

К. т. н. В. П. РЕВА, С. В. КОРИНЕЦ, Л. А. ПИСАРЕНКО,  
С. Е. ДУХНИН, Н. А. БАРСУКОВА

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail: reva @imd.org.ua

Дата поступления в редакцию  
24.05 2007 г.

Оппоненты к. т. н. В. П. СИДОРЕНКО  
(НИИ микроприборов, г. Киев),  
к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ СХЕМ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ИК-ФОТОДИОДОВ

*Рассмотрены технология комплементарных МОП-схем и технология приборов с зарядовой связью на базе стандартной технологии  $n$ -канальных МОП-структур. Приведены параметры схем считывания, изготовленных по этим технологиям.*

Обработка сигналов с многоэлементных инфракрасных фотоприемников в настоящее время возможна только с использованием специальных электронных устройств считывания и предварительной обработки непосредственно в фокальной плоскости приемника. Применение устройств считывания в фокальной плоскости рядом с фотодетекторами позволяет значительно уменьшить уровни наводок извне и кардинально снизить уровень выходного шума из гибридной сборки «фотоприемник — устройство считывания». Анализ современных конструкций и параметров схем считывания для фотоприемных устройств (ФПУ) ИК-диапазона показывает, что они обеспечивают получение минимальной разрешающей способности по температуре в пределах 10—35 мК в динамическом диапазоне 75—80 дБ [1—6].

Данная статья посвящена рассмотрению технологических особенностей изготовления криогенных интегральных схем считывания (ИСС) для линейных ФПУ формата 2×64, работающих в диапазоне длин волн 8—14 мкм. За основу были взяты хорошо освоенные в кремниевом производстве базовые технологии — 2,5-микронная  $n$ -канальная и 2-микронная КМОП.

### Конструкции схем считывания

Топологию схем считывания, независимо от технологической реализации, можно разделить на три части:

— фокальная плоскость (контакты к линейке (матрице) фоточувствительных детекторов (ФЧД), блок предварительной обработки и элементы тестирования схемы);

— аналоговая часть (схемы формирования опорного уровня, входные схемы стыковки с фотодиодами, зарядочувствительные усилители, внутренние буферы, выходные буферы);

— цифровая часть (схемы формирования всех необходимых сигналов управления цифровыми и аналоговыми блоками).

*Интегральные схемы на приборах с зарядовой связью (ПЗС) обладают уникальной способностью представления сигнала в аналогово-дискретной форме. Сигнальная информация в ПЗС находится в виде зарядовых пакетов, которые локализируются в отдельных потенциальных ямах, образующихся в приповерхностном слое полупроводника. С помощью внешних управляющих импульсов зарядовые пакеты можно перемещать вдоль кристалла, производить их обработку и преобразовывать в ток или напряжение на выходе прибора. Основные операции — детектирование, накопление, мультиплексирование, временная задержка — в схемах считывания на основе ПЗС проводится в ячейках ПЗС. Для этого могут применяться как ячейки с поверхностным переносом, так и ячейки со скрытым (объемным) каналом [7, 8].*

Таким образом, в интегральных ПЗС-схемах считывания элементной базой, обеспечивающей все необходимые функции, являются МОП-структуры с поликремниевыми электродами и  $n$ -канальные МОП-транзисторы.

Для схем считывания на основе комплементарных МОП-структур (КМОП) основной элементной базой являются  $n$ - и  $p$ -канальные МОП-транзисторы, которые обеспечивают цифровую обработку сигнальной информации, а аналоговые функции реализуются накопительными емкостями, выполненными в виде конденсаторов с поликремниевыми электродами.

### Основные характеристики технологий изготовления и элементной базы

В табл. 1 и 2 приведены основные параметры, характеризующие рассматриваемые технологии изготовления схем считывания.

Как видно из таблиц, обе используемые технологии реализуются с помощью процессов проекционной фотолитографии не очень высокого уровня и сравнимы по сложности. КМОП-технология — более дорогостоящая за счет использования большего числа операций фотолитографии и более жестких ограничений, но в настоящее время широко распространенная.

Отличительной особенностью технологий изготовления схем считывания является необходимость обеспечения высокой однородности выходных характеристик, обеспечение однородности входных цепей и работы при криогенных температурах. В

Таблица 1

Основные характеристики технологий изготовления схем считывания (исходная подложка — Si, p-тип, <100>)

Параметр	Тип технологии	
	ПЗС	КМОП
Размер кристалла, мм	X=6,1; Y=5,0	X=5,65; Y=6,65
Тип фотолитографии	Проекционная	Проекционная
Количество слоев	9	11
Число операций фотолитографии	11	13
Количество уровней Si-poly	2	2
Количество уровней металла	1	1

Таблица 2

Соотношение элемент/расстояние схем считывания, мкм

Технологический слой	ПЗС	КМОП
Активные области	6,0/4,0	4,0/3,0
Поликремний 1-го уровня	6,0/2,5	2,4/2,0
Поликремний 2-го уровня	6,0/3,0	4,0/3,0
Контактные окна	3,0/3,0	2,0/2,0
Металлизация	6,0/2,0	5,0/2,0

связи с этим необходимо применять жесткие требования к размерам и разбросу значений пороговых напряжений (точнее, подпороговых напряжений) транзисторов прямой инжекции, которые реализуются *n*-канальными МОП-транзисторами с поликремниевым затвором первого уровня с «исходным порогом». Разброс значений пороговых напряжений от номинального значения не должен превышать в пределах одной пластины величины  $\pm 0,1$  В, а в пределах одного кристалла —  $\pm 0,01$  В. Для решения этой проблемы должны быть предусмотрены:

1. *Выбор конструктивно-технологических ограничений для входного транзистора прямой инжекции.* Для поддержки линейности передаточной характеристики устройств считывания ток канала транзистора прямой инжекции не должен зависеть от напряжения на канале. Исследования [9, 10] подпороговых характеристик с разной длиной каналов показали, что в области напряжений  $U_{\text{стока}} \approx 0 \dots 7$  В заметного влияния напряжения на канале на подпороговый ток не наблюдается при длине канала  $L_{\text{кан}} \geq 6$  мкм. Кроме того, при таких значениях  $L_{\text{кан}}$  минимально влияние на длину канала геометрических разбросов («уход» размеров при изготовлении промежуточных шаблонов, фотокопии, ПХТ-пленки поликремния и при боковой диффузии исток-сток-овых областей).

2. *Выбор исходного кремния.* При выборе марки и группы исходного кремния основное внимание уделялось минимальному разбросу удельного электрического сопротивления  $\rho$  по торцам не более  $\pm 25\%$ , радиальное отклонение — не более  $\pm 10\%$  для кремния *p*-типа ориентации <100>.

3. *Воспроизводимость толщины подзатворного окисла.* Толщина слоя окисла на кремниевой пластине должна изменяться в пределах  $\pm 5\%$  от номинального значения. Оптимизация процесса выращивания термического подзатворного окисла под первый уровень поликремния при температуре  $1000^\circ\text{C}$  позволяет получать разброс толщины подзатворного окисла в пределах  $\pm 25 \text{ \AA}$  для толщины окисла  $d=500 \text{ \AA}$ .

4. *Стабилизация заряда в МОП-структурах.* Для улучшения воспроизводимости пороговых напряжений *n*-МОП-структур было применено окисление с добавлением HCl или трихлорэтилена на всех стадиях формирования активных областей приборов: начальном окислении, окислении затворов первого уровня поликремния, окислении затворов второго уровня поликремния. Для нейтрализации быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> после формирования слоя металлизации проводился низкотемпературный ( $450^\circ\text{C}$ ) отжиг в водороде.

5. *Минимизация геометрических разбросов.* При проведении операций травления пленки поликремния первого уровня необходимо обеспечить качественное вытравливание узких зазоров между электродами ПЗС-структур (ширина 2,5 мкм и длина более 10 см), обеспечив при этом минимальный уход размеров поликремниевых затворов *n*-канальных МОП-транзисторов, который определяет воспроизводимость пороговых напряжений. Поэтому для травления первого уровня поликремния применялся процесс реактивного ионного травления, обеспечивающий уход размера в пределах  $\Delta = \pm 0,1$  мкм. Для травления второго уровня поликремния главное — это вытравливание зазоров между поликремниевыми электродами ПЗС. Для оценки качества травления поликремния второго уровня использовались специально разработанные тестовые структуры, которые позволяли контролировать процесс травления пленки и при необходимости производить дополнительное дотравливание пленки Si-poly2.

6. *Минимизация контактного сопротивления активных областей.* Области истока-стока легировались большими дозами фосфора ( $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ), проводилось дополнительно легирование контактных

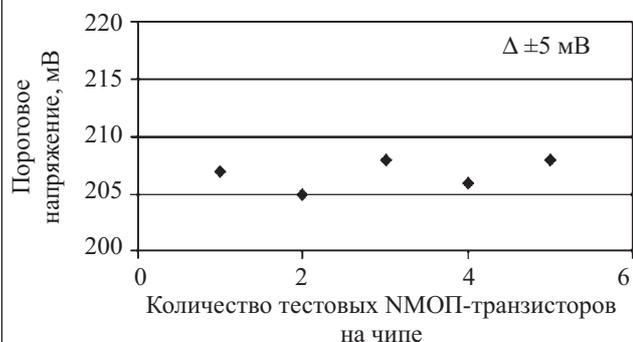


Рис. 1. Внутримодульный разброс пороговых напряжений NМОП-транзисторов (ПЗС-технология,  $L_{\text{кан}}=8$  мкм,  $d_{\text{SiO}_2}=500 \text{ E}$ )

онок, а также низкотемпературный отжиг в атмосфере водорода. В результате сопротивление контактов Al-N<sup>+</sup> размером 3,0 мкм не превышало 5,0 Ом.

Весь этот комплекс технологических средств позволил получать для схемы считывания форматом 2×64 внутримодульный разброс порогового напряжения транзисторов прямой инжекции (НМОП-транзисторов) менее ±10 мВ (см. рис. 1).

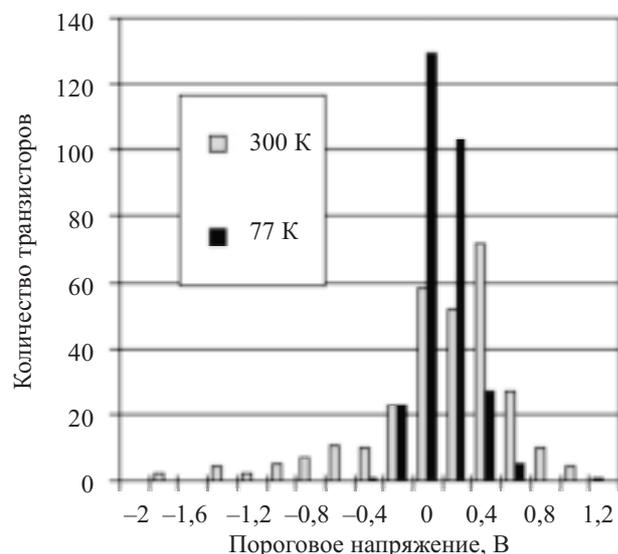


Рис. 2. Разброс пороговых напряжений НМОП-транзисторов при комнатной и криогенной температурах

На рис. 2 представлены экспериментальные данные измерений порогового напряжения НМОП-транзисторов при комнатной и криогенной температурах.

Для схем считывания на основе ПЗС важнейшим параметром является эффективность переноса заряда, т. к. неполный перенос заряда приводит к межканальным перекрестным помехам. Основная причина неэффективности переноса заряда — это потери заряда из-за захвата на ловушках (поверхностных или объемных) [11, 12]. Эффективность переноса ухудшается при температурах ниже 80 К из-за вымерзания (freezeout) носителей заряда. Исследования показывают, что на комнатных температурах значения неэффективности на один перенос для ПЗС с поверхностным каналом колеблется в пределах  $10^{-3}$ , а с объемным каналом —  $1—5 \cdot 10^{-5}$  [13, 14]. Однако такого очевидного преимущества ПЗС с объемным каналом уже нет при рассмотрении температурных зависимостей неэффективности. Так, для скрытого канала глубиной 0,65 мкм, полученного имплантацией фосфора с дозой  $1,12 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup> в подложку р-типа с концентрацией  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> при длине электрода 9 мкм и ширине 100 мкм, ухудшение эффективности переноса наступает при температурах ниже 150 К, а при температуре жидкого азота достигает двух порядков [15, 16]. В то же время для такой же конструкции ПЗС с поверхностным каналом ухудшение эффективности начинается ниже 100 К, а при температуре жидкого азота достигает всего 2—3 раз. Поэтому при температуре 77 К значения неэффектив-

ности переноса практически одинаковы для скрытого и поверхностного каналов.

**Результаты исследований опытных образцов схем считывания**

Для сравнения технологий были спроектированы схемы считывания для ИК-фотоприемников форматом 2×64 и изготовлены по ПЗС и КМОП-технологиям. В табл. 4 приведены основные параметры изготовленных устройств считывания формата 2×64.

Таблица 4

Основные параметры схем считывания форматом 2×64

Параметр	Технология изготовления	
	ПЗС	КМОП
Размер кристалла, мм	X=6,1; Y=5,0	X=5,65; Y=6,65
Напряжение источника питания, В	15±1,5	5±0,5
Количество внешних управляющих импульсных сигналов	8	5
Количество внешних постоянных напряжений	7	4
Количество контактных площадок, используемых для сборки гибридизированных модулей в криостате	28	15
Рабочая температура в криостате, К	80±2	80±2
Выходное напряжение, В	5,16—5,87	3,53—3,78
Динамический диапазон по выходному напряжению, дБ	69,7—81,0	69,5—70,2
Коэффициент нелинейных искажений амплитудной характеристики, %	0,7—3,1	1,84—2,21
Диапазон разброса напряжения смещения на фоточувствительных элементах, мВ	7,6—14,3	5,4—12,8
Минимальная зарядовая емкость по входу, пКл	1,69—2,43	4,18—4,42
Максимальная потребляемая мощность, мВт	44,1—44,8	24,2—26,2
Номинальная частота тактовых сигналов фаз управления, МГц	1,0	2,5
Максимальная частота тактовых сигналов фаз управления, МГц	2,0	5,0
Номинальная частота считывания информации, МГц	—	1,25
Максимальная частота считывания информации, МГц	—	2,5

**Выводы**

1. Проведенные исследования показали, что обе технологии могут быть применены в производстве схем считывания с ИК-фотоприемников.

ПЗС-технология предъявляет более высокие требования к технологическим процессам изготовления схем считывания (необходимость хлорных процессов окисления, прецизионных и контролируемых процессов травления двух уровней поликремниевых электродов, специальных процессов для обеспечения высокой эффективности переноса заряда при криогенных температурах).

Изготовление ИС считывания по КМОП-технологии полностью вписывается в наиболее распространенный вид технологии, которая применяется на современных кремниевых производствах.

2. Технологический процесс изготовления ИС считывания как по ПЗС-, так и по КМОП-технологии, обеспечивает реализацию всех требований, предъявляемых к основным электрическим параметрам схем считывания, работающих при криогенных температурах. ПЗС-технология обладает преимуществом при получении более высокого уровня значений динамического диапазона по сравнению с КМОП-технологией. Недостатки ПЗС-технологии — это:

- необходимость больших площадей кристалла (по причине больших проектных норм), следовательно, низкая степень интеграции;
- наличие большого количества внешних источников сигналов для управления;
- высокое напряжение питания (15 В).

Основным преимуществом КМОП-технологии для изготовления схем считывания является ее широкое распространение практически на всех кристалльных производствах и возможность постоянного снижения проектных норм за счет совершенствования общих достижений кремниевой планарной технологии.

Снижение проектных норм и приближение их к предельным проектным нормам для процессорных схем способствует постоянному увеличению форматности схем считывания с ИК-фотоприемников. Кроме того, использование КМОП-технологии дает возможность производить дополнительные операции, в частности произвольную выборку (деселекцию) бракованных ИК фотоприемных детекторов.

Таким образом, выбор необходимого вида технологии должен определяться прежде всего требованиями к обеспечению электрических параметров и величиной форматности схемы.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Anbar M., Brown Ch. A., Milesco L., Babalola J. A. Clinical applications of DAT using a QWIP camera // Proceed. SPIE.— 1999.— Vol. 3698.— P. 93—102.
2. Hargroder A. G., Davidson J. E., Luther D. G. et al. Infrared imaging of burn wounds to determine burn depth // Ibid.— P. 103—108.
3. Richards A. Alien vision: exploring the electromagnetic spectrum with imaging technology.— Bellingham (USA): SPIE Press, 2001.
4. Tribollet Ph., Chatard J.-P. From research to production: 10 years of succes // Proceed. SPIE.— 2000.— Vol. 4130.— P. 216—234.
5. Бовина Л. А., Бурлаков И. Д., Ильин Ю. К. и др. Многорядные КРТ фотоприемные устройства для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм // Оптический журнал.— 1996.— № 6.— С. 62—66.
6. Rogalski A. Infrared detectors.— Amsterdam: Gordon and Breach, 2000.
7. Hirschberg I. Charge-coupled technology bursts through imaging limits // Opt. Spectra.— 1975.— N 11.— P. 29—33.
8. Mohsen A. M., Morris F. J. Measurements on depletion-mode field effect transistors and buried channel MOS capacitors for the characterization of bulk channel charge coupled devices // Solid State Electronics.— 1975.— Vol. 18.— P. 407—416.
9. Sizov F. F., Reva V. P., Derkach Yu. P. et al. IR sensor readout devices with source input // Quantum Electronics and Optoelectronics.— 1999.— Vol. 2, N 1.— P. 102—110.
10. Sizov F. F., Derkach Yu. P., Kononenko Yu. G., Reva V. P. Testing of readout device processing electronics for IR linear and focal plane arrays // Proceed. SPIE.— 1999.— Vol. 3436.— P. 942—948.
11. Charge-Coupled Devices /Ed. by D. F. Barbe.— Berlin-Heidelberg—New York: Springer-Verlag, 1980.
12. James R. Janesik scientific charge-coupled devices.— Bellingham—Washington: SPIE, 2001.
13. Zetterlund B., Steckl A. J. Low-temperature operation of silicon surface channel charge-coupled devices // IEEE Transaction on Electron Devices.— 1987.— Vol. 34, N 1.— P. 39—50.
14. Lakhoua N., Poirier R. Trap levels in p and n buried channel CCD // Solid State Electronics.— 1978.— Vol. 21.— P. 994—997.
15. Sizov F. F., Derkach Yu. P., Reva V. P., Kononenko Yu. G. MCT sensor readout devices with charge current injection and preliminary seagnal treatment. Testing procedure // Opto-Electronics Review.— 1999.— Vol. 7, N 4.— P. 327—338.
16. Голенков А. Г., Дарчук С. Д., Деркач Ю. П. и др. Устройства считывания для многоэлементных фотодиодных линеек на ИК-диапазон на основе CdHgTe // XVI Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения.— Москва.— 2000.— С. 15—16.

**НОВЫЕ КНИГИ**

НОВЫЕ КНИГИ

**Бернард Д., Уиллис Б. Практическое руководство по использованию X-Ray инспекции в производстве радиоэлектронных изделий.— М.: Техносфера, 2007.— 48 с.**

В книге представлены основы рентгеноскопии и ее применение в контроле при производстве радиоэлектронных изделий. Приведены примеры технологических дефектов, которые не могут быть обнаружены при использовании обычных методов инспекции. Кроме того, предлагаются режимы проверок различных видов изделий, включая VGA, ответы на наиболее часто задаваемые вопросы. Книга может быть полезна специалистам, занимающимся рентгеноскопией радиоэлектронных изделий.

