
3. Аветисян Г. Х., Бородин Д. В., Брашеван Ю. В., Завадский Ю. И., Осипов Ю. В., Крошин В. М., Чернокожин В. В. Субматричный КМОП-мультиплексор формата 576x16 для

гибридных ФПУ// XIX МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2006.

4. *Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* КМОП-микросхемы первичного преобразования для многоэлементных гибридных фотоприемных устройств// Электроника, микро- и нанoeлектроника: Сб. науч. тр./ Под ред. В. Я. Стенина. — М.: МИФИ, 2005. С. 21—26.

5. *Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* Универсальный матричный криогенный КМОП-мультиплексор формата 640x512 для гибридных фотоприемных устройств// Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Матер. II науч.-техн. конф. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2005. С. 100, 101.

6. *Кузнецов Ю. А., Шилин В. А.* Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1988. — 160 с.

7. *Деркач Ю. П., Рева В. П., Сизов Ф. Ф.* "Смешанная" концепция построения схем считывания для фокальных процессоров с ВЗН и деселекцией элементов// Прикладная физика. 2003. № 3. С. 90—96.

8. *Kim B., Yoon N., Lee H.C., Kim C-K.* Novel Concept of TDI readout circuit for LWIR detector// Proc. SPIE. 2000. V. 4028. P. 166—172.

9. *Лиш И. И.* Устройство считывания с временной задержкой и накоплением сигналов с многоэлементных ИК-фотоприемников: Пат. 2236064 С1 RU.

10. *Аветисян Г. Х., Бородин Д. В., Осипов Ю. В.* Устройство считывания с временной задержкой и накоплением сигналов с многоэлементных ИК-фотоприемников// Положительное решение по заявке на изобретение № 2006127266/28(029630) от 28.07.2006 г.

11. *Деркач Ю. П., Коринец С. В., Рева В. П., Сизов Ф. Ф.* Схема считывания информации для ИК-матриц с ВЗН формата 576x6// XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2004.

12. *Yang G., Sun C., Shaw T., Wrigley C., Peddada P., Blazejewski E., Pain B.* A high dynamic-range, low-noise focal plane readout for VLWIR applications implemented with current mode background subtraction// Proc. SPIE. 1998. V. 3360. P. 42—51.

13. *Бородин Д. В., Бочков В. Д., Осипов Ю. В., Храпунов М. Л.* 128-канальная микросхема первичного преобразования с цифровой коррекцией передаточной функции в каждом канале// XVIII МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М., Россия, 2004.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.

CMOS multiplexer with analogue TDI mode for hybrid FPA

G. H. Avetisyan, D. V. Borodin, Yu. V. Osipov

Science & Production Enterprise "Pulsar", Moscow, Russia

CMOS IC designed for low background TDI FPA and also devices with precision skimming of dark and background component of photocurrent (integrating capacitance 0,1 pF and less). In TDI IC with integrating capacitances more than units of picofarads are possible considerable reduction of IC area.

УДК 537.311.33

Гистерезис вольт-фарадных характеристик структур на $p\text{-Cd}_{0,27}\text{Hg}_{0,73}\text{Te}$ с широкозонным варизонным слоем на поверхности

В. В. Васильев, Ю. П. Машуков

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук
г. Новосибирск, Россия

Обнаружено, что вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структуры на основе $p\text{-Cd}_{0,27}\text{Hg}_{0,73}\text{Te}$ демонстрируют характерный гистерезис: при прямом ходе развертки (от минуса к плюсу) ВФХ близка к обычной высокочастотной, а при обратном ходе имеется протяженная полочка, на которой емкость области пространственного заряда (ОПЗ) становится примерно в два раза больше. Для объяснения хода ВФХ рассматриваются особенности зонной структуры варизонного полупроводника.

Слои полупроводниковых твердых растворов кадмий—ртуть—теллура (КРТ), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и имеющие на своих границах варизонные слои, в

настоящее время являются одним из основных материалов для изготовления ИК-фотоприемников [1, 2].