

фильтр) и дополнительно включаемых конденсаторов перед и после сердечника.

Рассмотренные сердечники могут применяться не только для подавления помех в цепях питания постоянного тока, но и для подавления высокочастотных гармонических составляющих в других цепях полезного низкочастотного (по сравнению с помехой) сигнала.

#### Заключение

Полученные математические выражения позволяют рассчитать характеристики магнитного помехоподавляющего сердечника для заданных параметров микропровода и, наоборот, определить параметры микропровода, необходимые для определенного типа сердечника.

Для повышения эффективности помехоподавляющих сердечников из микропровода необходимо увеличение магнитной проницаемости, уменьшение диаметра микропровода и увеличение тангенса угла диэлектрических потерь материала жилы микропровода.

На основе литого микропровода могут быть изготовлены миниатюрные (с внешним диаметром от 0,2 до 0,5 мм) помехоподавляющие сердечники для защиты выводов миниатюрных электронных компонентов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Баев Е. Ф., Фоменко Л. А., Цымбалюк В. С. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками.— М.: Сов. радио, 1976.
2. Литой микропровод и его свойства / Е. Бадинтер, Н. Берман, И. Драбенко и др.— Кишинев: Штиинца, 1973.
3. «Microfir Tehnologii Industriale» Ltd. www.microwires.com.
4. Аморфные магнитомягкие сплавы и их применение в источниках вторичного электропитания / Под ред. В. И. Хандогина.— М.: ВНИИ, 1990.
5. Гарновский Н. Н. Теоретические основы электропроводной связи. Ч. 2.— М.: Связьиздат, 1959.
6. MURATA PRODUCTS. Cat. No. O63E-5 фирмы Murata Manufacturing Co., Ltd. 2001.

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика—Солнце»  
E-mail: yodgorova@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
14.03 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. Н. НАЗАРОВ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## МЕХАНИЗМ НАСЫЩЕНИЯ ТОКА СТОКА ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

*Вольт-амперные характеристики с явно выраженным насыщением тока стока обусловлены постепенной частичной рекомбинацией носителей у истоковой части канала.*

До настоящего времени нет однозначного мнения по механизму насыщения тока стока полевого транзистора. В соответствии с моделью Шокли при фиксированном напряжении на затворе  $V_{зи} = \text{const}$  ток стока увеличивается до тех пор ( $V_{нас}$ ), пока не произойдет насыщение тока  $I_{нас}$ . При дальнейшем увеличении запирающего напряжения должны уменьшаться как пороговые напряжения, так и токи насыщения. Считается, что с момента насыщения тока стока происходит охват слоем объемного заряда части вблизи стока [1, с. 131—135], при этом полевой транзистор рассматривается как “идеальный” прибор. Экспериментальные результаты показывают, однако, что на самом деле могут быть различные ситуации [2, с. 325—354; 3, с. 45—64]. Поэтому для корреляции расчетных кривых с реальными необходимо учитывать конструктивные и физические данные конкретной исследуемой структуры.

Настоящая работа посвящена исследованию процессов насыщения тока стока полевого транзистора

с  $p-n$ -переходом, используемого при проектировании самых различных схем.

Исследуемые структуры представляют собой арсенидгаллиевые полевые транзисторы с нижним затвором в виде  $p-n$ -перехода. К каналу  $n$ -типа проводимости на расстоянии 50 мкм сформированы контактные площадки стока и истока шириной 700 мкм. Концентрация носителей в затворе  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а в канале —  $5,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Максимальный ток стока при нулевом смещении составляет 0,5 мА, а напряжение отсечки — 2,5 В. Исследования зависимости тока стока от напряжения показали, что в режиме автоматического смещения (присоединение истока к затвору через сопротивление  $R_{см}$ ) дифференциальное сопротивление канала  $R_{кан}^{диф} = V_{си} / I_{си}$  уменьшается, а динамическое выходное сопротивление  $R_{кан}^{дин} = \Delta V_{си} / \Delta I_{си}$  возрастает, и насыщение тока стока становится ярко выраженным. В то же время при соответствующем эквивалентном запирающем напряжении на затворе, например при 1,5 В, зависимость тока стока от напряжения имеет возрастающий характер. Подобная зависимость наблюдается во всем семействе вольт-амперных характеристик (рис. 1).

Наблюдаемое поведение зависимости тока стока от напряжения можно объяснить тем, что при изменении режима смещения имеют место отличающиеся

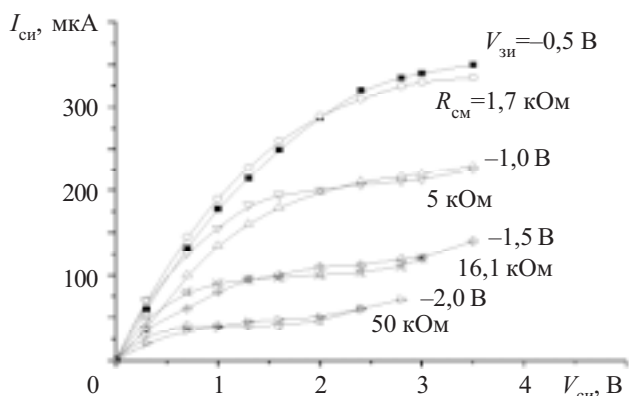


Рис. 1. Зависимости тока стока от напряжения при различных запирающих напряжениях и в режиме автоматического смещения через соответствующие сопротивления

друг от друга физические процессы управления параметрами канала. Для этого обратимся к модельной структуре, показанной на рис. 2.

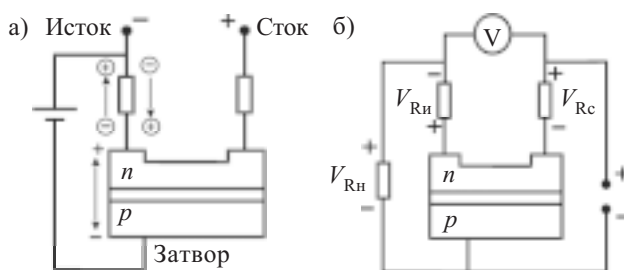


Рис. 2. Модельная структура полевого транзистора при включении по схеме с общим истоком (а) и в режиме автоматического смещения (б)

Модельная структура представляет собой полевой транзистор с  $p-n$ -переходом, где с контактами стока и истока последовательно соединены сопротивления стока ( $R_c$ ) и истока ( $R_n$ ). Значения этих сопротивлений, определенные для рассматриваемой структуры прямыми измерениями [4], составили  $\approx 700$  Ом при сопротивлении канала 3000 Ом.

При включении (рис. 2, а) по схеме с общим истоком напряжение, прикладываемое между стоком и истоком, падает, наряду с сопротивлением канала, на последовательном сопротивлении стока и истока. Кроме того, напряжение, приложенное к переходу "исток—затвор", также падает на последовательном сопротивлении истока и на самом  $p-n$ -переходе. В результате от прикладываемого к переходам "сток—исток" напряжения будет уменьшаться величина напряжения запирающего  $p-n$ -переход затвор-исток за счет взаимной компенсации противоположно направленных напряжений на последовательном сопротивлении истока —  $R_n$ . Величина напряжения, падающего на сопротивлении истока ( $R_n=700$  Ом), определяется выражением

$$V_{Rn} = R_n \cdot I_{си} \quad (1)$$

Ровно такое же напряжение будет падать и на сопротивлении стока —  $R_c$ .

В соответствии с экспериментальными данными стоковой вольт-амперной характеристики (рис. 1), напряжения ( $V_{Rn}$ ), падающие на последовательном со-

противлении для запирающего напряжения 1,5 В, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Падение напряжения в различных областях структуры полевого транзистора ( $V_{зи}=1,5$  В)

$V_{си}$ , В	$I_{си}$ , А	$V_{Rn}$ , В	$V_{канал}$ , В	$V_{зи}^{p-n}$ , В	$V_{сз}$ , В
0,3	$3,80 \cdot 10^{-5}$	0,0266	0,2468	1,4734	1,7734
0,7	$6,00 \cdot 10^{-5}$	0,042	0,616	1,458	2,158
1	$8,00 \cdot 10^{-5}$	0,056	0,888	1,444	2,444
1,3	$9,50 \cdot 10^{-5}$	0,0665	1,167	1,4335	2,7335
1,6	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,07	1,46	1,43	3,03
2	$1,10 \cdot 10^{-4}$	0,077	1,846	1,423	3,423
2,4	$1,12 \cdot 10^{-4}$	0,0784	2,2432	1,4216	3,8216
2,8	$1,19 \cdot 10^{-4}$	0,0833	2,6334	1,4167	4,2167
3	$1,20 \cdot 10^{-4}$	0,084	2,832	1,416	4,416
3,5	$1,40 \cdot 10^{-4}$	0,098	3,304	1,402	4,902

В момент приложения к переходу "затвор—исток" эквивалентного напряжения 1,5 В сразу имеем сужение проводящей части канала по всей ширине затвора. В дальнейшем, по мере увеличения напряжения, прикладываемого к каналу (переходу "сток—исток"), имеем некоторое линейное уменьшение эффективного значения падающего на самом  $p-n$ -переходе напряжения (рис. 3, кривая 1), в то время как на переходе "сток—затвор" его величина линейно увеличивается (рис. 3, кривая 2). В результате происходит увеличение толщины канала у истоковой части и сужение со стороны стоковой части, чем и объясняется отсутствие ярко выраженного участка насыщения тока на выходных характеристиках.

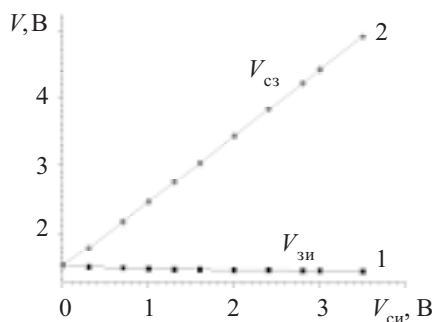


Рис. 3. Напряжения, падающие на переходах "сток—затвор" (2) и "затвор—исток" (1)

Таким образом, вольт-амперные характеристики с неявно выраженным насыщением тока стока обусловлены постепенной частичной рекомбинацией носителей у истоковой части канала под влиянием напряжения стока.

В режиме автоматического смещения согласно модельной структуре рис. 2, б имеем следующую картину. Напряжение, приложенное к переходу "сток—затвор", перераспределяется таким образом, что приложенным к переходу "затвор—исток" оказывается напряжение, падающее на смещающем сопротивлении  $R_{см}$

$$V_{см} = R_{см} I_{си} \quad (2)$$

плюс напряжение, падающее на сопротивлении истока  $V_{Rи}$  (табл. 2).

Таблица 2

Падение напряжения в различных областях структуры полевого транзистора для режима автоматического смещения при  $R_{см} = 16100 \text{ Ом}$

$V_{си}, \text{В}$	$I_{си}, \text{А}$	$V_{Rи}, \text{В}$	$V_{канал}, \text{В}$	$V_{зи}^{p-n} = V_{Rсм}, \text{В}$	$V_{сз}, \text{В}$
0,3	$5,00 \cdot 10^5$	0,035	0,23	0,805	1,105
0,7	$8,00 \cdot 10^5$	0,056	0,588	1,288	1,988
1	$9,00 \cdot 10^5$	0,063	0,874	1,449	2,449
1,3	$9,50 \cdot 10^5$	0,0665	1,167	1,5295	2,8295
1,6	$9,70 \cdot 10^5$	0,0679	1,4642	1,5617	3,1617
2	$1,00 \cdot 10^4$	0,07	1,86	1,61	3,61
2,4	$1,03 \cdot 10^4$	0,0721	2,2558	1,6583	4,0583
2,8	$1,10 \cdot 10^4$	0,077	2,646	1,771	4,571
3	$1,20 \cdot 10^4$	0,084	2,832	1,932	4,932

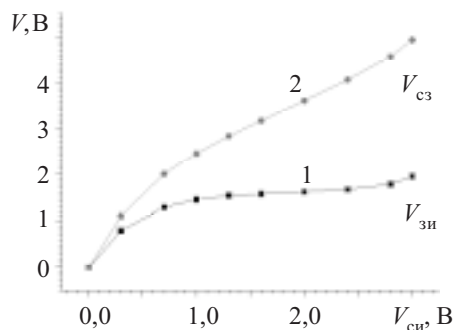


Рис. 4. Напряжения, падающие на переходах "сток—затвор" (2) и "затвор—исток" (1) в режиме автоматического смещения

В итоге с увеличением рабочего напряжения будет одновременно увеличиваться напряжение, запирающее переход "затвор—исток" (рис. 4, кривая 1) и "затвор—сток" (кривая 2). Если каждый раз вначале имеем одну и ту же определенную исходную толщину проводящей части канала (определяемой контактной разностью потенциалов), то с увеличением напряжения получаем его пропорциональное сужение

по всей ширине затвора за счет образования неподвижных ионизованных зарядов, что приводит к ярко выраженному насыщению тока стока. При этом дифференциальное сопротивление канала на начальном участке будет иметь низкие значения по сравнению с номинальным режимом.

**Выводы**

Как видно из экспериментальных данных, качественный вид выходных характеристик полевого транзистора не несет конкретной информации о механизмах их формирования. Они преимущественно определяются, в зависимости от режима включения, неявными дополнительными физическими процессами, вызываемыми влиянием реальных параметров структуры — "паразитного" сопротивления истока, длины канала. В принципе насыщение тока стока обусловлено сжатием (сужением) проводящей части канала, образуемым слоем объемного заряда пропорционально по всей ширине затвора. В рассмотренном режиме автоматического смещения оно обусловлено сопротивлением затвор-исток и канала (исток-сток), искусственно разделенным на две части, где сопротивление затвор-исток имеет постоянное значение, определяемое значением  $R_{см}$ .

При анализе выходных характеристик необходимо произвести оценку напряжений, падающих на каждом переходе относительно затвора. Вольт-амперные характеристики с неявно выраженным насыщением тока стока обусловлены постепенной частичной рекомбинацией носителей у истоковой части канала под влиянием напряжения стока.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспука, У. Уитмена.— М.: Мир, 1988.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1.— М.: Мир, 1984.
3. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов.— Л.: Энергия, 1975.
4. Грибин А. В. Паразитные объемные сопротивления в полевых транзисторах с  $p-n$ -переходом // ТИИЭР.— 1967.— Т. 55, № 11.— С. 282—285.

в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование функциональных характеристик полевого фототранзистора. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Исследование энергетической зависимости чувствительности CdTe (CdZnTe) детекторов гамма-излучения методами математического моделирования. (Украина, г. Харьков)
- Термофункциональное гипермоделирование зонда с запирающим потенциалом в проектировании устройств телеметрии и управления. (Украина, г. Одесса)
- Полупроводниковый генераторный модуль для медико-биологических применений. (Украина, г. Днепрпетровск)
- Ростовое оборудование для производства полуизолирующего GaAs методом Чохральского. (Украина, г. Харьков)



- Контролируемое уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда в  $p^+n$ -диоде импульсами прямого тока большой амплитуды (Украина, г. Киев)
- Анизотропная термоэлектрическая матрица. (Украина, г. Черновцы)
- Исследование твердотельного устройства управления нейрочипом. (Украина, г. Одесса)
- Компенсация фазовой ошибки в излучателях СВЧ волн с помощью импедансной структуры. (Украина, г. Одесса)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции