

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

А.Коротков, Д.Морозов, М.Пилипко, И.Пятак, Д.Буданов

Аналого-цифровой преобразователь является ключевым элементом приемных каналов беспроводных систем связи, которым во многом определяются такие характеристики радиосистемы, как рабочая полоса частот и уровень чувствительности. Правильный выбор АЦП – решающий фактор построения оптимальной конфигурации приемного тракта. Центром проектирования интегральных схем, который входит в состав кафедры "Интегральная электроника" Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, выполнен ряд работ по созданию аналоговых и аналого-цифровых КМОП ИС, преимущественно для систем беспроводной связи. Рассмотрим основные архитектуры АЦП для коммуникационных систем и наиболее интересные разработки Центра в области аналого-цифровых преобразователей, в которых реализованы передовые схемотехнические решения.

Требования, которые предъявляются к коммуникационным системам последних поколений, а именно, высокая скорость передачи информации, низкое энергопотребление, компактность и минимальное число необходимых компонентов, определяют выбор архитектуры используемого в приемном тракте аналого-цифрового преобразователя. На сегодняшний день наиболее популярны две архитектуры АЦП – дельта-сигма и конвейерная. Кроме того, в системах связи применяют АЦП параллельного типа. У каждой архитектуры свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать в конкретном приложении.

ДЕЛЬТА-СИГМА АЦП

В беспроводных приложениях широкое применение находят АЦП следящего типа на основе дельта-сигма модуляторов. Такие АЦП состоят из дельта-сигма модулятора и кодирующего устройства, в качестве которого обычно используют цифровой дельта-сигма фильтр. Модулятор содержит один или несколько интеграторов и квантователь, охваченные отрицательной обратной связью, подключенной к сумматору на входе модулятора. Модулятор выполняет тактируемое следящее

преобразование с интегрированием и уравниванием непрерывного входного сигнала в последовательность импульсов напряжения высокого и низкого уровней. Дельта-сигма фильтр преобразует полученную импульсную последовательность в многоуровневый цифровой код.

Высокое значение передискретизации дельта-сигма АЦП позволяет использовать простые аналоговые фильтры защиты от наложения спектров, что экономит потребляемую энергию и занимаемую площадь. Однако при этом требуется дополнительная цифровая фильтрация. Дельта-сигма АЦП обладают низкой потребляемой мощностью при высоком разрешении, которое в зависимости от диапазона рабочих частот может составлять до 16 и более разрядов. Такие АЦП используются в диапазоне частот до сотен кГц и обладают линейностью передаточной характеристики, низкой потребляемой мощностью, малой площадью кристалла.

Свойства дельта-сигма АЦП главным образом определяются характеристиками дельта-сигма модулятора, так как аналоговый сигнал преобразуется в цифровой в модуляторе. Центром проектирования интегральных схем накоплен обширный опыт разработки интегральных схем дельта-сигма модуляторов [1, 2].

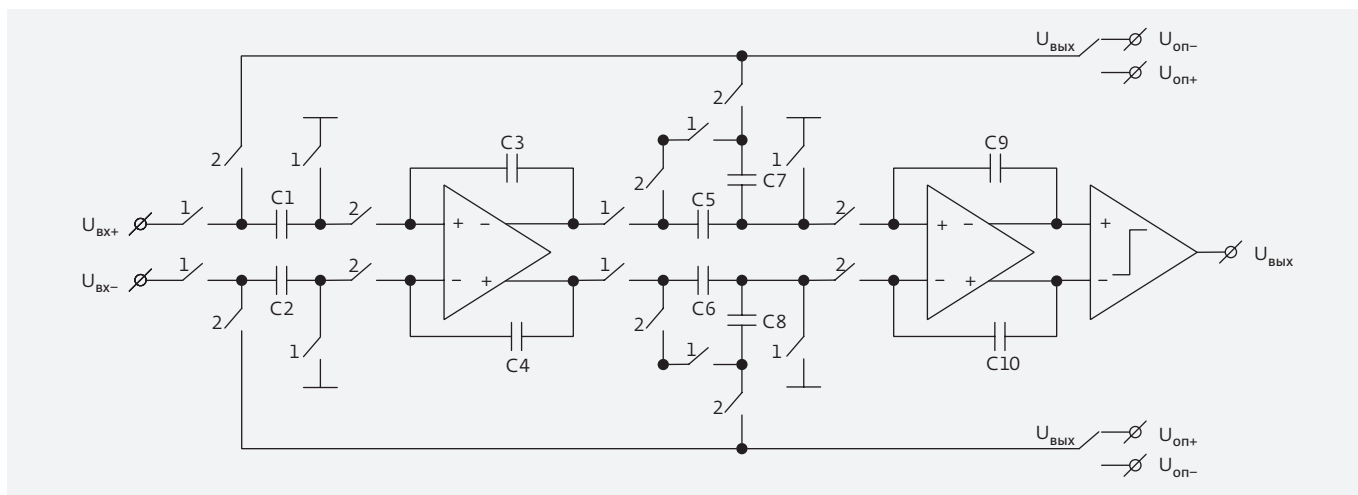


Рис.1. Схема дельта-сигма модулятора

Авторами предложена схема дельта-сигма модулятора второго порядка, состоящая из двух интеграторов, компаратора с одиночным выходом и цепей обратной связи (рис.1). В цепях обратной связи используются ключи, коммутирующие одно из опорных напряжений узлов $U_{оп+}$ или $U_{оп-}$ в зависимости от полярности выходного сигнала компаратора $U_{вых}$ и рассматриваемого плеча балансной структуры. Интеграторы представлены цепями на переключаемых конденсаторах с двухфазным управлением на основе дифференциальных по входу и выходу операционных транскондуктивных КМОП-усилителей (на рис.1 обозначены треугольными блоками).

При использовании операционного усилителя в составе дельта-сигма модулятора не предполагается работа усилителя на резистивную нагрузку, следовательно, не требуется малое выходное сопротивление. В данном применении в операционном усилителе обычно нет выходного каскада повторителя напряжения. Строго говоря, такой усилитель не относится к классу источников напряжения, это источник тока, управляемый напряжением, то есть операционный транскондуктивный усилитель. Поскольку частотные характеристики операционных транскондуктивных

усилителей определяют полосу рабочих частот дельта-сигма модулятора, важно, чтобы эти усилители были широкополосными и обладали высоким коэффициентом усиления по напряжению в области низких частот для снижения шума квантования. Фазы коммутации ключей показаны цифрами 1 и 2 (см. рис.1). Компаратор реализуется в виде КМОП-схемы на основе дифференциального каскада.

Кристалл дельта-сигма модулятора площадью 1,2 мм² был изготовлен по технологии с топологическими нормами 180 нм (рис.2). По результатам эксперимента был снят спектр выходного сигнала (рис.3). Динамический диапазон модулятора составил 56,0 дБ, что обеспечивает АЦП разрешающую способность девять разрядов при тактовой частоте 50 МГц. Потребляемая мощность интегральной схемы не превышает 33,0 мВт.

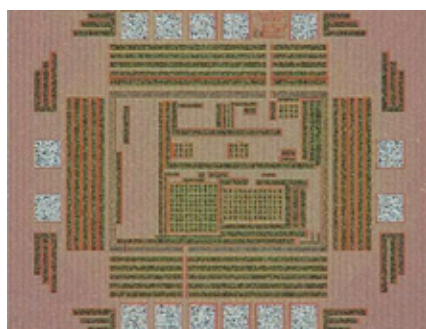


Рис.2. Кристалл дельта-сигма модулятора

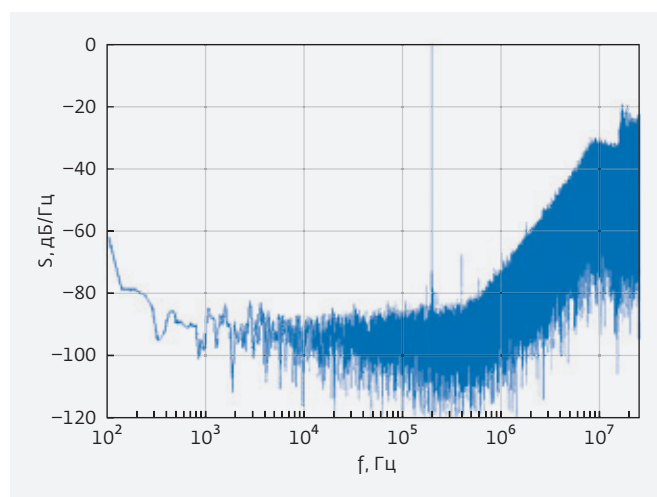


Рис.3. Спектр выходного сигнала дельта-сигма модулятора

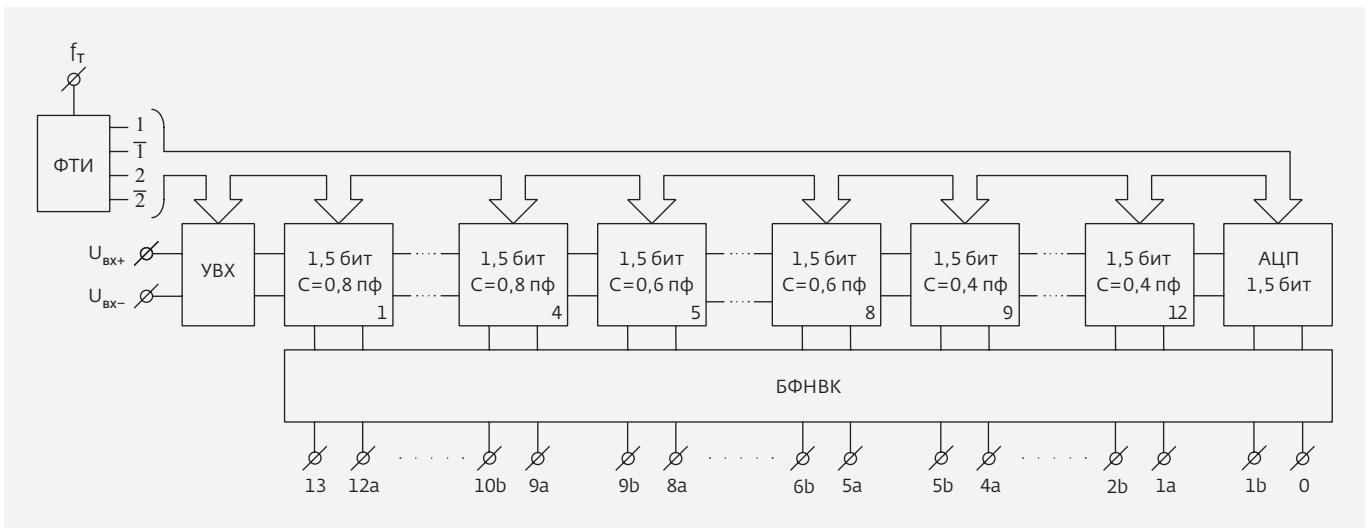


Рис.4. Блок-схема 14-разрядного конвейерного АЦП

КОНВЕЙЕРНЫЕ АЦП

Конвейерный АЦП состоит из последовательного ряда каскадов, каждый из которых содержит АЦП низкого разрешения, ЦАП и усилитель. Конвейерные АЦП в коммуникационных системах обычно применяют для энергоэффективного высокоскоростного преобразования широкополосных входных сигналов (например, в диапазоне 10...100 МГц). Частоту выборки АЦП выбирают с таким расчетом, чтобы коэффициент передискретизации был достаточно малым (в диапазоне от 2 до 4). Стандартное разрешение конвейерных АЦП находится в диапазоне 8...14 бит.

Центром выполнен ряд работ в области проектирования конвейерных АЦП на основе КМОП-технологии

[3–7]. Один из примеров – 14-разрядный АЦП с частотой дискретизации 100 МГц, в котором реализована схема с использованием принципа временного перемежения для двухфазных цепей на переключаемых конденсаторах. Ядро АЦП дифференциального типа реализовано на основе схем на переключаемых конденсаторах и операционных транскондуктивных усилителях в виде конвейерной архитектуры (рис.4). В состав АЦП входят схемы формирования тактовых сигналов, устройство выборки-хранения (УВХ), двенадцать 1,5-битных каскадов (рис.5), блок формирования некорректированного выходного кода (БФНВК).

БФНВК синхронизирует выходные сигналы каскадов конвейера. С выхода БФНВК сигналы подаются

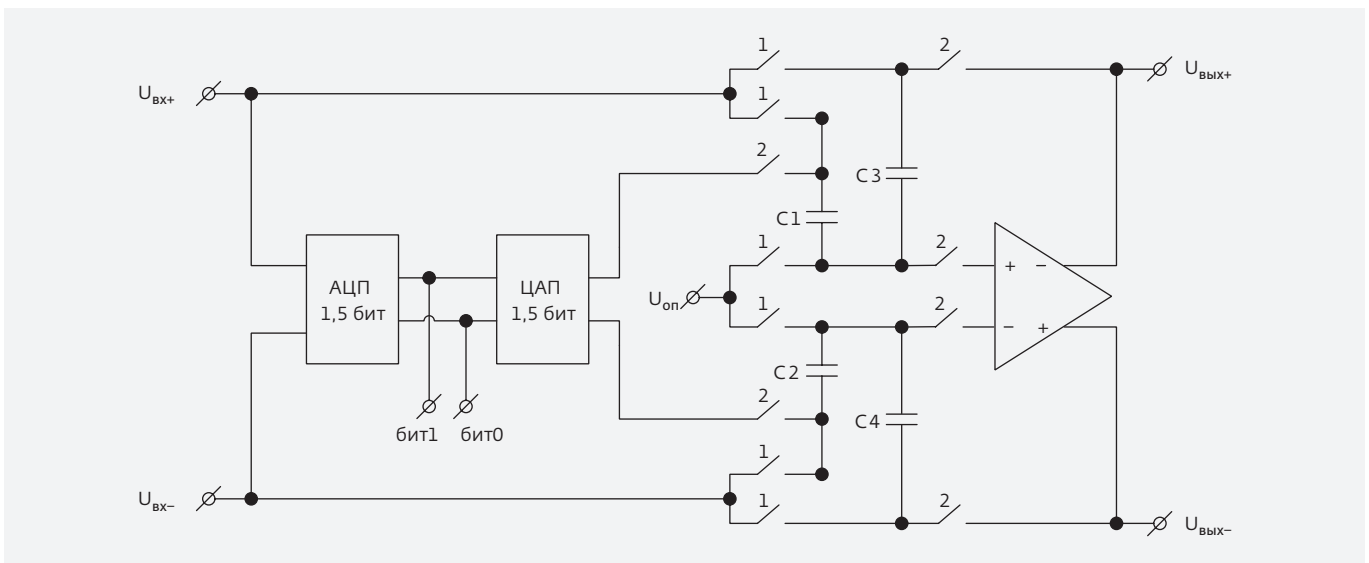


Рис.5. Блок-схема 1,5-битного каскада

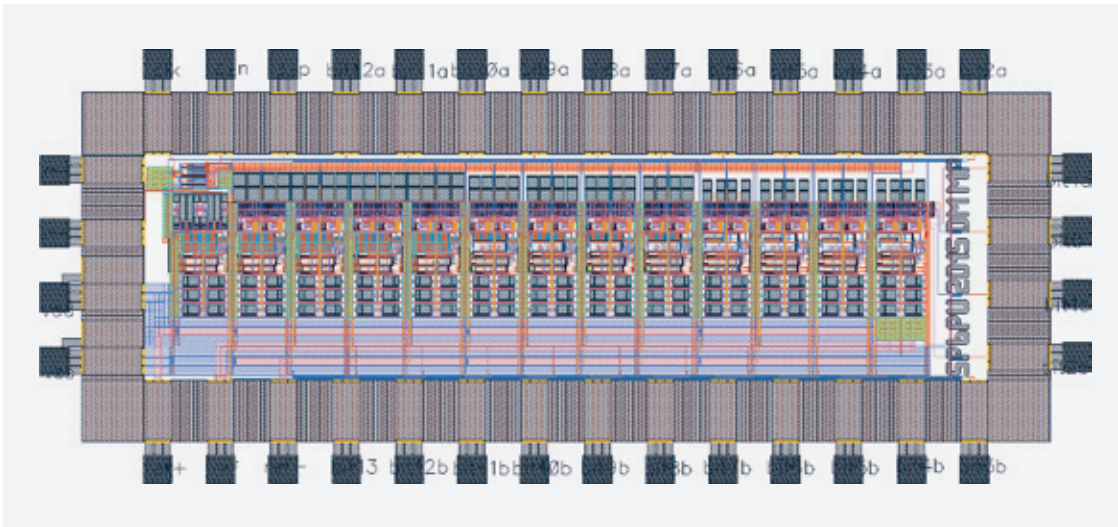


Рис.6.
Топология кристалла 14-разрядного конвейерного АЦП

на внешнюю схему цифровой калибровки и коррекции, которая позволяет повысить соотношение сигнал-шум с 55 до 70 дБ. Предложенная цифровая калибровка позволяет снизить "ошибку памяти" путем подстройки калибровочных коэффициентов и уменьшить влияние ошибки усиления каскадов конвейера. Калибровка реализована как на алгоритмическом, так и на схемотехническом уровнях. Дополнительно планируется введение схемы цифровой предварительной калибровки и коррекции, компенсирующей ошибку усиления каскадов, а также фоновой цифро-аналоговой калибровки с использованием псевдослучайной последовательности. Фоновая калибровка позволяет корректировать ошибки одновременно с аналого-цифровым преобразованием.

Все операционные транскондуктивные усилители в схеме имеют коэффициент усиления 80 дБ, но различаются нагрузочной способностью (потребляемым током). В составе УВХ и в каскадах 1–4 используются конденсаторы емкостью 0,8 пФ, в каскадах 5–8 – 0,6 пФ, а в каскадах 9–12 – 0,4 пФ (см. рис.4). Поскольку предполагается использовать внешнюю схему цифровой калибровки, то на кристалле АЦП предусмотрены по два вывода с каждого 1,5-битного каскада. С помощью сдвигового регистра в составе БФНВК устранена задержка появления с разных 1,5-битных каскадов выходных сигналов, соответствующих одному выходному сигналу УВХ.

По результатам моделирования потребляемая мощность АЦП составила не более 300 мВт, полоса пропускания операционных усилителей достигает 500 МГц, рабочий диапазон температур от –40 до 85°C.

Кристалл 14-разрядного конвейерного АЦП был изготовлен по технологии с топологическими нормами 180 нм (рис.6). Площадь кристалла составляет 2,8 мм².

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЦП

Для достижения максимальной скорости обработки сигнала в современных системах связи применяют быстродействующие параллельные АЦП. В Центре разработан 8-разрядный параллельный АЦП с частотой дискретизации до 300 МГц. Особенность схемотехнического решения, реализованного в этой микросхеме, заключается в использовании трех компараторов и мажорирующего элемента для формирования каждого разряда термометрического кода Y (рис.7), благодаря чему удается снизить дифференциальную нелинейность.

Кристалл 8-разрядного параллельного АЦП был изготовлен по технологии с топологическими нормами 180 нм (рис.8). Площадь кристалла составила 2 мм².

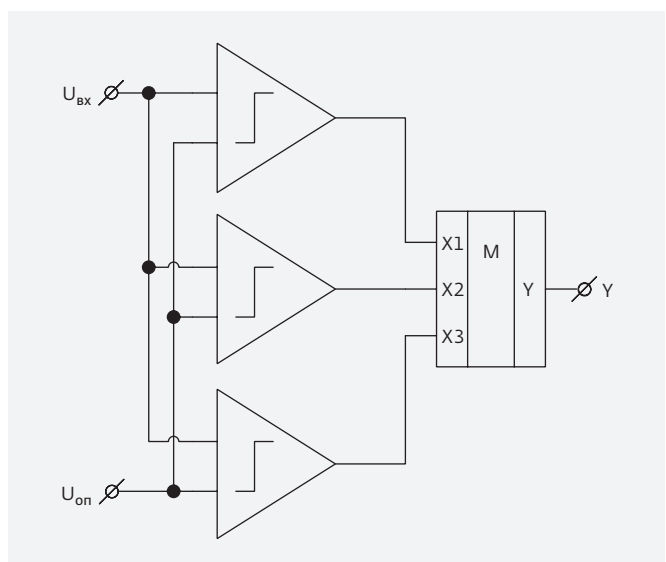


Рис.7. Блок из трех компараторов и мажорирующего элемента

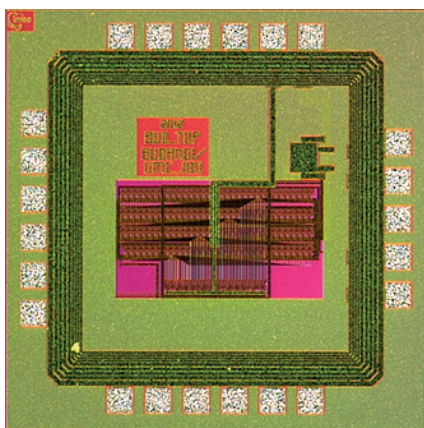


Рис.8. Кристалл параллельного 8-разрядного АЦП

По результатам измерений эффективное число разрядов параллельного АЦП составило не менее 5,3 бит, дифференциальная нелинейность – 0,02 бит, а потребляемая мощность – 112 мВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коротков А.С., Теленков М.В.** Моделирование дельта-сигма модуляторов на переключаемых конденсаторах с учетом линейных и нелинейных свойств элементов // Микроэлектроника. 2007. Т. 36. № 1. С. 66–77.
2. **Коротков А.С., Пилипко М.М., Морозов Д.В., Хауэр Й.** Дельта-сигма модулятор с частотой дискретизации 50 МГц на основе 0.18 мкм КМОП технологии // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. № 3. С. 230–240.
3. **Морозов Д.В., Пилипко М.М., Пятак И.М.** Двухразрядный параллельный преобразователь для конвейерного АЦП // Сб. трудов V Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем". – М.: ИППМ РАН, 2012. С. 350–355.
4. **Morozov D.V., Pilipko M.M., Piatak I.M.** A 6-bit CMOS inverter based pseudo-flash ADC with low power consumption. – Proc. East-West Design & Test Symposium 2013, Rostov, Russia, 27–30 September, 2013, pp. 1–4.
5. **Piatak I.M., Morozov D.V., Hauer J.** An inverter-based 6-bit pipelined ADC with low power consumption. – Proc. of IEEE EuroCon 2013, Zagreb, Croatia, 1–4 July, 2013, pp. 1951–1954.
6. **Piatak I., Morozov D., Pilipko M.** Digitally Assisted Low-Power Pipelined Analog-to-Digital Converters. – Proc. of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, St. Petersburg, Russia, 2–4 February, 2015, pp. 227–229.
7. **Piatak I.M., Pilipko M.M., Morozov D.V.** A 14-bit 50-MS/s pipelined analog-to-digital converter with digital error calibration. – Proc. of the 11th International Siberian Conference on Control and Communications, Omsk, Russia, 21–23 May, 2015, pp. 1–5.

КРЕМНИЕВЫЕ ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ

(функциональный аналог - фотодиоды ф. «Hamamatsu»)

Кремниевые лавинные фотодиоды КОФ101А, КОФ101А1, КОФ101А2, КОФ101Б, КОФ101Б1, КОФ101Б2, КОФ101В, КОФ101В1 работают в диапазоне длин волн, λ , от 0,4 мкм до 1,1 мкм

Основные характеристики:

- рабочее напряжение, U – порядка 300 В
- максимум спектральной фоточувствительности, λ_s – от 0,82 до 0,88 мкм
- коэффициент умножения, M – порядка 100
- чувствительность к световому потоку, S – от 0,1 до 0,75 А/Вт

Область применения:

- оптическая локация и дальнометрия
- регистрация ионизирующих излучений
- в качестве современной альтернативы фотоэлектронным умножителям

Диаметр активной области фотодиодов КОФ101А, КОФ101А1, КОФ101А2 - 1200 мкм, фотодиодов КОФ101Б, КОФ101Б1, КОФ101Б2 – 500 мкм, фотодиодов КОФ101В, КОФ101В1 – 200 мкм.

Таблица 1 - Электрические параметры фотодиодов при $T_a = 25^\circ\text{C}$

| Условное обозначение фотодиода | Наименование параметра, единица измерения | Буквенное обозначение | норма | | Режим измерения |
|----------------------------------|---|-----------------------|----------|-------------------|--|
| | | | не менее | не более | |
| КОФ101А КОФ101А1 | Напряжение лавинного пробоя, В | U_b | 200 | 450 | $I_b = 100 \text{ мкА}$ |
| КОФ101А2 | | | | | |
| КОФ101Б КОФ101Б1 КОФ101Б2 | Коэффициент температурного изменения напряжения лавинного пробоя, В/ $^\circ\text{C}$ | k_{ur} | 0,8 | 2,5 | – |
| КОФ101В КОФ101В1 | Максимальный темновой ток, А | I_d | – | $2 \cdot 10^{-7}$ | $U = 0,1U_b$ |
| КОФ101А КОФ101Б КОФ101В | Коэффициент умножения | M | 30 | – | $U = 0,9U_b + U_b$ |
| КОФ101А1 КОФ101Б1 КОФ101В1 | | | 60 | – | |
| КОФ101А2 КОФ101Б2 | | | 100 | – | |
| КОФ101А КОФ101А1 КОФ101А2 | Чувствительность к световому потоку, А/Вт | S | 0,40 | 0,75 | $U = 0 \text{ В},$ $M = 1, \lambda = \lambda_s$ |
| КОФ101Б КОФ101Б1 КОФ101Б2 | | | 0,25 | 0,55 | |
| КОФ101В КОФ101В1 | | | 0,10 | 0,30 | |

Таблица 2 - Предельно допустимые значения электрических режимов эксплуатации фотодиодов

| Наименование режима эксплуатации, единица измерения | Буквенное обозначение | Норма |
|---|-----------------------|-------|
| Максимально допустимое напряжение, В | U_{max} | U_b |
| Максимально допустимый темновой ток, мА | I_{dmax} | 1 |

Таблица 3 - Справочные значения электрических параметров

| Наименование параметра, единица измерения, режим измерения | Буквенное обозначение параметра | Норма параметра | |
|---|---------------------------------|-----------------|----------|
| | | не менее | не более |
| Емкость, пФ при $U = 0,1 U_b$ В | C | 2 | 40 |
| Квантовая эффективность, % при $\lambda = \lambda_s$ $M = 1$ | QE | 50 | – |
| Эквивалентная мощность шума, нВт | NEP | – | 20 |
| Частота отсечки, МГц при $R = 1 \text{ кОм}$ | f_c | 1 | 50 |



Рисунок 1 - Габаритные размеры корпуса КТ-1-2

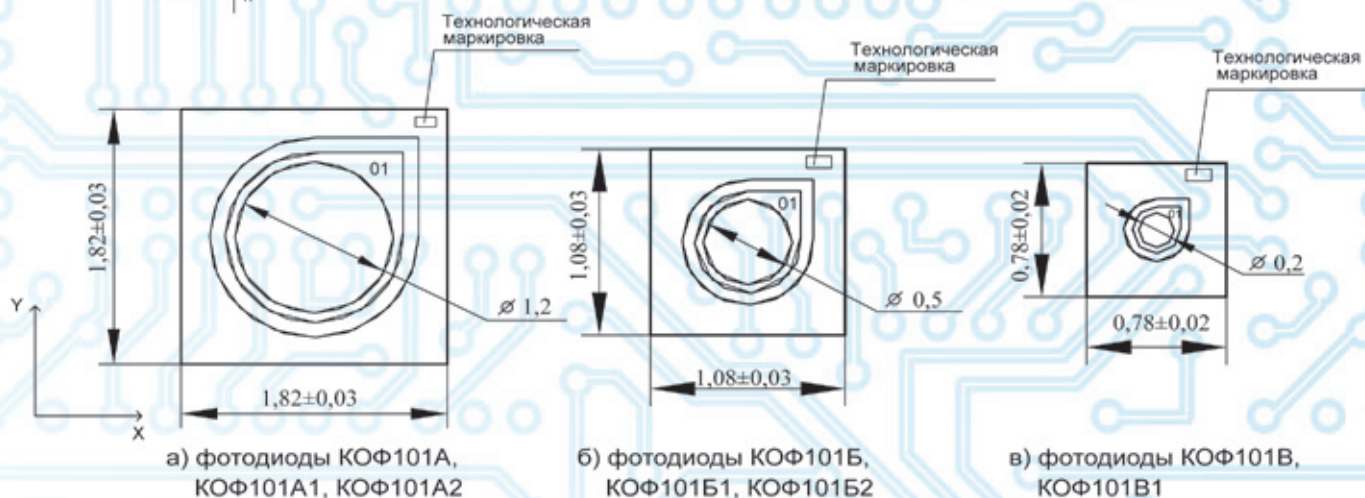


Рисунок 2 – Внешний вид кристаллов

Таблица 4 – Толщина кристалла, технологическая маркировка, координаты технологической маркировки

| Условное обозначение фотодиода | Толщина кристалла, мм | Технологическая маркировка | Координаты технологической маркировки (левый нижний угол) | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|---|-------|
| | | | X, мм | Y, мм |
| КОФ101А, КОФ101А1, КОФ101А2 | 0,40±0,01 | LFD | 1,670 | 1,710 |
| КОФ101Б, КОФ101Б1, КОФ101Б2 | | | 0,965 | 0,990 |
| КОФ101В, КОФ101В1 | | | 0,660 | 0,690 |

Таблица 5 – Координаты контактных площадок

| Условное обозначение фотодиода | Номер контактной площадки | Координаты контактной площадки (правый верхний угол) | |
|--------------------------------|---------------------------|--|-------|
| | | X, мм | Y, мм |
| КОФ101А, КОФ101А1, КОФ101А2 | 01 | 1,325 | 1,325 |
| | 02 | Обратная сторона кристалла | |
| КОФ101Б, КОФ101Б1, КОФ101Б2 | 01 | 0,717 | 0,717 |
| | 02 | Обратная сторона кристалла | |
| КОФ101В, КОФ101В1 | 01 | 0,461 | 0,461 |
| | 02 | Обратная сторона кристалла | |

Примечание - Координаты даны по слою «Металлизация»

Таблица 6 – Состав и толщина слоев металлизации

| | |
|--|----------------|
| Толщина и состав металла на планарной стороне, мкм | Al 1,0 ± 0,1 |
| Толщина и состав металла на непланарной стороне, мкм | Ti 0,10 ± 0,02 |
| | Ni 0,5 ± 0,1 |
| | Ag 0,6 ± 0,1 |



Филиал
НТЦ «Белмикросистемы»:
Тел. (+375 17) 398 10 54
Факс. (+375 17) 398 10 54
E-mail: markov@bms.by

ул. Казинца И.П., д.121А,
комната 327, г. Минск,
220108, Республика Беларусь

www.integral.by