

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА НАСЫЩЕНИЯ ТОКА СТОКА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ КАНАЛАМИ

А.В. Каримов, Д.М. Ёдгорова, О.А. Абдулхаев, Э.Н. Якубов,
Ш.Ш. Юлдашев, А.А. Тураев

Физико-технический институт НПО "Физика-Солнце" АН РУз (Ташкент)
Узбекистан

Поступила в редакцию 26.08.2012

Приведены результаты исследования динамической модуляции канала полевого транзистора с помощью второго последовательно соединенного к истоку полевого транзистора выполняющего функцию двойного затвора за счет управляемого изменения перераспределения напряжения в дополнительном управляющем $p-n$ -переходе. Сравнение исходных стоковых характеристик с характеристиками полевого транзистора, управляемого падающим напряжением в канале второго транзистора показало, что предложенный процесс насыщения тока стока обусловленный расширением области объемного заряда по всей ширине затвора подтверждается, обеспечивая ярко выраженное насыщение тока стока и высокое динамическое сопротивление. Экспериментально показано, что коэффициент усиления полевого транзистора имеет на порядок большее значение (70) по сравнению с традиционными включениями с общим истоком (5) или с динамической нагрузкой. Коэффициент усиления становится функцией запирающего напряжения, и его максимальные значения достигаются при запирающем напряжении равном половине напряжения отсечки. Это обусловлено тем, что оба канала транзистора модулируются эффективно до участка напряжения насыщения тока стока. Предложен экспериментальный экспресс метод определения сопротивления канала полевого транзистора.

Ключевые слова: полевой транзистор, насыщение тока стока, режим включения, передаточные характеристики, коэффициент усиления.

Наведено результати дослідження динамічної модуляції каналу польового транзистора за допомогою другого послідовно з'єданого до джерела польового транзистора виконуючого функцію подвійного затвора за рахунок керованої зміни перерозподілу напруги в додатковому керуючому $p-n$ -переході. Порівняння вихідних стокових характеристик із характеристиками польового транзистора, керованого падаючою напругою в каналі другого транзистора показало, що запропонований процес насичення струму стоку обумовлений розширенням області об'ємного заряду по всій ширині затвора підтверджується, забезпечуючи яскраво виражене насичення струму стоку й високий динамічний опір. Експериментально показано, що коефіцієнт підсилення польового транзистора має на порядок більше значення (70) у порівнянні із традиційними включеннями із загальним джерелом (5) або з динамічним навантаженням. Коефіцієнт підсилення стає функцій замикаючої напруги, і його максимальні значення досягаються при замикаючій напрузі рівному половині напруги відсічення. Це обумовлено тим, що обидва канали транзистора модулюються ефективно до ділянки напруги насичення струму стоку. Запропоновано експериментальний експрес метод визначення опору каналу польового транзистора.

Ключові слова: польовий транзистор, насичення струму стоку, режим включення, передатні характеристики, коефіцієнт підсилення.

The results of the research of dynamic modulation of the field-effect transistor's channel with a second field-effect transistor series connected to the source of the first one acting as a dual-gate by controlled changes in the voltage distribution in auxiliary control $p-n$ -junction are given. Comparison of the initial drain characteristics with characteristics of the field-effect transistor controlled by voltage drops in the channel of the second transistor showed that the proposed process of saturation of the drain current due to the expansion of the space charge across the width of the gate is confirmed, providing a marked saturation of the drain current and high dynamic resistance. It was shown experimentally that the gain of the field-effect transistor is an order of magnitude higher (70) than traditional inclusions of common-source (5) or with a dynamic load. The gain becomes a function of the reverse voltage, and maximum values are achieved with reverse voltage equal to half the cut-off voltage. This is due to the fact that both channels of the transistor are modulated effectively until the saturation voltage of the drain current. The experimental method for rapid determination of the channel resistance of the field-effect transistor is proposed.

Keywords: field-effect transistor, saturation of drain current, mode of inclusion, transmission characteristics, gain.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие волоконно-оптических систем передачи требует разработки обладающих широкой полосой пропускания быстродействующих фототранзисторов и усилительных устройств, предотвращающих искажения полезного сигнала. Эти требования могут быть достигнуты за счет управляемого изменения физических процессов протекающих в активной области транзисторных структур. В этом аспекте широкими возможностями управления параметрами обладают полевые транзисторы, которые являются основой любого современного микропроцессора. Как было показано в работе [1] с учетом конструктивных и физических данных конкретной исследуемой структуры можно осуществить корреляцию расчетных кривых с реальными характеристиками полевого транзистора. В частности, на основе моделирования последовательных сопротивлений стока и истока в зависимости от режима включения полевого транзистора была установлена нелинейная зависимость напряжений падающих на переходах сток-затвор и затвор-исток, в отличие от классического режима включения с общим истоком, рис. 1. При этом выходные характеристики в режиме включения эквивалентного сопротивления (в котором создается запирающее напряжение) между затвором и истоком, в результате изменения процесса модуляции толщины канала, приобретали ярко выраженное насыщение тока стока. Соответственно, зависимость тока стока от величины эквивалентного сопротивления определялась поочередным включением сопротивлений с фиксированными значениями, что позволило установить хорошую согласующуюся с экспериментальной кривой квадратичную зависимость тока стока от величины эквивалентного сопротивления, описываемой по формуле (1) [2]:

$$R_{зи} = \frac{U_{отс}}{I_{си}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{си}}{I_{си,макс}}} \right). \quad (1)$$

Зависимости тока стока основного транзистора от запирающего напряжения и от эквивалентного сопротивления совпадают.

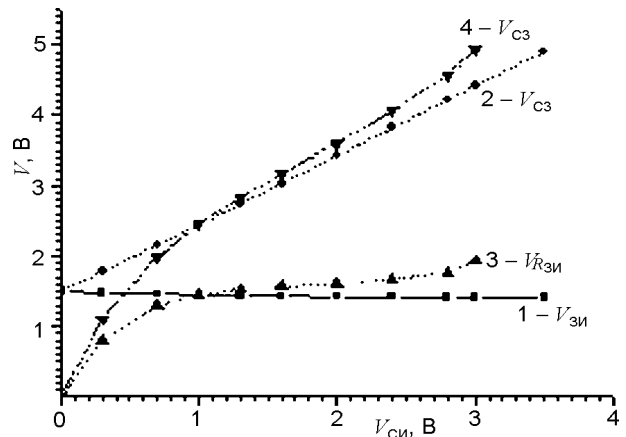


Рис. 1. Напряжения, падающие на переходах сток-затвор и исток-затвор в зависимости от напряжения сток-исток при различных режимах включения.

При этом осуществляется более глубокая модуляция толщины базовой области по сравнению с режимом включения с общим истоком, что позволяет получить высокие значения коэффициента усиления по току. Вместе с тем, решение проблемы снижения потребляемой энергии и частотного диапазона требует разработки и обращения к двухканальным транзисторам с тройным затвором [3].

В настоящей работе приводятся результаты исследования динамической модуляции канала полевого транзистора с помощью второго полевого транзистора выполняющего функцию двойного затвора за счет управляемого изменения перераспределения напряжения в дополнительном управляющем *p-n*-переходе, как приведено на рис. 2.

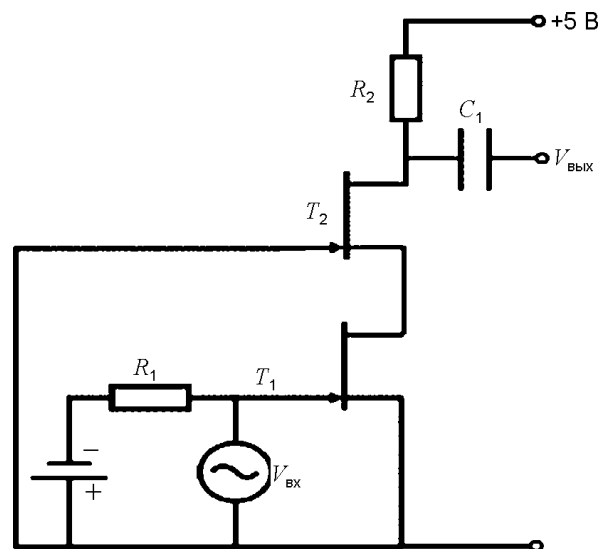


Рис. 2. Электронная схема полевого транзистора с последовательно соединенными каналами.

Как видно из рис. 2 канал первого транзистора последовательно соединен с каналом второго транзистора и напряжение, падающее в канале второго транзистора, является запирающим для первого транзистора. В тоже время канал второго транзистора запирается собственным затвором, который приводит к увеличению падающего напряжения в канале, то есть запирающего напряжения первого транзистора. Получается, что первый транзистор управляется двумя затворами и ток, протекающий по каналам, определяется током второго транзистора, отсечка которого определяется также напряжением отсечки второго транзистора.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОКОВЫХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЯЕМЫМИ КАНАЛАМИ

Для проведения исследований выбраны полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом с напряжением насыщения 1.6 В и максимальным током стока 838 мкА, величина которого увеличивается с ростом рабочего напряжения до 899 мкА при 5 В. Напряжение отсечки равно 0.8 В, рис. 3а. У второго транзистора ток стока составляет 434 мкА при напряжении 1.6 В и увеличивается до 471 мкА при напряжении 5 В. Напряжение отсечки равно 0.65 В, рис. 3б. Можно заметить, что у второго транзистора ток стока и напряжение отсечки почти в два раза меньше.

Анализ процессов протекающих в канале полевого транзистора, когда исток соединен к затвору через эквивалентное сопротивление, то есть при двухполюсном включении

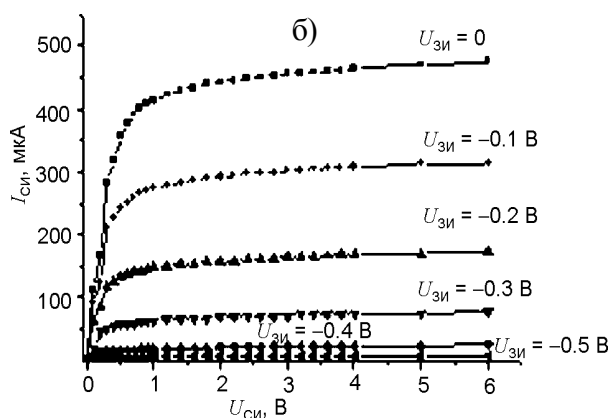
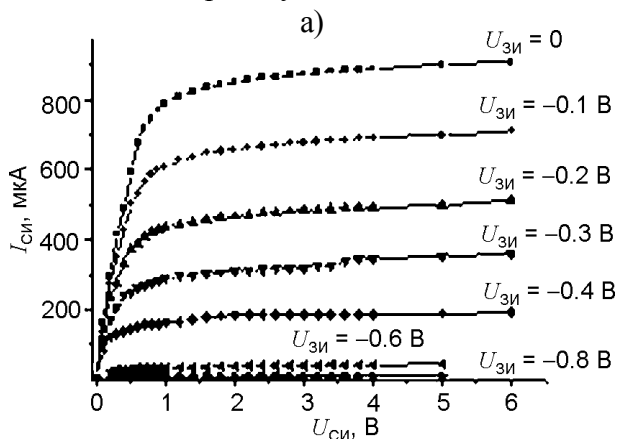


Рис. 3. Стоковые вольтамперные характеристики полевых транзисторов с последовательно соединяемыми каналами.

независимо от величины сопротивления, показывает, что каждый раз от напряжения стока напряжение, падающее на переходе затвор-исток, увеличивается, начиная от нуля. В то время как в классическом режиме включения, старт идет от величины приложенного к затвору напряжения и омическое сопротивление канала с каждым разом увеличивается. Соответственно, в рассматриваемом случае сопротивление канала будет иметь меньшие значения, что приводит к уменьшению напряжения насыщения и более интенсивной модуляции истоковой части канала. При этом токи, протекающие через эквивалентное сопротивление и по каналу равны, а напряжение, падающее на сопротивлении, приводит к расширению области объемного заряда $p-n$ -перехода затвора по всей ширине. В данном случае замена дискретного сопротивления с фиксированным значением на сопротивление канала управляемого напряжением транзистора придает полученному составному транзистору (рис. 2) новые возможности. В результате напряжение, падающее в канале дополнительного полевого транзистора, служит запирающим потенциалом для основного транзистора. Дополнительный транзистор будет управлять свойствами основного транзистора. При нулевом смещении падающее напряжение определяется сопротивлением канала дополнительного транзистора, и он в исходном состоянии находится в запирающем режиме. В результате как показано на рис. 4а ток стока при нулевом напряжении на затворе будет соответствовать

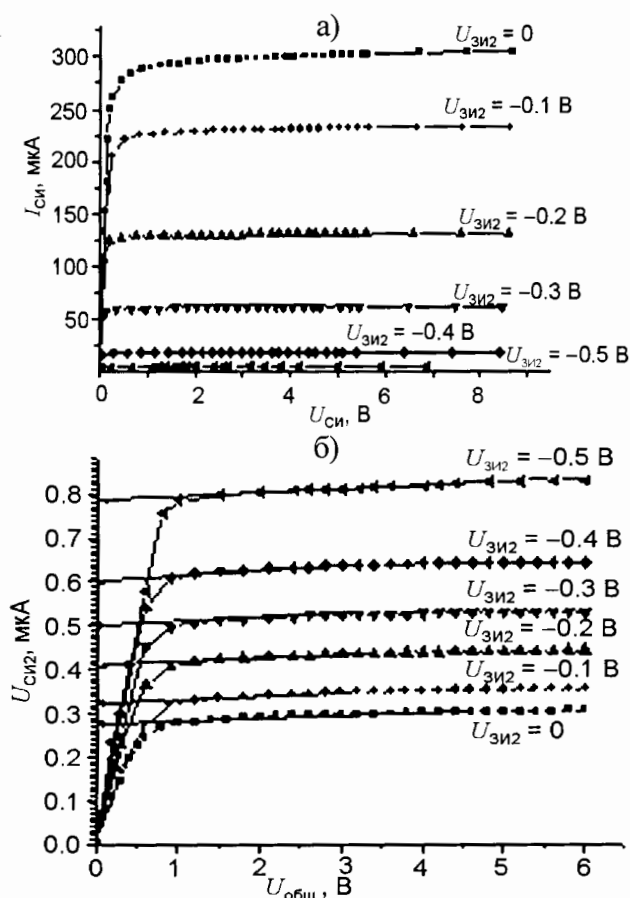


Рис. 4. Зависимости тока стока (а) и падающего в канале затворного транзистора напряжения от общего напряжения (б).

кривому определяемому частью напряжения питания падающего в канале. Хотя ток стока основного транзистора становится функцией напряжения затвора дополнительного транзистора. В первом транзисторе при увеличении рабочего напряжения ток стока приобретает неизменные значения, определяемые напряжением на затворе первого транзистора. Во втором транзисторе падающее в канале напряжение от рабочего напряжения приобретает неизменные значения, рис. 4б.

Стоковая характеристика второго транзистора преобразуется в можно сказать, триодную, (рис. 5), в котором токи и напряжения ограничены. В частности, ток стока не может быть больше тока насыщения, а напряжение определяется сопротивлением канала, что также является функцией тока стока [4]:

$$I_{СИ} = \frac{U_{ОТС}}{2R_{2кан} \left((1 - U_{2ЗИ}) / U_{ОТС} \right)}. \quad (2)$$

Сравнение исходных стоковых характеристик с характеристиками полевого транзис-

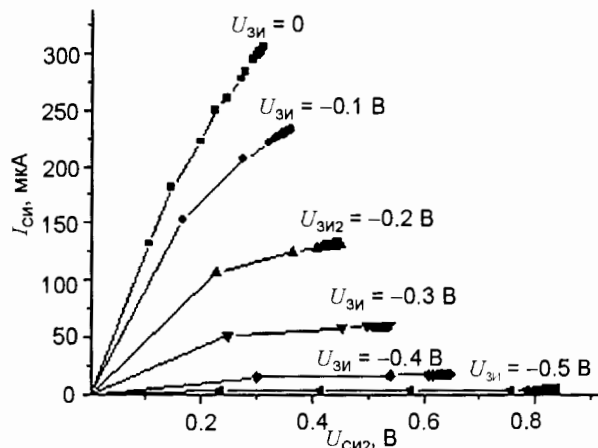


Рис. 5. Зависимости тока стока от запирающего напряжения затворного транзистора.

тора, управляемого падающим напряжением в канале второго транзистора указывает на то, что предложенный в работе процесс насыщения тока стока подтверждается, и токи насыщения становятся ярко выраженными и динамические сопротивления увеличиваются. При этом также уменьшается напряжение насыщения. Характеристики первого транзистора управляются вторым транзистором. Последовательное соединение каналов приводит к существенному уменьшению рабочего напряжения и увеличению коэффициента усиления.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАНАЛА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

В принципе, используя данные токов стока и падающего напряжения можно экспериментально определить сопротивление канала второго транзистора. Так как канал второго транзистора соединен последовательно к каналу первого транзистора, то через оба транзистора протекает один и тот же ток

$$I_{СИ} = I_{2СИ}, \quad (3)$$

а падающее напряжение равно

$$U_{2кан} = R_{2кан} \cdot I_{СИ}. \quad (4)$$

Откуда сопротивление канала равно

$$R_{2кан} = U_{2кан} / I_{СИ}. \quad (5)$$

При нулевом рабочем напряжении, падающие напряжения определяются значениями экстраполированными на ось ординаты падающих напряжений, рис. 4б. Значения сопротивлений канала полученных на основе экспериментальных данных и расчетных по формуле (1) до отсечки канала находятся в

Таблица 1
Расчетные и экспериментальные данные сопротивлений канала при различных запирающих напряжениях

$U_{2зи}$, В	$U_{2кан}$, В	$I_{1си}$, мА	$R_{2кан}$, экспе- рим., кОм	$R_{2кан}$, расчет по (1), кОм
0	0.275	0.299	1.62	0.92
-0.1	0.325	0.222	2.19	1.46
-0.2	0.410	0.129	3.79	3.18
-0.3	0.5	0.060	8.21	8.33
-0.4	0.6	0.018	27.56	33.33
-0.5	0.72	0.0048	103.7	162.5

удовлетворительном согласии, табл. 1, что подтверждает предложенный механизм насыщения тока стока в режиме подачи запирающего напряжения от последовательно соединенного к каналу динамического сопротивления.

Таким образом, путем последовательно-параллельного соединения двух полевых транзисторов по схеме рис. 2 можно определить сопротивление канала на основе измеренных токов и напряжений. Определенные зависимости сопротивления канала от напряжения стока при различных напряжениях затвора приведены на рис. 6.

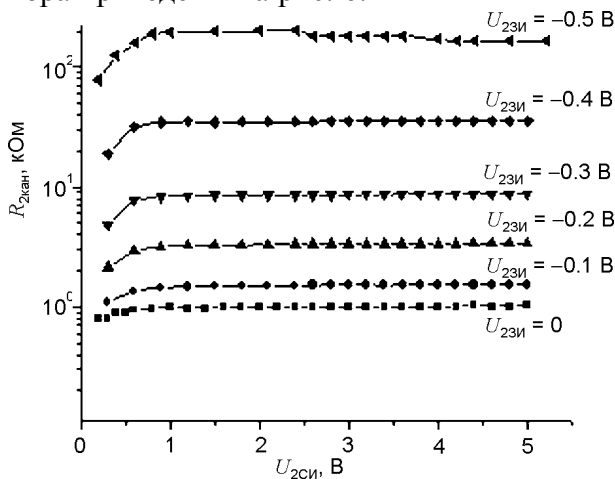


Рис. 6. Зависимости сопротивления канала от напряжения стока при различных напряжениях затвора.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ И УРОВНЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Для определения коэффициента усиления на затвор второго транзистора подавали фиксированное постоянное напряжение меньше напряжения отсечки канала. На переход зат-

вор-исток через конденсатор подавали полезный сигнал от генератора звуковых сигналов ГЗ-109, а выходной сигнал снимали с вывода стока первого транзистора подключенного к источнику питания через нагрузочное сопротивление и фиксировали осциллографом С1-70. Рабочее напряжение на транзисторе составляло 0.812 В, а питающее напряжение 4.5 В.

Как показано в табл. 2 коэффициент усиления составного транзистора составляет 60 – 70, что на порядок больше по сравнению (5), чем в каскадах с тремя транзисторами [5]. Транзистор принимает слабые переменные сигналы от 1 мВ до 10 мВ с коэффициентом усиления до 66, а при превышении входного сигнала до 250 мВ коэффициент усиления снижается до 24. При этом форма сигнала остается без изменений. Высокий коэффициент усиления от 60 до 36 сохраняется вплоть до 2 МГц даже при приеме слабого сигнала (1 мВ). В зависимости от величины запирающего напряжения коэффициент усиления приобретает максимальные значения (70) при 0.325 – 0.33 В, что соответствует половине напряжения отсечки канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследования динамической модуляции канала полевого транзистора с помощью второго последовательно соединенного к истоку полевого транзистора выполняющего функцию двойного затвора за счет управляемого изменения перераспределения напряжения в дополнительном управляющем *p-n*-переходе. Сравнение исходных стоковых характеристик с характеристиками полевого транзистора, управляемого падающим напряжением в канале второго транзистора показало, что предложенный процесс насыщения тока стока обусловленный расширением области объемного заряда по всей ширине затвора подтверждается, обеспечивая ярко выраженное насыщение тока стока и высокое динамическое сопротивление. При этом также уменьшается напряжение насыщения. Характеристики первого транзистора управляются вторым транзистором, что приводит к существенному уменьшению рабо-

Данные коэффициента усиления при различных частотах и уровне входного сигнала в зависимости от запирающего напряжения

f , Гц	1		5	10	100	1000	10000	100000	1 мГц	2 мГц
$U_{вх}$, мВ	1									
$U_{вых}$, мВ	60		60	60	60	60	60	60	52	36
$K_{УС}$	60		60	60	60	60	60	60	52	36
f , Гц	100									
$U_{вх}$, мВ	1		2	4	6	8	10	50	100	250
$U_{вых}$, мВ	60		140	266	400	520	660	2.2 В	3.6 В	6 В
$K_{УС}$	60		70	66.5	66.6	65	66	44	36	24
f , Гц	400									
$U_{зи}$, В	0.3	0.31	0.32	0.325	0.33	0.335	0.36	0.44	0.54	0.6
$U_{вх}$, мВ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$U_{вых}$, мВ	22	64	130	140	140	130	100	80	40	20
$K_{УС}$	11	37	65	70	70	65	50	40	20	10

чего напряжения и увеличению коэффициента усиления.

Экспериментально показано, что коэффициент усиления полевого транзистора имеет на порядок большее значение по сравнению с традиционными включениями с общим истоком или с динамической нагрузкой. Коэффициент усиления становится функцией запирающего напряжения, и его максимальные значения достигаются при запирающем напряжении равном половине напряжения отсечки. Это обусловлено тем, что оба канала транзистора модулируются эффективно до участка напряжения насыщения тока стока. Предложен экспериментальный экспресс-метод определения сопротивления канала полевого транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ёдгорова Д.М. Механизм насыщения тока стока полевого транзистора//Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5(65). – С. 58-61.
2. 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. – № 1-2 (90). – С. 25-27.

3. Касперски Крис. Транзисторы сегодня и завтра. Chip 09/2003. http://www.radioradar.net/hand_book/documentation/vtt.html.
4. Милехин А.Г. Радиотехнические схемы на полевых транзисторах//Энергия. – 1976. – С. 28-29.
5. Моделирование электронных характеристик силовых транзисторов и передаточных характеристик. www.cnaa.md/files/theses/2011/18230/alexandr_penin_thesis.pdf.

LITERATURA

1. Edgorova D.M. Mehanizm nasyscheniya toka stoka polevogo tranzistora//Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. – 2006. – № 5 (65). – S. 58-61.
2. Karimov A.V., Dzhuraev D.R., Edgorova D.M., Rahmatov A.Z., Abdulhaev O.A., Kamonov B.M., Turaev A.A. Nekotorye osobennosti ogranichatelya toka na polevom tranzistore//Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. – 2011. – № 1-2 (90). – S. 25-27.
3. Kasperski Kris. Tranzistory segodnya i zavtra. Chip 09/2003. http://www.radioradar.net/hand_book/documentation/vtt.html
4. Milehin A.G. Radiotekhnicheskie shemy na polevyh tranzistorah//Energiya. – 1976. – S. 28-29.
5. Modelirovaniye elektronnyh harakteristik silovyh tranzistorov i peredatochnykh harakteristik. www.cnaa.md/files/theses/2011/18230/alexandr_penin_thesis.pdf.