

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1998

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.328

Н. Э. Бокк, Е. И. Черепов

(Новосибирск)

**МУЛЬТИПЛЕКСОР НА ОСНОВЕ КРИОГЕННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
ДЛЯ ГИБРИДНОГО ФПУ СВЕРХДАЛЬНОГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Разработан МДП-криотранзистор на основных носителях, который позволяет подавить кинк-эффект и устранить гистерезис на выходных характеристиках при гелиевых температурах. Криотранзистор использован в мультиплексоре 64×1 , предназначенном для считывания и предварительной обработки сигнала с линейки фотоприемников сверхдального ИК-диапазона с рабочей температурой ниже 30 К. Представлены результаты исследования шума мультиплексора, динамический диапазон которого составил 80 дБ.

Введение. Для многоэлементных приемников ИК-излучения необходимо, чтобы устройство считывания находилось в непосредственной близости к фокальной плоскости приемной системы. Обычно это осуществляется с помощью гибридной сборки матрицы датчиков и кремниевого считывающего кристалла. Это означает, что устройство считывания охлаждается до температуры датчиков, которая для фотоприемников сверхдального ИК-диапазона (15—30 мкм) не превышает 30 К. Одним из препятствий на пути развития ИК-систем сверхдального диапазона является фактически полное вымораживание подвижных носителей в кремнии при температурах ниже 30 К, которое приводит к радикальному изменению характеристик кремниевых приборов. МДП-транзисторы являются, по существу, единственными кремниевыми приборами, которые продолжают работать при гелиевых температурах. К сожалению, при этом на их выходных характеристиках появляются аномальные эффекты (кинк-эффект, гистерезис, избыточный шум), которые негативно сказываются на работе мультиплексора [1, 2]. Известны попытки решить эту проблему, используя транзисторы на GaAs, так как энергия ионизации доноров в этом случае значительно меньше [3, 4]. Мы осуществили другой подход, основанный на использовании возможностей кремниевой КМОП-технологии. Для борьбы с низкотемпературными аномалиями был предложен МДП-криотранзистор на основных носителях [5]. Криотранзисторы использовались в схеме считывания мультиплексора 64×1 , предназначенного для ИК ФПУ, работающего в условиях слабых потоков излучения.

Данная работа состоит из двух частей. В первой части изложены особенности функционирования криотранзистора, вторая часть посвящена мультиплексору и результатам его исследования.

Криотранзистор. Кинк-эффект (скачок тока на стоковой ВАХ) и гистерезис в МДП-транзисторах при гелиевых температурах являются следствием двух причин: нестационарного состояния неподвижного пространственного

заряда под затвором транзистора и накопления в подложке основных носителей, образованных в результате ударной ионизации возле стока в режиме насыщения. Кинк-эффекту сопутствует пик избыточного шума [6]. Для устранения первопричин возникновения аномальных эффектов возможно использовать МДП-транзисторы на основных носителях [7, 8], где проводящим каналом служит аккумуляционный слой на границе раздела полупроводник—диэлектрик. Подвижные носители в аккумуляционный слой поступают практически безынерционно из сильно легированного истока. При температуре ниже 30 К кремниевая подложка полностью выморозена и проводимость между стоком и истоком за пределами аккумуляционного слоя отсутствует. Образованные в результате ударной ионизации возле стока неосновные носители не накапливаются в подложке, а уходят в исток. Отсутствие под затвором обедненной области устраняет главную причину для возникновения гистерезиса. К сожалению, в таком транзисторе между стоком и истоком возникает паразитная проводимость в глубине подложки. Для того чтобы изолировать подложку, предложено использовать встроенный канал [5, 8].

N-канальный криотранзистор схематически изображен на рис. 1. Дырки, образованные в результате ударной ионизации в области отсечки канала возле стока, дрейфуют внутри имплантированного слоя в область истока в продольном электрическом поле. Для того чтобы дырки не выталкивались в подложку за счет дрейфа в поперечном электрическом поле, необходимо обеспечить внутри имплантированного слоя наличие нейтральной области. Тем не менее часть вторичных дырок может диффундировать за пределы слоя, что, в свою очередь, может привести к накоплению положительного заряда в подложке и кинк-эффекту, связанному с открытием перехода исток—подложка. Поэтому для подавления кинк-эффекта необходимо минимизировать ток подложки, что достигается соответствующим выбором параметров *n*-слоя. Ширина нейтральной области внутри *n*-слоя не должна быть меньше величины, определяемой выражением

$$d = \sqrt{Dt} = L \left(\frac{kT}{qV_{DS}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где *D* — коэффициент диффузии неосновных носителей; *t* — время пролета от стока к истоку; *L* — длина канала транзистора; *k* — постоянная Больцмана; *T* — температура; *q* — заряд электрона; *V_{DS}* — напряжение между стоком и истоком.

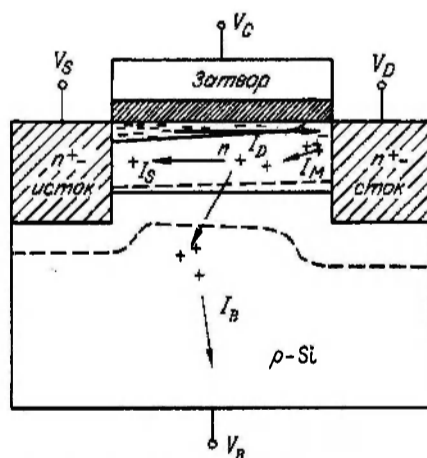


Рис. 1. Сечение *n*-канального криотранзистора:
штриховая линия — граница области обеднения встроенного *p*—*n*-перехода; \leftrightarrow — свободные дырки; \leftarrow — свободные электроны; *I_D* — ток стока; *I_B* — ток подложки; *I_S* — ток истока; *I_M* — ток лавинного размножения носителей

В связи с отсутствием неподвижного пространственного заряда под затвором подвижность носителей в канале криотранзистора будет выше, чем в обычном транзисторе, так как в данном случае у границы раздела полупроводник—диэлектрик меньше эффективное поперечное электрическое поле, определяемое как [9]

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{\epsilon_s} \left(Q_d + \frac{1}{2} Q_i \right). \quad (2)$$

Здесь Q_i — заряд инверсионного слоя; Q_d — заряд обедненного слоя; ϵ_s — диэлектрическая постоянная кремния. Таким образом, крутизна криотранзистора будет выше, чем стандартного МДП-транзистора.

Пороговое напряжение криотранзистора определяется выражением

$$V_T = V_{bi} + V_{FB}, \quad (3)$$

где V_{bi} — контактная разность потенциалов p — n -перехода; V_{FB} — напряжение плоских зон. V_{bi} при гелиевых температурах равна примерно 1,2 В. Величина V_{FB} зависит от разности работ выхода электрона из металла и полупроводника. В выражении (3) отсутствует член, связанный с неподвижным пространственным зарядом и ответственный за гистерезисные явления в случае стандартного МДП-транзистора.

Экспериментальный криотранзистор изготовлен на p -подложке с ориентацией (100), имеющей удельное сопротивление 4 Ом · см. Транзистор имеет n^+ -поликремниевый затвор. Толщина подзатворного диэлектрика 80 нм, длина затвора 10 мкм, ширина — 300 мкм. Толщина n -слоя, полученного с помощью ионного легирования, и концентрация доноров соответственно равны 0,4 мкм и $2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. При температуре 10 К пороговое напряжение экспериментального транзистора составило 0,25 В. Пороговое напряжение можно повысить примерно на 1 В, если использовать поликремниевый затвор p -типа.

Шум криотранзистора (300×10 мкм) составляет 0,5 мкВ/Гц^{1/2} на частоте 10 Гц при $T = 10$ К и не зависит от напряжения на стоке в диапазоне 0—5 В.

На рис. 2 показаны стоковые ВАХ n -канального криотранзистора с $V_G = 0,5$ —1,25 В (шаг 0,25 В) и стандартного n -канального МДП-транзистора с $V_G = 0,5$ —2 В (шаг 0,5 В) при температуре 10 К. Транзисторы имеют одинаковые размеры (300×10 мкм). Из рисунка видно, что на характеристиках стандартного МДП-транзистора (штриховая линия) присутствует кинк-эффект и гистерезис. С другой стороны, в случае криотранзистора (сплошная

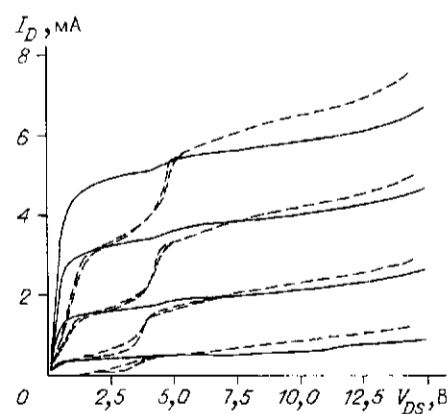


Рис. 2. Стоковые ВАХ n -канального криотранзистора и стандартного МДП-транзистора с индуцированным n -каналом при температуре 10 К

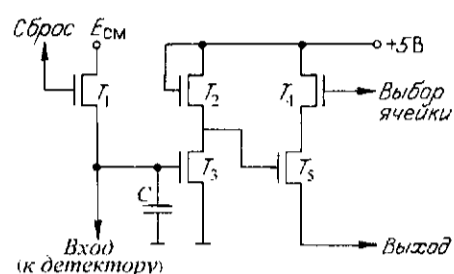


Рис. 3. Схема ячейки считывания мультиплексора

линия) кинк-эффект практически отсутствует и нет гистерезиса. Кроме того, легко заметить, что крутизна криотранзистора примерно в 2 раза выше. Выходная проводимость криотранзистора в области насыщения заметно меньше.

Мультиплексор. Криотранзистор использован в схеме считывания КМОП-мультиплексора 64×1 , имеющего шаг 100 мкм. Ячейка считывания мультиплексора представлена на рис. 3. Ее конструкция отличается от стандартной типа «источковый повторитель на детектор» наличием усилительного каскада на транзисторах T_2 и T_3 . Выбор схемы считывания продиктован необходимостью обеспечить высокую чувствительность для системы, работающей в условиях слабого сигнала. Емкость накопления C , равная 0,2 пФ, периодически заряжается током детектора и затем разряжается до уровня $E_{см}$ при включении транзистора сброса T_1 . Напряжение на зарядочувствительном узле передается на выход через усилитель на транзисторах T_2 , T_3 и T_5 (T_3 и T_5 — криотранзисторы). Нагрузочный транзистор T_2 имеет отношение ширины канала к его длине много меньше единицы, и кинк-эффект в этом случае выражен слабо. Подключение ячейки к выходной шине осуществляется транзистором T_4 . Напряжение питания мультиплексора 5 В.

На рис. 4 представлена передаточная характеристика схемы считывания, измеренная при температуре 11 К. Характеристика линейна в первом приближении в диапазоне 0,8—2 В, что свидетельствует об отсутствии аномалий на ВАХ транзисторов усилителя.

Структурная схема установки, использованной для исследования шумов мультиплексора, приведена на рис. 5. При измерениях образец устанавливается в головной части экранированного измерительного зонда для непосредственного погружения в транспортный дьюар с жидким гелием. Основной установки служит электронный блок, включающий в себя генератор импульсов управления, предварительный усилитель, устройство двойной коррелированной выборки (ДКВ), дополнительное устройство выборки-хранения и фильтр

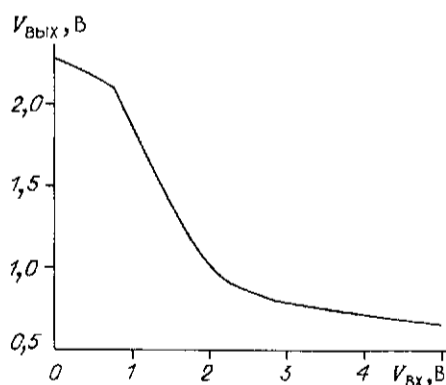


Рис. 4. Передаточная характеристика схемы считывания мультиплексора, измеренная при температуре 11 К

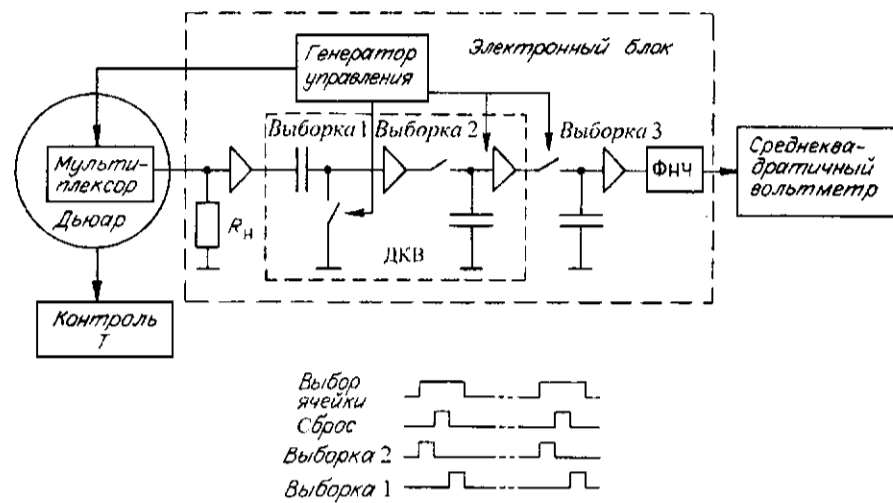


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения шума мультиплексора и временная диаграмма сигналов управления

низких частот (ФНЧ). Устройство ДКВ работает в режиме простого вычитания, так как 1-я и 2-я выборки не коррелированы относительно импульса сброса (см. рис. 5). Такой режим естественным образом используется при последовательном опросе всех ячеек мультиплексора с дальнейшей оцифровкой. При этом подавляется $1/f$ -шум усилителя считывания и выравнивается разброс между ячейками мультиплексора, но шум сброса не устраняется, а увеличивается в $\sqrt{2}$ раза. Для того чтобы измерить шум в конкретной ячейке, применялось дополнительное устройство выборки—хранения. На выходе электронного блока для исключения влияния тактовых импульсов включен фильтр низких частот, частота среза которого равна 500 Гц, так как при всех измерениях использовалось время накопления 1 мс. Шум измерялся с помощью среднеквадратичного вольтметра. Количество шумовых электронов на выборку на входе мультиплексора определяется выражением

$$N = C \frac{\sqrt{U_2^2 - U_1^2}}{GKq}, \quad (4)$$

где C — емкость накопления; U_2 — напряжение шума на выходе; U_1 — напряжение шума измерительной системы (30 мкВ); G — коэффициент передачи измерительной системы; K — коэффициент передачи схемы считывания мультиплексора.

Результаты измерения шума ячейки считывания мультиплексора в зависимости от напряжения смещения приведены на рис. 6. Измерения проведены при температуре 11 К. Из рисунка видно, что шум немного возрастает при уменьшении напряжения смещения от 130 электронов при 2 В до 200 электронов при 1,1 В. Таким образом, при положительном смещении детектора динамический диапазон составляет 80 дБ.

С целью выяснения источника шума было проведено измерение шума усилителя при открытом транзисторе T_1 , когда на входе схемы считывания постоянно поддерживался фиксированный потенциал $E_{см}$. Шумы в данном случае оказались за пределами чувствительности системы измерений, т. е. меньше 21 электрона (см. рис. 6). Рост шума при смещениях меньше 1 В предположительно связан с нагрузочным транзистором T_2 . Таким образом,

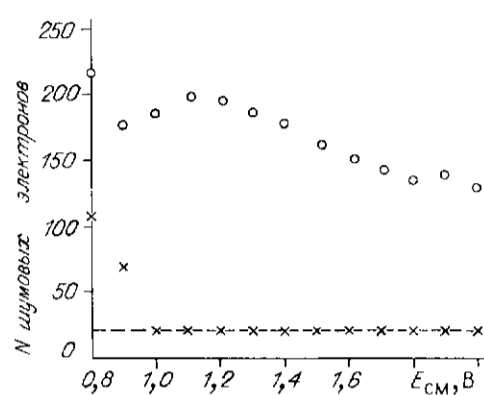


Рис. 6. Шум мультиплексора (приведенный ко входу) при температуре 11 К (O), на входе схемы считывания установлен фиксированный потенциал E_{CM} (x), штриховая линия — шум измерительной системы

шум ячейки считывания мультиплексора в диапазоне входных смещений 1—2 В обусловлен неопределенностью потенциала входного узла после сброса в конце периода накопления.

При температуре 300 К шум сброса обычно определяется kTC -шумом, который связан с тепловыми флуктуациями заряда в канале транзистора сброса. Однако в данном случае расчетный уровень kTC -шума составляет 48 электронов, что существенно меньше полученного результата. Предположительно избыточный шум сброса связан с эмиссией электронов с поверхностных состояний под затвором T_1 (когда T_1 закрыт), часть которых затем диффундирует в зарядочувствительный узел [10]. Этот источник избыточного шума наиболее вероятен, так как площадь затвора транзистора сброса достаточно велика и составляет 20×10 мкм.

Заключение. Разработанный МДП-криотранзистор позволяет устранить гистерезис и эффективно подавить кинк-эффект вместе с сопутствующим ему избыточным НЧ-шумом на выходных характеристиках в условиях вымороженной кремниевой подложки. Криотранзистор применен в схеме считывания интегрального мультиплексора 64×1 , предназначенного для работы при температурах ниже 30 К в режиме слабого фона. Измерения, проведенные при температуре 11 К, показали, что мультиплексор обладает высоким динамическим диапазоном (~ 80 дБ). Шум ячейки считывания мультиплексора обуславливается неопределенностью потенциала, возникающей на входе мультиплексора после сброса накопленного заряда, и при температуре 11 К не превышает 200 электронов. Избыточный шум сброса, скорее всего, связан с паразитным зарядом, эмиттированным с поверхностных состояний под затвором транзистора сброса и диффундирующим затем в зарядочувствительный узел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stetson S. B., Reynolds D. B., Stapelbroek M. G., Stermer R. L. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays // Proc. SPIE. 1986. 686. P. 48.
2. Hanamura S., Aoki M., Masukoro T. et al. Operation of bulk CMOS devices at very low temperature // IEEE Journ. Solid State Circuits. 1986. SC-21. P. 484.
3. Cunningham T. J., Gec R., Fossum E. R. Noise and electrical characteristics below 10 K of small CHFET circuits and discrete devices // Proc. SPIE. 1993. 1946. P. 384.
4. Cunningham T. J., Fossum E. R. Cryogenic GaAs JFET's // Proc. SPIE. 1994. 2226. P. 14.
5. Bock N. E. Silicon cryogenic MOST // Solid State Electron. 1995. 38, N 4. P. 931.

6. Simoen E., Dierickx B. Kink-related low-frequency noise overshoot in Si NMOSTs at liquid helium temperatures // Solid State Electron. 1992. 35, N 10. P. 1455.
7. Dierickx B., Simoen E., Vermeiren J., Clayes C. Operation of majority and minority carrier MOSFET's at liquid helium temperature // J. de Physique. 1988. С. 4. 49. P. 741.
8. Бокк Н. Э., Черепов Е. И. МДП-транзистор в режиме аккумуляции для диапазона температур 4,2—40 К // Микроэлектроника. 1994. 23, вып. 1. С. 54.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 2.
10. Vock N. E. Reset noise at low temperatures // J. de Physique. 1996. С. 3. 6. P. 207.

Поступила в редакцию 10 июля 1997 г.
