

ОСОБЕННОСТИ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

А. В. Каримов, Д. М. Ёдгорова, Б. М. Каманов, Д. Р. Джураев, А. А. Тураев
Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» АН РУз, Ташкент

Поступила в редакцию 18.01.2015

В полевом транзисторе с динамической нагрузкой в двухполюсном режиме включения, когда электрическое поле подается на переход сток-затвор (исток соединен к затвору) можно получить на два порядка больший коэффициент усиления в отличие от известной схемы с общим истоком. Чем ближе рабочая точка к режиму отсечки канала, тем выше коэффициент усиления по напряжению.

Ключевые слова: полевой транзистор; динамическая нагрузка; коэффициент усиления; двухполюсный режим включения.

ОСОБЛИВОСТІ ПІДСИЛЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА В СХЕМІ З ДИНАМІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

А. В. Карімов, Д. М. Ёдгорова, Б. М. Каманов, Д. Р. Джураєв, А. А. Тураєв

У польовому транзисторі з динамічним навантаженням у двополюсному режимі включення, коли електричне поле подається на перехід стік-затвор (витік з'єднаний до затвору) можна отримати на два порядки вищий коефіцієнт посилення на відміну від відомої схеми із загальним витоком. Чим ближче робоча точка до режиму відсічення каналу, тим вище коефіцієнт посилення за напругою.

Ключові слова: польовий транзистор; динамічне навантаження; коефіцієнт підсилення; двополюсний режим включення.

FEATURES AMPLIFYING PROPERTIES OF A FIELD EFFECT TRANSISTOR IN THE CIRCUIT WITH DYNAMIC LOAD

A. V. Karimov, D. M. Iodgorova, B. M. Kamanov, D. R. Dzhuraiev, A. A. Turaiev

In the field-effect transistor with dynamic load at bipolar connection mode, when an electric field is applied to the drain-gate junction (source connected to the gate) can be obtained two orders of magnitude higher gain in contrast to the known circuit with a common source. The closer the operating point to the pinch-off of the channel, the higher the voltage gain.

Keywords: field-effect transistor; dynamic load; gain; bipolar connection mode.

ВВЕДЕНИЕ

Усилители звуковой частоты являются самыми распространенными видами усилителей. В них основной проблемой является устранение асимметрии усиливаемого полезного сигнала, особенно при снижении уровня сигнала. Для улучшения усилительных свойств усилителей низкой частоты чаще стали использовать полевые транзисторы в каскадном режиме включения, а также приемы непосредственного (составного) соединения двух полевых транзисторов, которые позволяют получить сочетание лучших свойств

полевых и биполярных транзисторов [1, 2]. Известные работы в основном посвящены разработке усилителей с различными режимами включения, обеспечивающими требуемые параметры усилительного каскада [3, 4, 5]. Однако проблемам исключения искажений и увеличения коэффициента усиления посвящено ограниченное количество работ.

В настоящей работе приведены результаты исследования полевого транзистора в двухполюсном режиме включения с динамической нагрузкой, когда электрическое

поле подается на переход сток-затвор (исток соединен к затвору), как усилителя переменных сигналов.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Выбранные для проведения исследований полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом получены на подложках кремния p^+ -типа проводимости с концентрацией носителей $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, толщиной 200 мкм. Канал n -типа проводимости сформирован эпитаксиальным наращиванием плёнки с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ толщиной 1–2 мкм. Они являются аналогами эпитаксиально-планарного полевого транзистора типа КП303 [6]. Выбор конструкции полевого транзистора типа КП303 обусловлен тем, что они имеют малые емкости, а напряжения отсечки лежат в широком диапазоне напряжений, от 0,5 до 2,5 В.

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Для увеличения глубины модуляции канала, как было показано в работе [7], рабочее напряжение целесообразно подавать не к каналу, рис. 1а, а к переходу сток-затвор, когда исток соединяется к затвору через резистор, рис. 1б.

При этом осуществляется одновременная продольная и поперечная модуляция канала слоем объемного заряда и увеличивается выходное динамическое сопротивление, приводя к ярко выраженному насыщению тока стока.

В данной схеме постоянное напряжение $U_{R3-и}$, падающее на сопротивлении, задает ток стока, а входной сигнал от генератора звуковых сигналов ГЗ-109 через конденсатор подается к истоку (рис. 1б). Усиленный выходной сигнал снимается с динамического сопротивления, величина которого зависит от амплитуды сигнала на стоке рабочего транзистора. По постоянному току каналы обоих транзисторов включены последовательно, что приводит к большей модуляции канала от входного сигнала по сравнению, чем в схеме с общим истоком. В предлагаемом принципе модуляции канала (рис. 1б) получен на два порядка больший коэффициент усиления (3500) для малых сигналов (1 мВ) по сравнению с классическими способами включения с общим истоком (рис. 1а) [3, 4].

Для заданного частотного диапазона 400 Гц и входного сигнала 2 мВ с увеличением величины сопротивления соединяющего затвор к истоку от 0,43 кОм до 40 кОм коэффициент усиления синусоидального сигнала увеличился от 400 до 3500 (табл. 1), что на два порядка больше по сравнению,

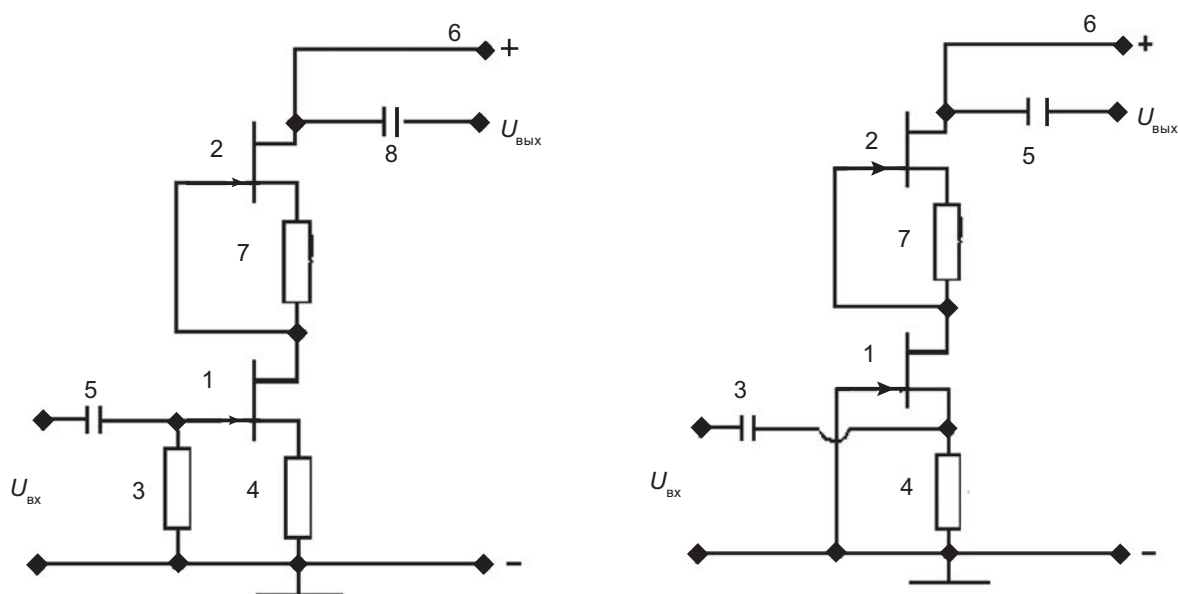


Рис. 1. Схемы усилителей с динамической нагрузкой

**Данные выходного сигнала и коэффициента усиления
при различных сопротивлениях соединяющих истоков с затвором**

$F = 400 \text{ Гц}, U_{\text{вх}} = 2 \text{ мВ}$								
$R_{\text{и-з}}$, кОм	0,43	1,0	3,0	5,0	10	20	30	40
$U_{\text{зи}}$, В	0,377	0,531	0,710	0,778	0,853	0,911	0,938	0,955
$I_{\text{си}}$, мкА	878	531	236	155	85	45,5	31	23
$U_{\text{вых}}$, В	0,8	1,0	2,0	2,4	3,2	5,0	6,0	7,0
$K_{\text{ус}}$	400	500	1000	1200	1800	2500	3000	3500

чем ($K_{\text{ус}} = 5$) в экономичном трехкаскадном усилителе [3].

Наблюдаемое увеличение коэффициента усиления обусловлено с увеличением толщины обедненного слоя истоковой части за счет повышения напряжения снимаемого с резистора, что приводит к увеличению глубины модуляции базовой области. При этом по мере увеличения величины сопротивления напряжение на переходе затвор-исток увеличивается от $-0,377 \text{ В}$ до $-0,955 \text{ В}$, а ток стока уменьшается от 878 мкА до 23 мкА . При этом происходит линеаризация передаточной характеристики, то есть увеличение крутизны при малых токах стока, рис. 2, кривая 2, приводя к большему усилению по сравнению со схемой с общим истоком.

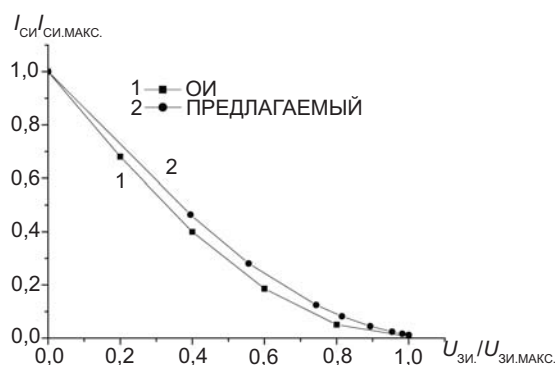


Рис. 2. Передаточные характеристики в нормированном виде для транзисторного и двухполюсного включения полевого транзистора

МЕХАНИЗМ ЭФФЕКТА ВЫСОКОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Как показали исследования, создание различия величин сопротивлений перехода затвор-исток усилительного или динамического транзисторов приводит к уменьшению

выходного сигнала. Так, при уменьшении сопротивления динамического транзистора выходной сигнал уменьшается с последующим увеличением среза верхней половины выходного сигнала, а при увеличении — также уменьшается выходной сигнал с последующим увеличением среза нижней половины импульса выходного сигнала. В случае равенства сопротивлений образованных двухполюсных структур ток первого транзистора будет равен току второго транзистора $I_{\text{си}}^1 \approx I_{\text{си}}^2$, и относительно данного значения тока имеем изменение тока стока $\Delta I_{\text{си}}^1$, приводящее к формированию выходного напряжения. Однако нарушение баланса сопротивлений приводит к тому, что двухполюсник с увеличенным сопротивлением начинает ограничивать ток двухполюсника с меньшим сопротивлением, что приводит как к уменьшению выходного сигнала, так и к искажению его формы.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как приведено на рис. 1б в предлагаемой схеме усилителя с динамической нагрузкой один и тот же ток проходит через каналы и смещающие резисторы. Поэтому по мере увеличения величины сопротивления $R_{\text{и-з}}$, соединяющего затвор на исток напряжение, падающее на нем, будет увеличиваться, что приведет к уменьшению тока стока [3]

$$I_{\text{си}} = \frac{U_{\text{отс}}}{R_{\text{и-з}}} + \frac{U_{\text{отс}}^2}{2R_{\text{и-з}}^2 I_{\text{си.макс}}} \left(1 - \sqrt{\frac{4I_{\text{си.макс}} R_{\text{и-з}}}{U_{\text{отс}}} + 1} \right) \quad (1)$$

и соответственно будем иметь напряжение, падающее на сопротивлении исток-затвор $R_{и-з}$

$$U_{зи} = I_{си} R_{и-з}. \quad (2)$$

Экспериментальные зависимости тока стока от величины сопротивления $R_{и-з}$ и рассчитанные по формуле (1) кривые принимают близкие значения по мере приближения экономичного режима, рис. 3.

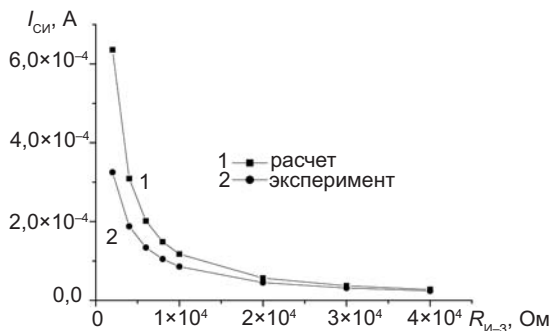


Рис. 3. Зависимости тока стока от смещающего сопротивления исток-затвор

В тоже время экспериментально измеренное значение тока стока для заданного сопротивления 20 кОм при напряжении на стоке 4,3 В на первом транзисторе составило 45,58 мкА, а падающее напряжение на сопротивлении $R_{и-з}$ оказалось равным 0,91 В. По мере увеличения сопротивления на переходах исток-затвор будут расширяться толщины обедненных слоев истоковой и стоковой частей, включая сечение канала (рис. 4).

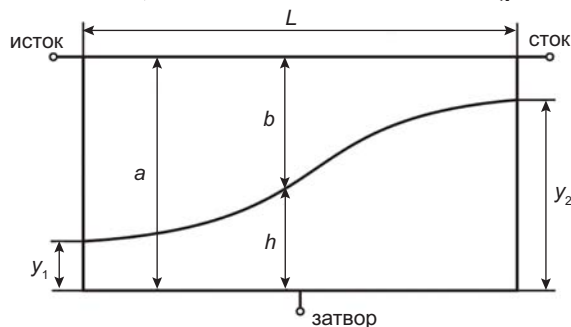


Рис. 4. Сечение канала полевого транзистора

Толщина обедненного слоя у истока будет равна y_1 при $x = 0$, а у стока y_2 при $x = L$ [8]; — x — расстояние от истока

$$y_1 = [2\epsilon\epsilon_0(U_{зи} + U_D)/qN_{кан}]^{1/2}. \quad (3)$$

Соответственно напряжение отсечки наступит при толщине обедненного слоя $y_1 = a$

$$U_{отс} = U(y_1 = a) \equiv qN_{кан} a^2 / 2\epsilon\epsilon_0 = U_D + U_{отс}^{зн}, \quad (4)$$

где — $U_{отс}^{зн}$ напряжение, приложенное от источника к переходу затвор-исток в режиме отсечки (1 В).

Заметим, что напряжение на переходе исток-затвор необходимое для полного перекрытия канала можно принять равным напряжению отсечки. По экспериментальным данным его значение равно 1,64 В. Для напряжения 1,64 В расчет по формуле (3) дает толщину обедненного слоя 1,04 мкм, а для падающего напряжения 0,9 В получается 1,01 мкм. При этом, у истоковой части остается непокрытой 0,03 мкм при исходной толщине обеднения $W_0 = 0,65$ мкм определяемой диффузионным потенциалом.

$$W_0 = [2\epsilon\epsilon_0(U_D)/qN_{кан}]^{1/2} \quad (5)$$

То есть, для заданного сигнала ΔU модуляция оставшейся части толщины 0,03 мкм будет эффективнее, чем 0,35 мкм для нулевого смещения на затворе.

Таким образом, экспериментально показано, что на полевом транзисторе в режиме двухполюсного включения с динамической нагрузкой на полевом транзисторе можно исключить искажения полезного сигнала и получить высокий коэффициент усиления по напряжению путем подбора смещающих сопротивлений исток-затвор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В полевом транзисторе в двухполюсном режиме включения, когда электрическое поле подается на переход сток-затвор (исток соединен к затвору) можно получить высокий коэффициент усиления (на два порядка больше) в отличие от транзисторного включения. Экспериментально установлено, что оптимальным для получения выходного сигнала без искажений является выбор одинакового потенциала на переходе исток-затвор для основного и нагрузочного транзисторов. Чем ближе рабочая точка к режиму отсечки канала, тем выше коэффициент усиления по напряжению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Patent USA US 6750698 B1 Jun, 15, 2004. Cascade circuits utilizing normally — of junction

- field effect transistors for low on-resistance and low voltage applications. <http://www.freepatentsonline.com/6750698.html>
2. Wes Hayward and Jeff Damm. The Hybrid Cascode — A General Purpose AGC IF Amplifier, 2007 — P. 33–37.
 3. Милехин А. Г. Радиотехнические схемы на полевых транзисторах.— М.: Энергия, 1976. — С. 15–29.
 4. Corina M. D., Corina D. C., Gabriel N. P., Angela I. Study of low signal amplifier with field effect transistors // Acta technica corviniensis-bulletin of engineering. — 2009. — Vol. 1. — P. 59–66.
 5. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. Long Channel Field Effect Transistor with Short Channel Transistor Properties // Semiconductors ©Pleiades Publishing, Ltd. — 2014. — Vol. 48, — No. 4. — P. 481–486.
 6. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Под редакцией Н. Н. Горюнова. — М.: Энергия, 1976. — С. 411–413.
 7. Каримов А. В., Джураев Д. Р., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Абдулхаев О. А., Каманов Б. М., Тураев А. А. Некоторые особенности ограничителя тока на полевом транзисторе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 1. — С. 30–32.
 8. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken–New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. — 94 p.

LITERATURA

1. Patent USA US 6750698 B1 Jun,15, 2004. Cascade circuits utilizing normally — of junction field effect transistors for low on-resistance and low voltage applications. <<http://www.freepatentsonline.com/6750698.html>>
2. Wes Hayward and Jeff Damm. The Hybrid Cascode — A General Purpose AGC IF Amplifier, 2007 — P. 33–37.
3. Milehin A. G. Radiotekhnicheskie shemy na polevyh tranzistorah.— М.: Energiya, 1976. — P. 15–29.
4. Corina M. D., Corina D. C., Gabriel N. P., Angela I. Study of low signal amplifier with field effect transistors // Acta technica corviniensis-bulletin of engineering. — 2009. — Vol. 1. — P. 59–66.
5. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. Long Channel Field Effect Transistor with Short Channel Transistor Properties // Semiconductors ©Pleiades Publishing, Ltd. — 2014. — Vol. 48, — No. 4. — P. 481–486.
6. Spravochnik po poluprovodnikovym diodam, tranzistoram i integral'nym shemam / Pod redakciej N. N. Goryunova. — М.: Energiya, 1976. — P. 411–413.
7. Karimov A. V., Dzhuraev D. R., Edgorova D. M., Rahmatov A. Z., Abdulkhaev O. A., Kamano B. M., Turaev A. A. Nekotorye osobennosti ogranichitelya toka na polevom tranzistore // Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. — 2011. — No. 1. — P. 30–32.
8. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken–New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. — P. 94.