

Полевой транзистор — линейный и нелинейный резистор

Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом были теоретически обоснованы в 1952 г. Тогда они назывались униполярными полевыми транзисторами. Им были свойственны лучшие качества электронных ламп: высокое входное сопротивление, подача отрицательного напряжения смещения на управляющий электрод (затвор), малый уровень шумов. Однако имелись и недостатки: низкие рабочие напряжения, большой разброс параметров.

В полевом транзисторе с р-п переходом затвором является слой полупроводника, тип проводимости которого (р-тип) противоположен типу проводимости канала (п-тип). Управляющий р-п переход, обратный смещенный относительно канала, осуществляет воздействие на размеры и, соответственно, проводимость канала полевого транзистора. Увеличение отрицательного потенциала вызывает сужение канала, уменьшающее его проводимость, и наоборот.

Нормальный режим работы полевого транзистора с каналом п-типа обеспечивается подачей отрицательного смещения на затвор и положительного напряжения на сток. Другой разновидностью полевого транзистора с р-п переходом является транзистор с каналом р-типа. Он отличается полярностью подаваемых напряжений (рис. 1). Наиболее распространенным в радиолюбительских схемах типом транзистора с р-п переходом и каналом р-типа является КП103, а с каналом п-типа — КП303.

Графики вольт-амперных характеристик полевого транзистора с управляющим р-п переходом показаны на рис. 1. На нем наглядно представлены графические значения его основных параметров. Рассмотрим их.

Ток насыщения в цепи стока транзистора (или начальный ток стока — $I_{Cнач}$), включенного по схеме с общим истоком, при $U_{ЗИ} = 0$ характерен лишь для полевого транзистора с управляющим р-п переходом.

Ток стока в другой рабочей точке можно рассчитать по формуле:

$$I_C = I_{Cнач} (1 - U_{ЗИ}/U_{ОТС})^2,$$

где $U_{ОТС}$ — напряжение отсечки.

Приведенное уравнение является приближенным для характеристики передачи любого полевого транзистора. Значение показателя степени у реальных полевых транзисторов имеет разброс от 1,5 до 2,5 и объясняется конструктивно-технологическими различиями.

Напряжение отсечки $U_{ОТС}$

— один из основных классификационных параметров. При напряжении на затворе, численно равном напряжению отсечки, канал полевого транзистора практически полностью перекрывается, и ток стока при этом стремится к нулю.

Измерение истинного значения напряжения отсечки (при полном перекрытии канала) произвести довольно трудно, так как при этом приходится иметь дело с чрезвычайно малыми токами стока, зависящими к тому же от сопротивления изоляции. В справочных данных на полевые транзисторы всегда указывается, при каком значении тока стока произведены измерения напряжения отсечки. Например, для транзисторов КП102 напряжения $U_{ОТС}$ регламентируются при токе стока 20 мкА.

Входное сопротивление полевого транзистора с р-п переходом со стороны управляющего электрода составляет $10^7 \dots 10^9$ Ом. Так как входные токи весьма малы, то управление током нагрузки осуществляется входным напряжением. Поэтому усилительные свойства полевых транзисторов, как и электронных ламп, целесообразно характеризовать **крутизной характеристики (S)**.

Крутизна характеристики полевого транзистора при $U_{СИ} = \text{const}$:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$$

Максимальное значение крутизны характеристики $S_{МАКС}$ наблюдается при $U_{ЗИ} = 0$.

Крутизна характеристики у полевых транзисторов на 1–2 порядка меньше, чем у биполярных, поэтому при малых сопротивлениях нагрузки коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе меньше коэффициента усиления аналогичного каскада на биполярном транзисторе.

Выражение для крутизны характеристики полевого транзистора в рабочей точке выглядит так:

$$S = S_{МАКС} (1 - U_{ЗИ}/U_{ОТС})^2,$$

где $U_{ЗИ}$ — напряжение между затвором и истоком, при котором определяется S.

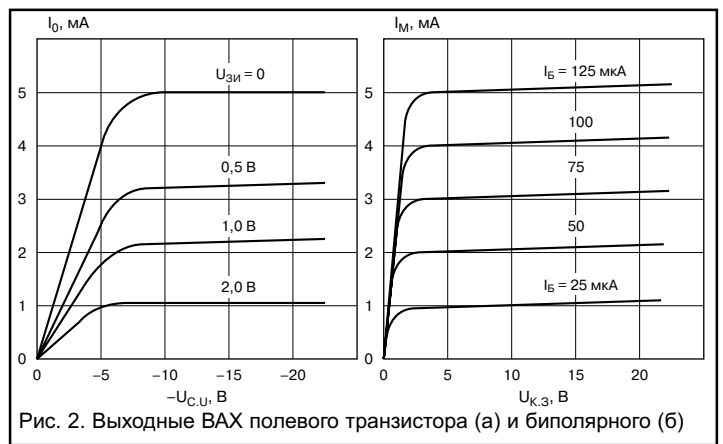


Рис. 2. Выходные ВАХ полевого транзистора (а) и биполярного (б)

Полезно помнить практическое соотношение $S_{МАКС} = 2I_{Cнач}/U_{ОТС}$. Оно позволяет по двум известным параметрам определить третий.

Выходные ВАХ полевого транзистора (рис. 2, а) и биполярного транзистора (рис. 2, б) отличаются. На начальном участке зависимости (при малых значениях $U_{СИ}$) крутые (рис. 3), и сопротивление канала полевого транзистора пропорционально зависит от $U_{СИ}$. В таком режиме полевой транзистор используется в схемах управляемых делителей (аттенюаторов), а также аналоговых ключей.

При больших значениях $U_{СИ}$ выходные характеристики полевого транзистора имеют более пологий наклон, что соответствует большому выходному сопротивлению. Полевой транзистор, как

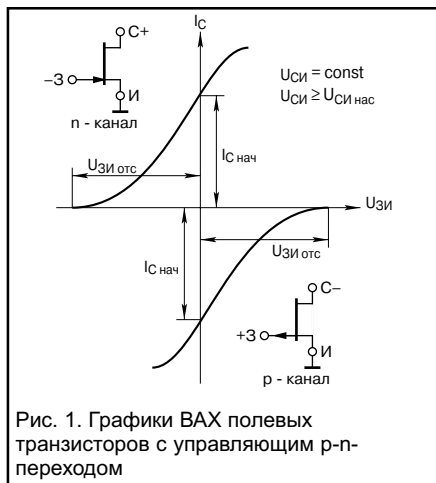


Рис. 1. Графики ВАХ полевых транзисторов с управляющим р-п переходом

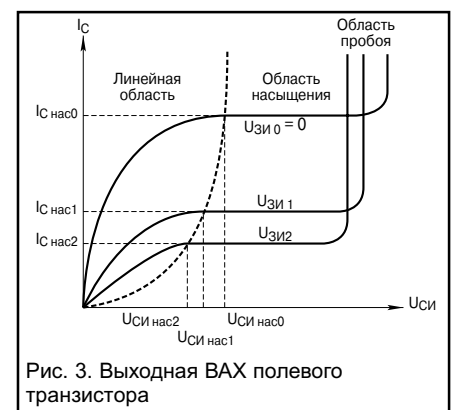


Рис. 3. Выходная ВАХ полевого транзистора

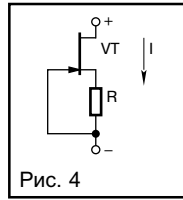


Рис. 4

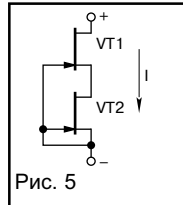


Рис. 5

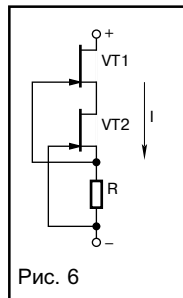
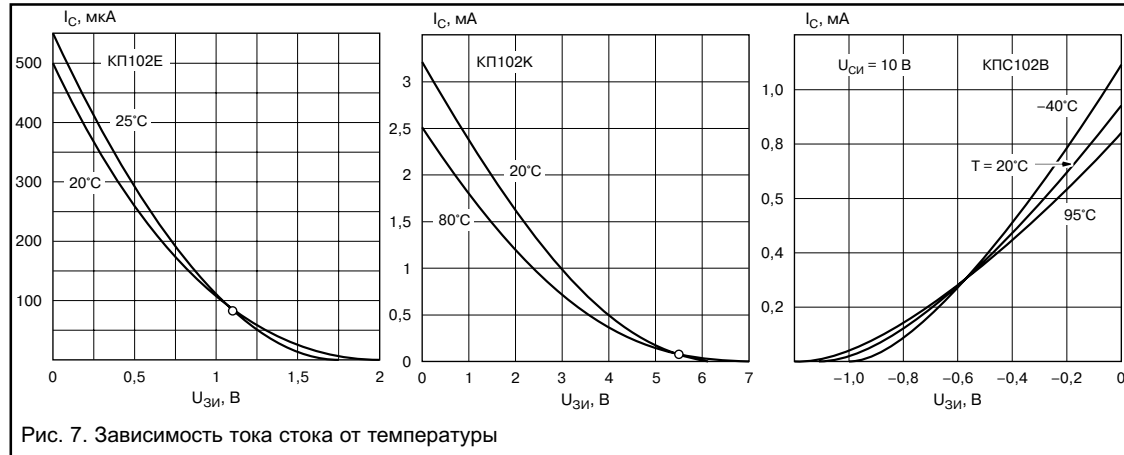


Рис. 6

и биполярный, при неизменном напряжении смещения на управляющем электроде обеспечивает в выходной цепи почти неизменный стабильный постоянный ток. Это свойство широко используется в схемах каскодных усилителей и схемах стабилизации тока. На них мы и остановимся подробнее.

Токостабилизирующие свойства полевого транзистора определяются выходными ВАХ. Практическая ценность полевых транзисторов заключается в том, что максимум два элемента, транзистор и резистор, образуют токостабилизирующий двухполюсник (рис. 4), который можно включать в любую цепь схемы. Выходное дифференциальное сопротивление такого двухполюсника может достигать десятков и сотен килоом. Недостаток схем стабилизации тока на полевых транзисторах — высокое значение минимального напряжения стабилизации — с лих-



вой компенсируется простотой схемотехники.

Кроме того, можно существенно повысить параметры токостабилизирующих двухполюсников на полевых транзисторах, соединив два транзистора (рис. 5, 6). В таких схемах выходное дифференциальное сопротивление может достигать величины в несколько МОм.

Существенным недостатком полевого транзистора и схем на его основе является зависимость параметров от температуры (рис. 7). Как видно, ток стока уменьшается с ростом температуры, но определенным выбором рабочей точки его температурный уход можно снизить. Однако такая термостабильная точка всего одна, да и величина рабочего тока стока мала — всего около 0,1...0,2 мА.

Вторая термостабильная точка полевого транзистора реализуется в схеме на рис. 8. Вместо резистора смещения для увеличения значения термостабильного тока стока между затвором и истоком включен двухполюсник опорного элемента на транзисторах. Величина стабильного в диапазоне температур тока составляет около 2...2,5 мА,

что существенно выше, чем в предыдущем случае и приемлемо во многих схемных решениях. Кроме того, в такой схеме имеется возможность устанавливать желаемую величину температурного ухода тока стока путем выбора соотношения резисторов R1 и R2.

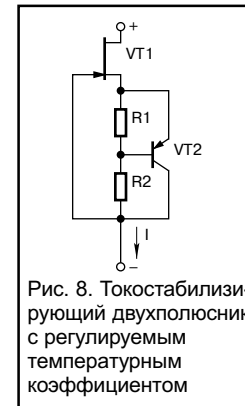


Рис. 8. Токостабилизирующий двухполюсник с регулируемым температурным коэффициентом

Игорь Кольцов,
editor@dian.ru

Литература

1. В. М. Петухов и др., *Транзисторы полевые*. — М.: Сов. Радио, 1978.
2. А. Г. Милехин, *Радиотехнические схемы на полевых транзисторах*. — М.: "Энергия", 1976.
3. А. С. 783771 (СССР). *Стабилизатор постоянного тока*. Опубликовано в БИ, 1980, №44.