

## **Электроника**

### **Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах**

*Осинов А.К., кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*

#### **ВЫБОР УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКООМНЫХ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛА**

*Проведено сравнение УПТ с непосредственными связями на МОП – транзисторах с усилителями с преобразованием сигнала на МДП – варикапах. Показана перспективность использования МДП – варикапов в усилителях для высокоомных источников сигнала.*

#### **CHOICE OF AMPLIFIER FOR HIGH-OHMIC SIGNAL SOURCE**

*A comparison of DC-coupled DC amplifiers on MOS transistors with amplifiers converting DC-signals with MIS capacitors. The good outlooks on using MIS capacitors in the amplifiers for high-ohmic signal sources has been shown.*

При исследованиях в области ядерной физики, физики твердого тела, в масс-спектрометрии, при контроле и управлении технологическими процессами с помощью радиоизотопов и во многих других физических системах основная информация заключается в виде токов порядка  $10^{-16}$  А и выше, которые, как правило, меняются достаточно медленно. Источники этих токов обладают очень большим внутренним сопротивлением.

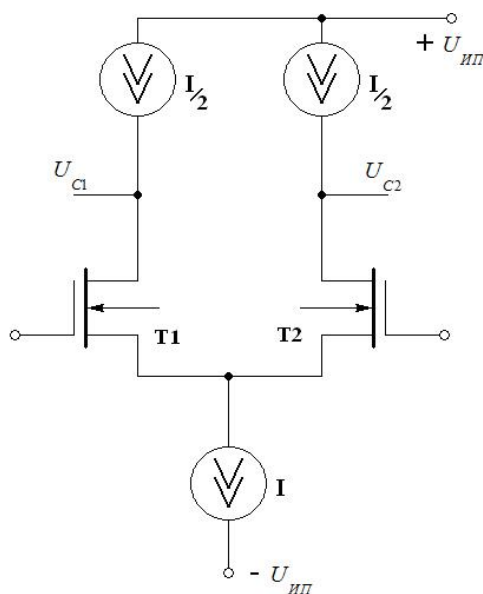
Задачу измерения столь малых токов решают электрометрические усилители постоянного тока (УПТ). Чтобы усилитель не вносил существенных погрешностей в измерения, он должен обладать большим входным сопротивлением и малым входным током.

Малый входной ток усилителя позволяет использовать датчики с высоким выходным сопротивлением. При этом уменьшается потребляемый системой ток, что особенно важно в портативных устройствах и при использовании в измерительной системе большого количества датчиков. Уменьшение входного тока способствует также минимизации погрешности связанной с саморазогревом датчика.

Сформулированные требования к входным сопротивлению и току обеспечиваются как выбором схемы усилителя, так и, хотелось бы это подчеркнуть особо, конструкцией входной части усилителя. В дальнейшем будем сравнивать электрометрические усилители выполненные на полупроводниковых приборах. Подразумевается, что ток измеряется по падению напряжения на навесном эталонном резисторе, точность и стабильность которого определяет погрешность измерения тока.

Усилители постоянного тока, как известно, строятся по схемам с непосредственными связями и по схемам с преобразованием сигнала. Усилители с непосредственными связями используют на входе дифференциальный каскад. Наибольшими входными сопротивлениями и малыми входными токами обладают каскады выполненные по МОП – технологии. Ограничения по этим параметрам связаны с наличием во входных цепях усилителей защитных диодов. Поэтому, для электрометрического усилителя имеет смысл применять транзисторы лишь МОП типа.

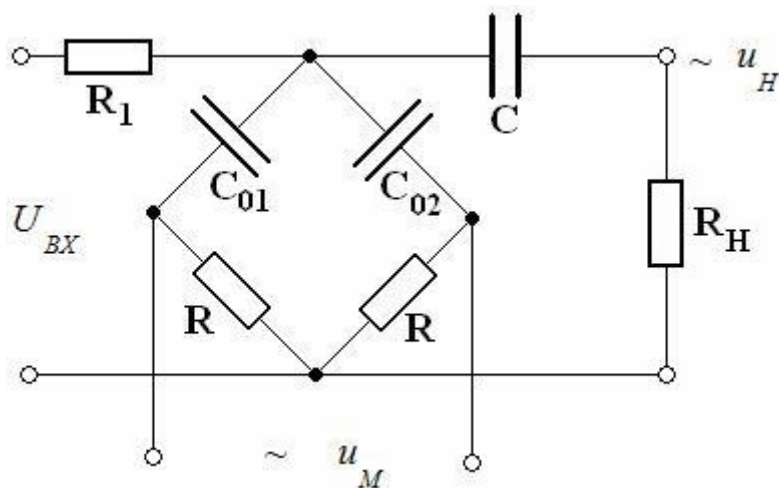
При сравнении различных УПТ одними из главных критериев являются напряжение смещения  $U_{см}$ , его временной и температурный дрейф. Основную долю в  $U_{см}$  усилителя вносит первый каскад. Временной и температурный дрейфы пропорциональны напряжению смещения и связаны, также, со степенью симметричности дифференциального каскада. Симметрия определяется разбросом параметров однотипных элементов каскада, т. е. уровнем технологии производства. На рис. 1 показан пример структуры входного дифференциального каскада на МОП-транзисторах. Для получения максимального усиления в цепях стоков входных транзисторов Т1 и Т2 используются динамические нагрузки – так называемые генераторы тока ( $I/2$ ). Например, в схемах каскадов с КМОП транзисторами нагрузками служат  $p$  – каналные транзисторы. Очевидно  $U_{см} = \frac{U_{c1} U_{c2}}{K_U}$ , где  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  – потенциалы стоков транзисторов Т1 и Т2,  $K_U$  – коэффициент усиления входного (дифференциального) напряжения каскада. Интегральные усилители с напряжением  $U_{см}$  большим 1 мВ относят к усилителям общего применения, а с меньшим 1 мВ – к прецизионным [1]. Пусть, например,  $U_{см} = 1 мВ$ , а  $K_U = 100$ . Тогда  $U_{c1} U_{c2} = 100 мВ$ . Обозначим среднее сопротивление промежутков сток-исток транзисторов Т1 и Т2  $R_{СИ}$ , отклонение от среднего значения сопротивления  $R_{СИ}$ , а напряжение питания  $U_{ИП}$ . Легко найти, что  $\frac{R_{СИ}}{R_{СИ}} = \frac{U_{c1} U_{c2}}{2U_{ИП}}$ . Пологая  $U_{ИП} = 2,5 - 5 В$ , получим, что линейные размеры транзисторов должны быть выполнены с точностью порядка 1–2%.



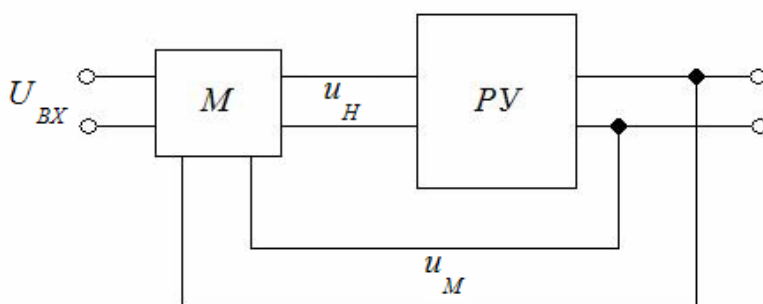
**Рис. 1.** Структура дифференциального каскада на МОП-транзисторах

Дальнейшее уменьшение напряжения смещения обеспечивается автоматической коррекцией нуля [2]. Напряжение смещения и дрейф в схемах с автокоррекцией на несколько порядков меньше по сравнению с «обычными» усилителями. Коррекция уменьшает и низкочастотный шум вида  $1/f$ , который при больших временных интервалах между отсчетами выглядит как погрешность напряжения смещения. Однако схемы управления автокоррекцией сами являются источниками помех во входных цепях усилителей. Типовое значение их входного тока составляет величину порядка 1 пА, что «многовато» для высокочувствительных электрометрических усилителей.

В полупроводниковых схемах УПТ с преобразованием сигнала наибольшее входное сопротивление (и наименьший входной ток) достигается при использовании параметрических модуляторов на варикапах. Пример такого модулятора мостового типа представлен на рис. 2. Здесь  $C_{01}$  и  $C_{02}$  символизируют варикапы. Входное напряжение постоянного тока  $U_{BX}$  подаётся на них через резистор  $R_I$  в одну из диагоналей моста. В другую диагональ моста подаётся напряжение переменного тока  $u_M$ . На нагрузке напряжение переменного тока  $u_H$  пропорционально как  $U_{BX}$  так и  $u_M$ . Очевидно, что входное сопротивление модулятора определяется сопротивлениями постоянному току варикапов. Среди варикапов наибольшим сопротивлением обладают варикапы с МДП-структурой [3–5]. У лучших из них оно достигает  $10^{15}$  Ом [5]. Модуляторы входят как в состав М-ДМ усилителей, так и в автогенераторные УПТ (АВУС) [6]. В АВУС модулятор (М) и резонансный усилитель (РУ) образуют генератор (преобразователь), амплитуда колебаний которого  $u_M$  пропорциональна входному напряжению  $U_{BX}$  (см. рис. 3). Для генерации требуется первоначальный разбаланс моста модулятора. Разбаланс соответствует некоторому эквивалентному входному напряжению постоянного тока. Его, очевидно, можно считать напряжением смещения. Оценим величину  $U_{CM}$ .



**Рис. 2.** Схема мостового модулятора на варикапах



**Рис. 3.** Схема преобразователя автогенераторного усилителя

Используя рис. 2, находим напряжение на нагрузке модулятора, т. е. напряжение на входе резонансного усилителя  $u_H = \frac{K_C U_{BX}}{C_{01} C_{02}} u_M$ . Значения емкостей  $C_{01}$ ,  $C_{02}$  и коэффициент  $K_C$

определяются из вольт-фарадной характеристики варикапов  $C = C_0 - K_C U_{ВХ}$ . Заметим, что  $C_{01} = C_{02} = 2C_0$ . Связь между  $u_H$  и  $u_M$  определяется из условия самовозбуждения генератора:

$\frac{u_M}{u_H} = K_Y$ , где  $K_Y$  – коэффициент усиления резонансного усилителя. Отсюда следует, что

$U_{CM} = \frac{u_H}{u_M} \frac{2C_0}{K_C} = \frac{2C_0}{K_Y K_C}$ . Отношение  $\frac{K_C}{C_0}$  для МДП-варикапов составляет  $(5 - 10)B^{-1}$  [4, 5].

Если принять  $K_Y = 200$ , то  $U_{CM}$  может быть порядка  $1mB$ , то есть не хуже, чем у УПТ с непосредственными связями на МОП – транзисторах

Наиболее подходящими для электрометрических усилителей до сих пор являются варикапы с окислом кремния [5]. Следует отметить простоту технологии их изготовления. Для них использовались кремниевые пластины  $p$ -типа, полученные в типовых заводских условиях. Толщина окисного слоя составляла 10–20 нм. Плотность суммарного заряда в пленке диэлектрика и на границе диэлектрика и полупроводника снижена до  $10^{10} \text{см}^{-2}$ , что обеспечивает долговременную и температурную стабильность вольт-фарадной характеристики варикапов.

Реализация преимуществ УПТ с большим входным сопротивлением и малым входным током возможна лишь при принятии мер по уменьшению токов утечки во входной цепи электрометрических усилителей. Для этого необходимо использовать высококачественные изоляционные материалы, применять охранные кольца и т. п. Целесообразно варикапный мост изготавливать в виде отдельного микроузла. Габариты усилителя при этом увеличиваются незначительно.

Таким образом, использование во входной цепи электрометрического усилителя МДП-варикапов может обеспечить ему необходимые метрологические качества сравнимые с качествами технологически более сложных интегральных усилителей на МОП-транзисторах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Штрапенин Г.Л. Современные операционные усилители фирмы National Semiconductor // Компоненты и технологии, 2005, № 7, с. 46–51.
2. Нолан Эрик. Усилители с автоматической коррекцией нуля: без мистики. // [www.analog.com.ru / Public/AZA1.pdf](http://www.analog.com.ru/Public/AZA1.pdf).
3. Рожков В.А., Трусова А.Ю. Кремниевые металл-диэлектрик-полупроводник варикапы с диэлектриком из оксида иттербия // Письма в ЖТФ, 1997, том 23, № 12, с. 50.
4. Рожков В.А., Родионов М.А. Электрофизические свойства структур металл-оксид эрбия-кремний // Вестник Сам ГУ. Естественнонаучная серия. Второй спец. выпуск, 2004, с. 94.
5. Медведев В.В., Осипов А.К., Шоботенко С.А. // Автогенераторный электрометрический усилитель с МДП-варикапами // ПТЭ, 1978, № 3, с. 146 .
6. Певзнер В.В., Полонников Д.Е. Усилители постоянного тока с управляемыми генераторами. М.: Энергия 1970, 288 с.