

УДК 621.383.4/5: 621.375

ОХЛАЖДАЕМЫЕ МОП-МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ ДЛЯ ИК-МАТРИЦ “СМОТЯЩЕГО” ТИПА

*В. М. Акимов, К. О. Болтарь, В. П. Лисейкин, Е. А. Климанов,
А. А. Тимофеев, С. В. Щукин*

Государственное унитарное предприятие “Научно-производственное объединение “Орион”,
Москва, Россия

Представлены результаты разработок и исследований кремниевых матричных МОП-мультиплексоров различных типов. Рассмотрены направления дальнейших работ.

На протяжении нескольких лет проявляется повышенный интерес к созданию матричных ИК фотоприемных устройств различного формата, предназначенных для считывания тепловизионной информации. Они заменили ФПУ предыдущих поколений с громоздкими оптико-механическими системами развертки двумерного изображения на плоскость дискретных или линейных ИК-фотоприемников. Реализация программы создания матричных ИК ФПУ позволит получить в ближайшее время приборы с высокими пространственными и температурными разрешениями, которые найдут широкое применение в различных областях науки, техники и народного хозяйства.

Кремниевый мультиплексор является важной составной частью охлаждаемого гибридного ИК фотоприемного устройства, осуществляющего вывод видеосигнала с матрицы фотодиодов. Электрическое и механическое соединение двух кристаллов мультиплексора и фотоприемников производится методом перевернутого монтажа с помощью индиевых столбиков, формируемых на лицевой поверхности каждого кристалла.

Для коммутации информационного сигнала с матрицы ИК-фотодиодов используются в основном два типа охлаждаемых мультиплексоров: на основе ПЗС и МОП транзисторных ключей. В настоящей работе рассмотрены мультиплексоры на основе кремниевых МОП-транзисторных ключей, объединенных мультиплексоры на основе кремниевых МОП транзисторных ключей, объединенных в двухкоординатную матрицу. Они имеют ряд преимуществ перед ПЗС, а именно: выше коэффициент заполнения, ниже величины управляющих напряжений, больше динамический диапазон, выше выход годных, более однородные электрические характеристики при $T = 77$ К, меньшие энергозатраты и, соответственно, тепловыделение, связанное с транспортировкой накопленных зарядов к выходным устройствам [1, 2]. Кроме того, в тепловизионных приборах, работающих в условиях сильного фона (на длинах волн больше 3—5 мкм) существенным преимуществом схем с МОП-ключами является более высокая зарядовая емкость МОП-конденсатора по сравнению с ПЗС-ячейкой, что связано с большей допустимой напряженностью электрического поля в диэлектрике по сравнению с полупроводником. В тоже время в условиях сильного фона сравнительно большая емкость сигнальной шины в МОП-схемах не является препятствием для реализации режима ограничения обнаружительной способности фоном.

Базой для создания крупноформатных матриц МОП-мультиплексоров послужили несколько вариантов разработок малоформатных матриц размером 32x32, на основе которых были выбраны конструкция и технология мультиплексора, разработана базовая технология изготовления кристаллов, отработаны методы контроля параметров и разбраковки.

Конструкция

В зависимости от назначения мультиплексоры формата 32x32 содержали либо только матрицу ключей, либо матрицу ключей и управляющий динамический регистр сдвига. Шаг элементов в матрице составил 150 и 70 мкм, соответственно. Развитием этой программы стала разработка более совершенного МОП-мультиплексора формата 32x32 с шагом 70 мкм, с периферийными схемами. Кристалл МОП-мультиплексора включает в себя следующие функционально связанные блоки:

матрица n -канальных МОП транзисторных ключей формата 32x32, организованная по двухкоординатной схеме, для коммутации фотодиодов КРТ;

динамический регистр сдвига, обеспечивающий формирование последовательности управляющих импульсов требуемой амплитуды и длительности, подаваемой непосредственно на 32 шины затворов матрицы;

линейка считывания на основе МОП транзисторных ключей, последовательно подключающая 32 шины стоков к общей шине видеосигнала;

динамический регистр сдвига на 34 канала (первый из которых буферный), управляющий линейкой считывания;

предварительный усилитель видеосигнала (или истоковой повторитель) на МОП-транзисторе с широким каналом.

Разработаны два варианта принципиальной схемы ячейки матрицы.

В первом варианте ячейка содержит один МОП транзисторный ключ, исток которого через индиевый столбик соединен с n -областью диода КРТ. При этом накоплении генерированного излучением заряда производится на собственной емкости фотодиода. Во втором варианте конструкции в ячейку матрицы встроены МОП-конденсатор, одна обкладка которого соединена с истоком, а вторая — с подложкой, т. е. конденсатор подключен параллельно собственной емкости фотодиода.

Следующим шагом в создании МОП-мультиплексоров была разработка МОП-мультиплексора формата 64x64, предназначенного для считывания сигнала с матрицы диодов Шоттки на основе PtSi. Кристалл содержал матрицу ключей, управляющий и считывающий регистры сдвига и линейку вывода видеосигнала с усилительным МОП-транзистором на выходе.

Развитием программы построения МОП-мультиплексоров стали разработки среднеформатных матричных ИС размером 128x128 элементов с шагом 70 и 40 мкм. МОП-мультиплексор с шагом 70 мкм содержал матрицу ключей формата 128x128 и 128-разрядный управляющий регистр сдвига. Выходы каналов регистра непосредственно подсоединены к шинам затворов матрицы ключей. Вся схемотехника мультиплексора выполнена на МОП-транзисторах с n -каналом, так как матрица ключей подключается к матрице p/n^+ -фотодиодов, сформированных на подложке p -типа. Каждая ячейка матрицы содержит один МОП транзисторный ключ, сток и затвор которого подсоединены к соответствующим шинам стоков и затворов, образуя двухкоординатную матрицу, а исток выведен на I_n столбик. При подаче импульса возбуждения от регистра сдвига на любую шину затворов открываются все 128 ключей, находящихся в опрашиваемой шине, и фототок от 128 фотодиодов через 128 шин стоков поступает на вход регистрирующего устройства, расположенного вне холодной зоны. Размер кристалла 11,7x11,7 мкм.

МОП-мультиплексор формата 128x128 с шагом 40 мкм включает в себя матрицу ключей формата 130x130, схемы управления режимом накопления, схемы интегрирования заряда и его считывания. В этом варианте МОП-мультиплексор обеспечивает последовательную коммутацию шин затворов (столбцов матрицы), параллельное накопление зарядов с фоточувствительных диодов каждого столб-

ца на емкости накопления за время $T_{\text{н}}$, параллельный перенос накопленного заряда на емкости хранения за время $T_{\text{п}}$ и последовательное считывание информации с емкостей хранения на общий выход за время $T_{\text{сч}}$ для последующей обработки. В секции накопления используется схема, содержащая каскад прямой инжекции, осуществляющей считывание фототока от ИК-фотодиода на накопительный конденсатор через буферный МОП-транзистор, работающий в подпороговом режиме. Этот транзистор обеспечивает усиление по мощности.

Все регистры сдвига построены по модифицированной топологии, отличающейся от прежней иным расположением шин питания и меньшей чувствительностью к рассовмещению слоев при фотолитографии. Каждый разряд регистра содержит 8 МОП-транзисторов и одну накопительную емкость. Независимо от формата регистра, для его функционирования необходимы шесть внешних выводов: три фазы тактовых импульсов, питание, общий и подложка. Выходы каждого регистра соединены с соответствующими шинами затворов матрицы ключей через МОП транзисторные ключи буферной линейки. При поступлении запускающего импульса на вход регистра, на его выходах последовательно появляются импульсы требуемой амплитуды и длительности, возбуждающие шины затворов МОП-мультиплексора. Выходной динамический регистр считывания информации по своей конструкции аналогичен управляющему регистру. Выходы регистра считывания подсоединены к затворам линейки МОП транзисторных ключей, истоки которых подключены к выходам соответствующих каналов секции хранения информации, а стоки соединены с общей шиной видеосигнала.

Для согласования размеров шагов матрицы (40 мкм) и регистров сдвига (70 мкм), 128-канальная схема управления разделена на две части: нечетные каналы размещены в верхней области кристалла, а четные — в нижней. Аналогично, 64 нечетных канала секции накопления и считывания расположены слева от матрицы, а 64 четных канала — справа от нее. Отношение ширины канала к его длине составляет в матричном МОП-транзисторе 40:6, в управляющей линейке — 50:6, во входном транзисторе канала накопления — 50:12. Минимальный топологический размер на фотошаблоне МОП-мультиплексора равен 3 мкм. Критичная к дефектам площадь матрицы составляет 5,2x5,2 мм, схем управления накоплением — 4,5x0,47 мм, схем накопления и считывания — 4,8x0,97 мм. В меньшей степени подвержены дефектам области, занимаемые разводкой и контактными площадками.

К углам матрицы примыкают четыре металлизированные площадки, покрытые In, для подсоединения аналогичных ответных площадок подложки кристалла матрицы фотоприемников к внешним контактными площадкам на кристалле МОП-мультиплексора. Все периферийные схемы и контрольные площадки сток и затворов выведены из области кристалла, накрываемого кристаллом матрицы фотопримника, для осуществления контроля качества стыковки и проверки параметров ФПМ после стыковки.

Топология МОП-мультиплексора формата 128x128 с шагом 40 мкм была разработана под *n*-канальную технологию для считывания информации с матрицы *pn*⁺-фотодиодов на основе КРТ. Тем не менее, используя *p*-канальную технологию, были получены МОП-мультиплексоры по той же топологии для считывания видеосигнала с *pn*⁺-матриц фотодиодов на основе InSb. Специально для стыковки с такими фотоприемниками была разработана топология МОП-мультиплексора формата 128x128 под КМОП-технологию с накоплением в ячейке и шагом 40 мкм. Получены первые образцы кристаллов.

Разработка и создание крупноформатного кремниевого МОП-мультиплексора с накоплением информации для ФПМ на основе КРТ объемом

384x288 представляет собой новую ступень в развитии матричных ИК-фотоприемников — получение полноформатного ИК-фотоприемника со стандартным телевизионным разрешением 768x576 элементов. Последний предполагается формировать из четырех кристаллов формата 384x288, объединяемых методами гибридной сборки на общей подложке.

МОП-мультиплексор формата 384x288, являющийся составной частью матричного ИК-фотоприемника, по своей сложности относится к 6-й степени интеграции, т. е. к СБИС. По сравнению с МОП-мультиплексором формата 128x128 число элементов в матрице возросло в 6,25 раза при более высоких требованиях к его электрическим параметрам. В связи с этим было решено проводить работу по созданию МОП-мультиплексора формата 384x288 в два этапа — по гибриднему и интегральному вариантам. При гибридной конструкции МОП-мультиплексора проще и оперативнее осуществляются поиск и реализация перспективных технических решений различных узлов схемы и каждого кристалла в целом, что, в конечном итоге, станет основой для построения интегрального МОП-мультиплексора с высоким процентом выхода годных структур.

Для гибридного варианта МОП-мультиплексора были разработаны принципы разделения функций между кристаллами, определена структура каждого кристалла и их габаритные размеры, проработаны методы объединения кристаллов в единый функциональный модуль. В результате проведенных работ было установлено, что гибридный МОП-мультиплексор должен состоять из трех составных частей: кристалла блока управления, кристалла блока считывания и кристалла-растра, на котором располагается матрица МОП транзисторных ключей, стыковочные элементы для подсоединения кристаллов и металлизированная разводка с внешними контактами для подключения выводов. Для уменьшения габаритных размеров кристаллов шаг элементов в матрице уменьшен до 35 мкм. Каждый кристалл содержит необходимые схемы контроля для их качественной отбраковки и соответствующий набор тестовых структур для контроля параметров отдельных элементов схем и качества технологических процессов. На основе изготовленных кристаллов получены работоспособные гибридные модули МОП-мультиплексора формата 384x288.

Проектирование топологий фотошаблонов всех МОП-мультиплексоров и тестовых кристаллов проводилось на компьютерах IBM PC различной конфигурации с использованием стандартных пакетов "AutoCAD". Изготовление комплектов фотошаблонов осуществлялось на установке ZBA-20.

Технология изготовления

Технология изготовления охлаждаемого МОП-мультиплексора сходна с технологией кремниевых МОП ИС. Отличительной особенностью рассматриваемых схем является наличие стыковочных элементов, необходимых для электрического и механического соединения двух кристаллов в единый модуль. Ввиду необходимости обеспечения высокой идентичности элементов на большой площади МОП-мультиплексора, представляются повышенные требования к качеству выполнения каждой технологической операции для достижения требуемых электрических параметров и получения приемлемого процента выхода годных структур.

За базовую технологию принята разработанная технология изготовления матрицы *n*-канальных МОП транзисторных ключей формата 32x32 с корректировкой отдельных критических операций и ужесточением требований к их качеству при переходе на изготовление крупноформатных матриц МОП-мультиплексоров.

Независимо от формата и наличия периферийных схем на кристалле матрица МОП-мультиплексора содержит следующие элементы: стоп-канальные области, подзатворный диэлектрик, первый уровень проводящей разводки, исток-стоковые области, межфазный диэлектрик, контактные окна, второй уровень проводящей разводки, защитный диэлектрик, стыковочные элементы.

Стоп-канальные области представляют собой высоколегированные слои p^+ -типа, предотвращающие паразитные поверхностные утечки между отдельными элементами схемы. Легирование стоп-канальных областей осуществляется методом диффузии бора. Поверхностное сопротивление составляло 40—60 Ом/кв. Кроме своего непосредственного назначения, p^+ -слой используется для формирования омического контакта к подложке кристалла.

Подзатворный диэлектрик толщиной 400—600 Å представляет собой слой термического окисла, выращенного на чистой поверхности кремния при температуре 950 °С. Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к окисным слоям, специфичными для подзатворного диэлектрика являются низкая дефектность окисла (число пор менее 10 см^{-2}) и малая величина встроенного заряда в нем.

Первый слой проводящей разводки выполнен из слоя поликристаллического кремния толщиной 0,5 мкм, легированного фосфором до сопротивления 15—30 Ом/кв. Типичная ширина поликремниевых шин — 6 мкм.

Сток-истоковые области формируются ионным легированием фосфора с последующим отжигом для активации примеси. При этом поликремниевые затворы служат маской для ионов фосфора, чем достигается самосовмещение исток-стоковых областей с затвором.

Межслойный диэлектрик состоит из пленки термического окисла, выращенной на поликремнии, и пленки пиролитического окисла, нанесенной при температуре 800 °С. Последующая термическая обработка при 1000 °С в кислороде служит для уплотнения пиролитического окисла.

Шины второго уровня проводящей разводки выполнены из трехслойной металлизации (V—Al—Mo). Ванадий служит для получения хорошей адгезии к SiO_2 и предотвращения взаимодействия Al с SiO_2 , что, в конечном итоге, привело к значительному уменьшению числа проколов окисла и снижению количества обрывов металлизации на ступеньках рельефа матрицы. Пленки Al и Mo напыляются последовательно в одном процессе без развакуумирования установки для предотвращения образования окисла на поверхности Al.

Защитный диэлектрик, получаемый низкотемпературным методом, наносится на поверхность пластины для увеличения стабильности схемы и исключения коротков между кристаллами при их стыковке.

Стыковочные элементы представляют собой индиевые столбики с типичным размером 20x20 мкм и высотой 5—6 мкм. Пленка индия напыляется после вскрытия окон в защитном диэлектрике к контактным площадкам истоков каждого ключа матрицы.

Разработаны технологические маршруты изготовления p -канальных и КМОП-мультиплексоров, по которым были получены кристаллы МОП-мультиплексоров формата 128x128 для стыковки с матрицами фотодиодов на основе InSb.

Контроль работоспособности

Весь комплекс работ по измерениям параметров МОП-мультиплексоров может быть разделен на восемь функционально связанных блоков:

- межоперационные измерения на пластинах-спутниках;
- межоперационные измерения на тестовых кристаллах;

технологические измерения на тестовых кристаллах;
разбраковка кристаллов МОП-мультиплекторов на пластине после формирования слоев металлизации;
контроль работоспособности кристаллов МОП-мультиплекторов после создания In столбиков и резки пластины на кристаллы;
приемосдаточные испытания кристаллов МОП-мультиплекторов;
контроль качества стыковки двух кристаллов;
контроль работоспособности ФПУ.

Для разработки методов контроля работоспособности матриц МОП-мультиплекторов были проведены исследования транзисторных ключей, матриц на их основе, динамических регистров сдвига, блоков накопления и хранения информации и других периферийных схем. Это позволило выявить и классифицировать дефекты, приводящие к полному или частичному выходу из строя МОП-мультиплектора. Были определены места локализации дефектов на кристалле и проанализированы вероятные причины их возникновения. На основе результатов выполненных исследований проводилась корректировка топологии и режимов технологических процессов, а также поиск и разработка новых конструктивных решений и технологических приемов, ставших впоследствии основой для создания крупноформатных матриц МОП-мультиплекторов.

Для первых матриц формата 32x32 без регистра сдвига был разработан и изготовлен автоматизированный стенд для контроля работоспособности МОП-мультиплекторов.

Для контроля работоспособности матриц МОП-мультиплекторов форматами 32x32 и 128x128 с шагом 70 мкм и управляющим динамическим регистром сдвига используется тот же измерительный стенд. Для управления работой регистра сдвига разработан специальный генератор тактовых импульсов, формирующий необходимые последовательности импульсов трех фаз и постоянные уровни питающих напряжений.

Для контроля работоспособности кристаллов *n*- и *p*-канальных МОП-мультиплекторов формата 128x128 разработан измерительный стенд, содержащий микроскоп, оснащенный аналитическими зондами, ГТИ, блок преобразователя уровней (для *p*-канальных ИС), многозондовую головку и набор необходимой контрольно-измерительной аппаратуры. Технологические измерения на пластине производятся на измерительном стенде, оснащенный аналитическими зондами после создания металлизированной разводки на тестовых структурах, расположенных либо на рабочем кристалле, либо на специальных тестовых кристаллах. Разбраковка кристаллов МОП-мультиплекторов осуществляется на пластине после формирования слоев металлизации, а контроль работоспособности кристаллов — после создания индиевых столбиков и резки пластины на кристаллы на измерительном стенде, содержащем многозондовую головку.

Контроль работоспособности кристаллов матрицы-растра МОП-мультиплектора формата 384x288 производится на автоматической зондовой установке, управляемой ПЭВМ, а контроль кристаллов блоков управления и считывания — на зондовой установке с использованием соответствующих ГТИ.

Результаты измерений

Как показали исследования МОП-мультиплекторов, основными дефектами, приводящими к снижению процента выхода годных структур, являются проколы в полевом, подзатворном и межфазном диэлектриках, обрывы металлизированных шин на ступеньках рельефа поликремния, закоротки проводящих шин и наличие встроенного заряда в окисле.

Динамические регистры сдвига работоспособны при напряжениях питания 3—15 В и уровнях импульсных напряжений 5—15 В. Регистры устойчиво функционируют на тактовых частотах от 100 Гц до нескольких мегагерц, причем нижняя граница определяется величиной емкости встроенного конденсатора, а верхняя граница — паразитными емкостями схемы.

Токи утечек транзисторных ключей были менее 10^{-10} А для матриц с шагом 150 мкм, менее 10^{-12} А — для матриц с шагом 70 и 40 мкм. Уровни токов утечек заметно снижались при охлаждении кристалла МОП-мультиплексора до значений, пренебрежимо малых по сравнению с другими источниками шумов.

Пороговые напряжения МОП транзисторных ключей при токах стока 10 мкА составляли в среднем 1,0 В с разбросом по кристаллу до ± 15 мВ, а типичные значения пробивных напряжений лежали в пределах 20—25 В.

Амплитуды выходного сигнала разработанных МОП-мультиплексоров с накоплением информации составляли 2,0—4,0 В в зависимости от типа мультиплексора и уровней питающих напряжений.

З а к л ю ч е н и е

На основе разработанной базовой технологии изготовления *l*-канальных МОП транзисторных ключей были получены кристаллы МОП-мультиплексоров форматам 32x32 с шагом 150 и 70 мкм без регистра сдвига, форматами 32x32 и 128x128 с шагом 70 мкм с управляющими регистрами сдвига, форматами 32x32 и 64x64 с управляющими и считывающими регистрами сдвига, форматами 128x128 и 384x288 с накоплением информации, а также *p*-канальные МОП-мультиплексоры формата 128x128.

На этих кристаллах был проведен полный комплекс измерений параметров МОП-мультиплексоров при температурах 300 и 77 К. Годные кристаллы мультиплексоров были состыкованы с соответствующими кристаллами ИК-фотоприемников. Состыкованные модули были использованы в составе ФПУ в качестве “смотрящих” матриц для регистрации тепловизионных изображений.

Дальнейшие работы по программе создания “смотрящих” матриц будут направлены как на изготовление МОП-мультиплексоров большего формата, так и на разработку принципиально новых приборов с обработкой сигнала с ИК-фотоприемника в каждой ячейке мультиплексора.

Л и т е р а т у р а

1. Baker I. M., Ballingall R. A. Photovoltaic CdHgTe-silicon hybrid focal planes//Proc. SPIE. 1984. V. 510. P. 125.
2. Arthurs C. P., Baker I. M., Gromes I., Bains S., Murray D. C. CMOS/CdHgTe hybrid technology for long linear arrays with Time Delay and integration and element deselection//Ibid, 1996. V. 2744. P. 475.

COOLED MOS-MULTIPLEXERS FOR INFRARED STARING FOCAL-PLANE ARRAYS

V. M. Akimov, K. O. Boltar, V. P. Liseykin, E. A. Klimanov,
A. A. Timofeev, S. V. Schukin

The State Unitary Enterprise “RD&P Centre “Orion”, Moscow, Russia

Different types of cooled silicon MOS-multiplexers have been investigated. Future development of MOS-multiplexers are considered.