

УДК 621.383.5

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ НА ПЕРЕДАТОЧНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

© 2013 С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, А. В. Беринцев, В. А. Родионов, А. А. Штанько

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 02.09.2013

В работе рассмотрен новый класс полупроводниковых приборов-приборов с передаточными вольт-амперными характеристиками, содержащими участок отрицательной дифференциальной проводимости или отрицательного дифференциального сопротивления. Предложены способы описания и реализации приборов с передаточными S- и N-образными вольт-амперными характеристиками. Приведено моделирование передаточных характеристик рассмотренных приборов.

Ключевые слова: отрицательное сопротивление, отрицательная проводимость, моделирование, передаточная вольт-амперная характеристика.

Полупроводниковые приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) и отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) принято относить к приборам с положительной обратной связью (ПОС) [1]. При этом сформулирована и доказана теорема об однозначной связи типа обратной связи с видом вольт-амперной характеристики (ВАХ). Теорема звучит следующим образом [1]: *Приборы с отрицательным сопротивлением, обладающие внутренней положительной обратной связью по напряжению, имеют на статической вольт-амперной характеристике участок отрицательной проводимости и емкостной характер реактивности. Приборы с внутренней положительной обратной связью по току имеют на статической вольт-амперной характеристике участок отрицательного сопротивления и индуктивный характер реактивности.*

Эта теорема позволяет по типу обратной связи, используемой в приборе, заранее предвидеть, каким видом статической ВАХ он будет обладать и каков будет характер его реактивности на участке ОДС или ОДП, или, наоборот, по виду ста-

тической ВАХ определить тип внутренней обратной связи и предсказать характер реактивности.

Для формулирования этой теоремы полупроводниковый прибор представлялся в виде четырехполюсника с внешней цепью положительной обратной связи и рассмотрение проводилось в рамках классической теории четырехполюсников и теории систем автоматического управления.

Необходимо отметить, что при формулировке этой теоремы речь шла лишь о выходной ВАХ полупроводникового прибора. Однако существуют полупроводниковые приборы, обладающие одновременно характеристиками, содержащими как участки ОДС, так и участки ОДП. Эти участки могут наблюдаться одновременно во входных и выходных цепях, например, у тиристора [2], симистора [3], N-транзистора [4], некоторых биполярно-полевых приборов [5]. Также участки ОДС и ОДП могут наблюдаться одновременно на выходной ВАХ прибора [6-8].

К сожалению, в существующей литературе не затронуты вопросы, связанные с рассмотрением передаточных характеристик четырехполюсников, которые также могут содержать участки ОДС и ОДП.

Для решения задачи оценки характера отрицательного сопротивления на передаточных характеристиках четырехполюсников с ПОС рассмотрим возможные варианты реализации статического отрицательного сопротивления у приборов, имеющих во входной и выходной цепях ВАХ, содержащие участки ОДС и ОДП.

Рассмотрим четырехполюсник (рис. 1), для которого определим условия появления ОДС и ОДП во входных и выходных цепях.

Для определения входного сопротивления четырехполюсника можно воспользоваться следующим соотношением:

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники.

E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Гурин Нектарий Тимофеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и электроники, первый проректор, проректор по учебной работе. E-mail: gurinnt@sv.ulsu.ru

Беринцев Алексей Валентинович, научный сотрудник лаборатории твердотельной электроники научно-исследовательского технологического института.

E-mail: berints@mail.ru

Родионов Вячеслав Александрович, научный сотрудник научно-исследовательского технологического института.

E-mail: slo\_ldm@mail.ru

Штанько Александр Алексеевич, научный сотрудник научно-исследовательского технологического института.



**Рис. 1.** Четырехполюсник с ОДС и ОДП во входных и выходных цепях

$$Z_{bx} = \frac{U_{bx}}{I_{bx}},$$

где  $U_{bx}$  – входное напряжение на полюсах 1, 1';  $I_{bx}$  – входной ток.

Дифференциальное входное сопротивление можно определить из выражения:

$$\Delta Z_{bx} = \frac{U_{bx1} - U_{bx2}}{I_{bx1} - I_{bx2}},$$

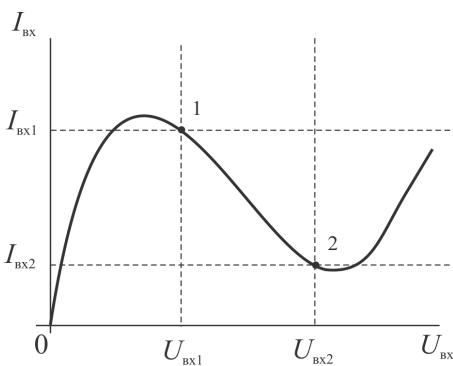
где  $U_{bx1} - U_{bx2}$  – разность двух входных напряжений;  $I_{bx1} - I_{bx2}$  – разность двух входных токов.

Данное значение может быть отрицательным в двух случаях:

1.  $U_{bx1} - U_{bx2} < 0$  и  $I_{bx1} - I_{bx2} > 0$ ;
2.  $I_{bx1} - I_{bx2} < 0$  и  $U_{bx1} - U_{bx2} > 0$ .

Рассмотрим более подробно каждый из них.

1. Если  $U_{bx1} < U_{bx2}$ , то  $I_{bx1} > I_{bx2}$ . В этом случае входная ВАХ будет иметь вид, представленный на рис. 2.



**Рис. 2.** Входная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{bx1} < U_{bx2}$  и  $I_{bx1} > I_{bx2}$ .

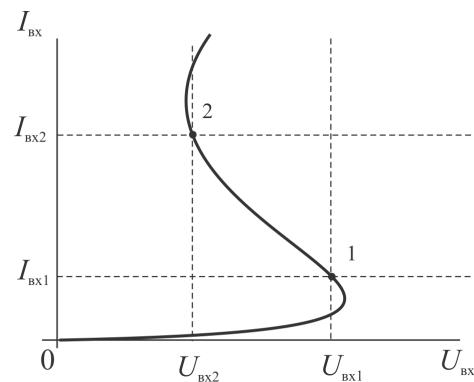
2. Если  $U_{bx1} > U_{bx2}$ , то  $I_{bx1} < I_{bx2}$ . В этом случае входная ВАХ будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Аналогичным образом можно представить выходное сопротивление четырехполюсника.

$$Z_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{вых}},$$

где  $U_{вых}$  – выходное напряжение на полюсах 2, 2';  $I_{вых}$  – выходной ток.

Дифференциальное выходное сопротивление



**Рис. 3.** Входная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{bx1} > U_{bx2}$  и  $I_{bx1} < I_{bx2}$

можно определить из выражения:

$$\Delta Z_{вых} = \frac{U_{вых1} - U_{вых2}}{I_{вых1} - I_{вых2}},$$

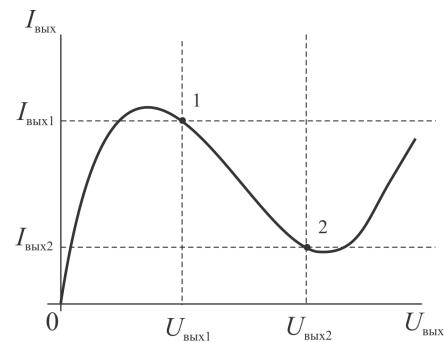
где  $U_{вых1} - U_{вых2}$  – разность двух выходных напряжений;  $I_{вых1} - I_{вых2}$  – разность двух выходных токов.

Данное значение может быть отрицательным в двух случаях:

1.  $U_{вых1} - U_{вых2} < 0$  и  $I_{вых1} - I_{вых2} > 0$  ;
2.  $I_{вых1} - I_{вых2} < 0$  и  $U_{вых1} - U_{вых2} > 0$  .

Рассмотрим более подробно каждый из них.

1. Если  $U_{вых1} < U_{вых2}$ , то  $I_{вых1} > I_{вых2}$ . В этом случае выходная ВАХ будет иметь вид, представленный на рис. 4.

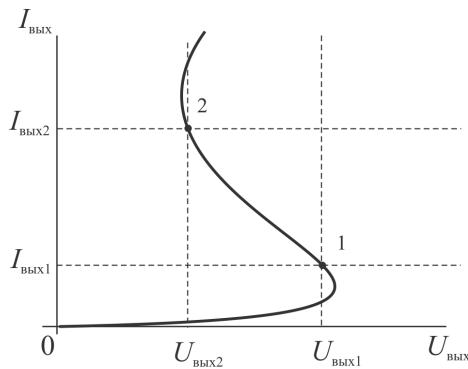


**Рис. 4.** Выходная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{вых1} < U_{вых2}$  и  $I_{вых1} > I_{вых2}$ .

2. Если  $U_{вых1} > U_{вых2}$ , то  $I_{вых1} < I_{вых2}$ . В этом случае выходная ВАХ будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Проанализируем теперь передаточные ВАХ, в которых возможно появление участков отрицательного сопротивления и отрицательной проводимости.

В качестве исследуемых характеристик рассмотрим передаточные сопротивления с входа на выход и с выхода на вход:



**Рис. 5.** Выходная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{\text{вых}1} > U_{\text{вых}2}$  и  $I_{\text{вых}1} < I_{\text{вых}2}$

$$\Delta Z_{\text{пер}12} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вых}}} ; \Delta Z_{\text{пер}21} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} .$$

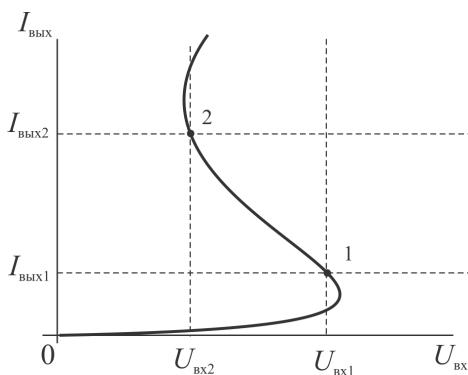
Каждое из этих дифференциальных сопротивлений может иметь отрицательное значение.

Для  $\Delta Z_{\text{пер}12}$

$$\Delta Z_{\text{пер}12} = \frac{U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}}{I_{\text{вых}1} - I_{\text{вых}2}} .$$

Можно рассмотреть два случая:

1.  $U_{\text{вх}1} > U_{\text{вх}2}$  и  $I_{\text{вых}1} < I_{\text{вых}2}$ . Передаточная ВАХ приведена на рис. 6. Она имеет S-образный вид.

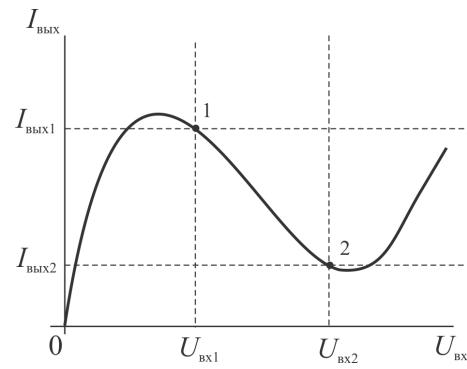


**Рис. 6.** Передаточная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{\text{вх}1} > U_{\text{вх}2}$  и  $I_{\text{вых}1} < I_{\text{вых}2}$ .

2.  $U_{\text{вх}1} < U_{\text{вх}2}$  и  $I_{\text{вых}1} > I_{\text{вых}2}$ . Передаточная ВАХ имеет N-образный вид (рис. 7).

Для передаточного сопротивления с выхода на вход  $Z_{\text{пер}21}$  характеристики будут выглядеть аналогично.

Таким образом, при исследовании отрицательного дифференциального сопротивления и отрицательной дифференциальной проводимости в полупроводниковых приборах помимо исследования характеристик входных и выходных цепей необходимо обращать внимание и на передаточные характеристики, в которых также присутствуют участки ОДС и ОДП.



**Рис. 7.** Передаточная вольт-амперная характеристика четырехполюсника в случае  $U_{\text{вх}1} < U_{\text{вх}2}$  и  $I_{\text{вых}1} > I_{\text{вых}2}$

Важно отметить, что подобные приборы с передаточной ВАХ, содержащие участки ОДП и ОДС могут найти широкое применение в качестве элементов защиты от скачков тока и напряжения входных и выходных цепей полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, узлов и электронной аппаратуры в целом, а также на их базе возможно создание новых приборов опто- и магнито- и функциональной электроники с управляемыми передаточными ВАХ.

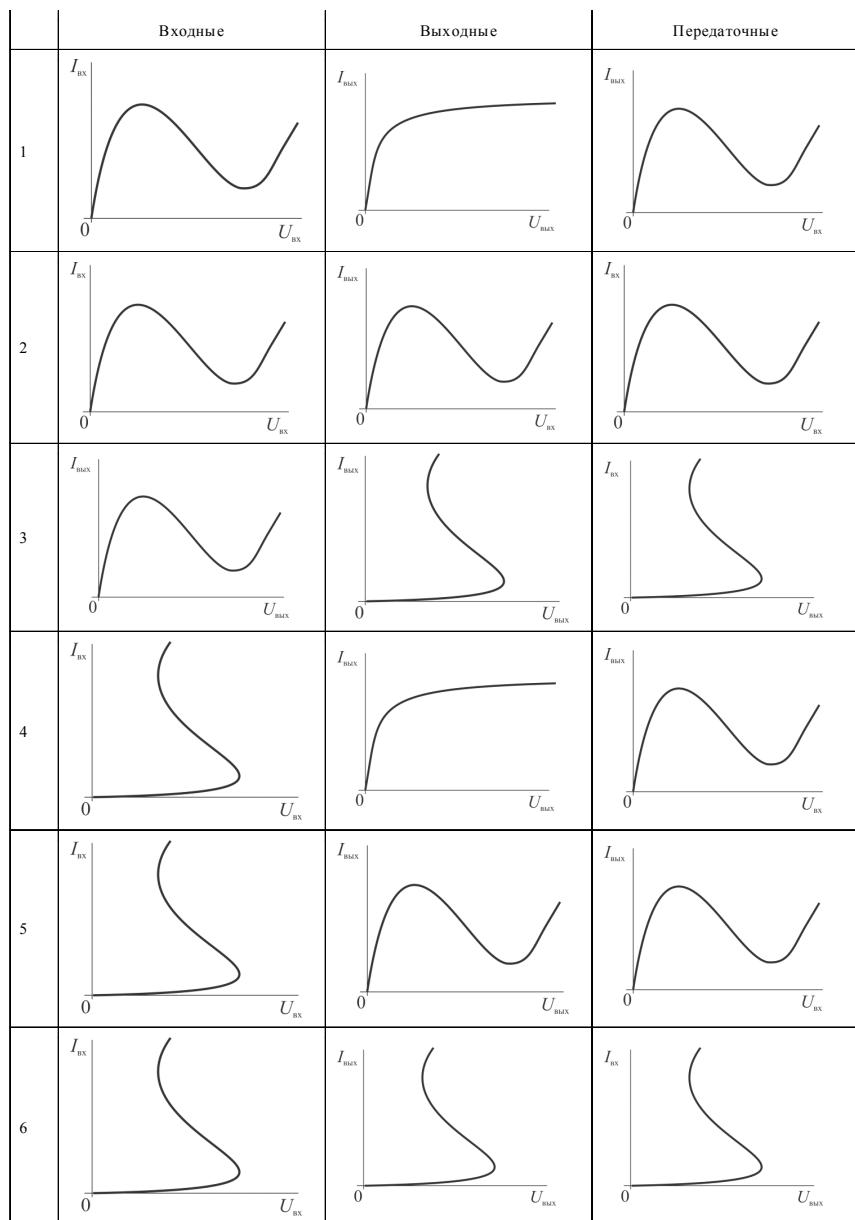
Для реализации четырехполюсников с передаточными ВАХ, содержащими участки ОДП и ОДС можно воспользоваться известной элементной базой (биполярные и полевые транзисторы) и схемотехническими решениями [9], позволяющими образовать S- и N-образные характеристики во входных и выходных цепях четырехполюсника.

В табл. 1 приведены различные сочетания входных и выходных характеристик элементов, составляющих четырехполюсник, а также прогнозные передаточные характеристики. В качестве основной схемы замещения четырехполюсника используется схема из двух элементов с ВАХ S- или N-типа, один из которых является управляемым и включен в цепь управления второго - управляемого.

В качестве комментариев к табл. 1 необходимо отметить, что для вариантов 1, 2 и 3 в роли управляемого элемента используются элементы, управляемые током (1 – биполярный транзистор, 2 – N-прибор, управляемый током, 3 – тиристор) а для вариантов 4, 5 и 6 в качестве управляемого элемента используются приборы, управляемые напряжением (4 – полевой транзистор, 5 – N-прибор, управляемый напряжением, 6 – схемотехнический аналог S-прибора, управляемого напряжением).

Как видно из табл. 1, все перечисленные в ней варианты обладают передаточной ВАХ S- или N-типа. Таким образом, имеет смысл говорить о целом классе приборов, обладающим одним типом

**Таблица 1.** Входные, выходные и передаточные ВАХ



передаточных ВАХ - приборах с передаточными ВАХ с участком отрицательного сопротивления.

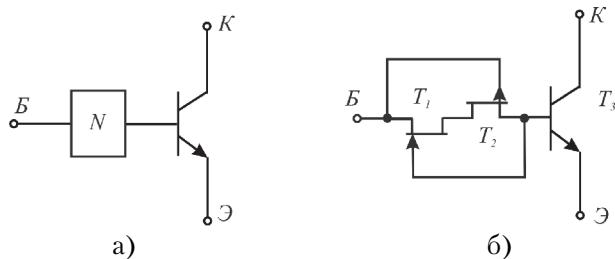
Далее остановимся на более подробном рассмотрении реализации и моделировании приборов этого класса.

В качестве примера реализации варианта 1 из табл. 1 можно рассмотреть биполярный транзистор, в цепь базы которого включен прибор с N-образной выходной ВАХ (рис. 8, а) [10]. Рассмотрим данную модель и проведем анализ возможности ее применения для реализации биполярного транзистора с передаточными N-образными ВАХ.

Управление транзистором происходит посредством модуляции тока базы элементом с N-образной ВАХ, например схемотехническим аналогом  $\lambda$ -диода (рис. 8, б), состоящим из двух полевых транзисторов с управляющим  $p-n$

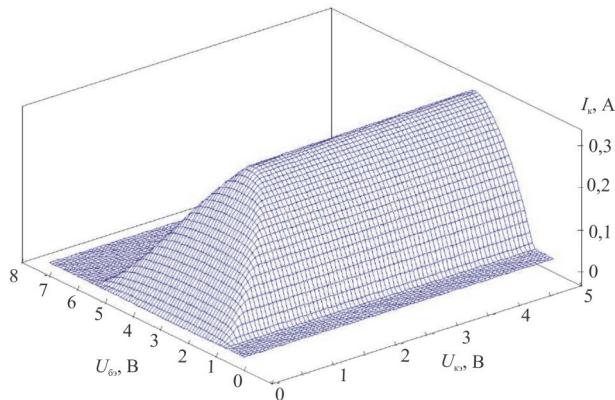
-переходом [9]. В этой схеме с ростом входного напряжения увеличивается ток базы, вследствие чего увеличивается ток в коллекторной цепи транзистора. Эта картина наблюдается до момента, когда входной ток достигает максимума (ток пика N-элемента). В этот момент на выходной характеристике транзистора ток также достигает максимума. Затем при росте входного напряжения происходит уменьшение тока N-элемента, следовательно и тока базы биполярного транзистора, а также и тока коллектора. Таким образом, при перегрузке (по току или по напряжению) в управляющей цепи биполярного транзистора его выходной ток не превысит некоторого установленного значения, что равносильно защите нагрузочных цепей от токовых перегрузок.

Для проверки принципиальной работоспособности схемы замещения проведено схемотех-



**Рис. 8.** Структурная схема биполярного транзистора с передаточной N-образной ВАХ (а) и принципиальная схема на основе аналога  $\lambda$ -диода (б)

ническое моделирование. В результате моделирования получены семейство ВАХ, изображенные в виде поверхности на рис. 9.



**Рис. 9.** Семейство выходных характеристик биполярного транзистора с передаточной N-образной ВАХ

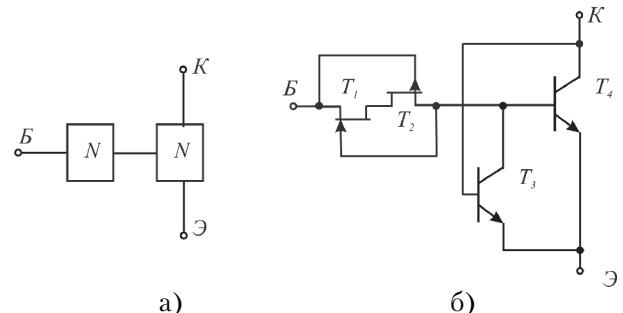
Сечение этой поверхности плоскостью  $(I_{\text{к}}, U_{\text{бэ}})$  при фиксированном напряжении  $U_{\text{кэ}}$  дает выходную характеристику, а сечение плоскостью  $(I_{\text{к}}, U_{\text{бэ}})$  — передаточную.

Как видно из рисунка, при увеличении входного напряжения первоначально происходит рост тока коллектора, а затем уменьшение. Это и обеспечивает режим защиты биполярного транзистора по входу.

Вариант 2 из табл. 1 реализован в виде двух приборов с выходными ВАХ N-типа [11, 12]. Один из приборов является двухэлектродным, а другой трехэлектродным. Двухэлектродный N-прибор включается последовательно в цепь управления трехэлектродного N-прибора (рис. 10, а). При этом реализуются передаточные и выходные N-образные ВАХ.

Рассмотрим данную модель и проведем анализ возможности ее применения для реализации негатрона с передаточными N-образными ВАХ.

Управление трехэлектродным N-прибором, например, аналогом биполярного негатрона, реализованного на базе схемы с шунтированием



**Рис. 10.** Структурная схема негатрона с передаточной ВАХ N-типа (а) и принципиальная схема на основе аналога  $\lambda$ -диода и биполярного негатрона (б)

база-эмиттерного перехода основного транзистора вторым биполярным транзистором того же типа [11], происходит посредством модуляции тока элементом с N-образной ВАХ, в качестве которого может выступать схемотехнический аналог  $\lambda$ -диода (рис. 10, б), состоящим из двух полевых транзисторов с управляющим  $p-n-p$ -переходом [9].

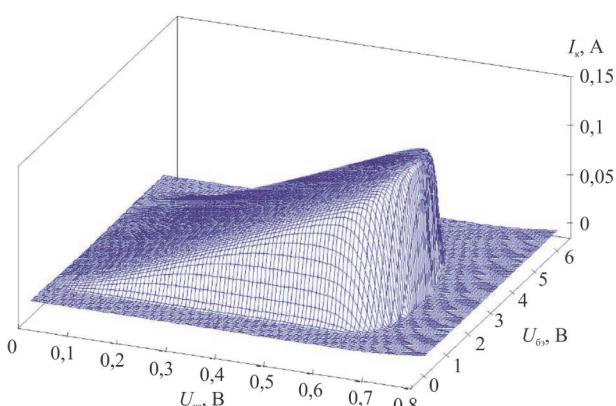
Цепь положительной обратной связи в основном N-приборе образована шунтирующим транзистором, коллектор-эмиттерная цепь которого управляет величиной тока база-эмиттер основного транзистора. При малых значениях коллекторного напряжения основного транзистора его эмиттерный переход закрыт и ток утечки базы минимален. При дальнейшем увеличении напряжения коллектор-эмиттер эмиттерный переход шунтирующего транзистора открывается, и прибор из режима отсечки переходит в активный режим работы, уменьшая, таким образом, ток базы основного транзистора и, следовательно, ток коллектора, что приводит к возникновению падающего участка тока при возрастающем напряжении на выходной характеристике [11].

При увеличении напряжения на входе такого комбинированного прибора его управляющий ток будет возрастать до момента, когда ток  $\lambda$ -диода достигнет максимального значения. Далее с ростом напряжения на  $\lambda$ -диоде происходит снижение тока, протекающего через него, а в данном случае и тока управления второго негатрона (рис. 10, б). Тем самым, происходит ограничение тока управления и возникновение участка отрицательной проводимости на передаточной ВАХ комбинированного прибора.

Для проверки принципиальной работоспособности схемы проведено схемотехническое моделирование.

В результате моделирования получены семейство ВАХ, изображенные в виде поверхности на рис. 11.

Сечение этой поверхности плоскостью  $(I_{\text{к}}, U_{\text{кэ}})$  при фиксированном напряжении  $U_{\text{бэ}}$



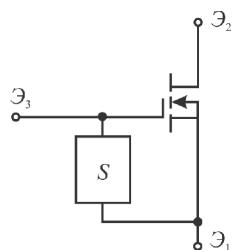
**Рис. 11.** Семейство выходных характеристик негатрона с передаточной N-образной ВАХ дает выходную характеристику, а сечение плоскостью  $(I_k, U_{63})$  – передаточную.

Как видно из рисунка, при увеличении входного напряжения первоначально происходит рост тока коллектора, а затем уменьшение. Это и обеспечивает режим защиты по входу. Наличие второй положительной ветви на экспериментальных ВАХ обусловлено отсутствием в схеме корректирующих резистивных цепей.

В соответствие с представленными в табл. 1 вариантами передаточная N-образная ВАХ должна наблюдаться и в случае, когда входная ВАХ имеет S-образный вид. (см. варианты 4 и 5).

Для подтверждения этого предположения проведено схемотехническое моделирование полупроводниковых комбинированных приборов с входными S-образными ВАХ и выходными характеристиками полевого транзистора (вариант 4) и прибора с N-образными выходными ВАХ.

Для варианта 4 представленного в табл. 1 была рассмотрена структурная схема, изложенная на рис. 12.



**Рис. 12.** Структурная схема полевого транзистора с передаточными N-образными ВАХ

Особенностью представленной схемы является следующее.

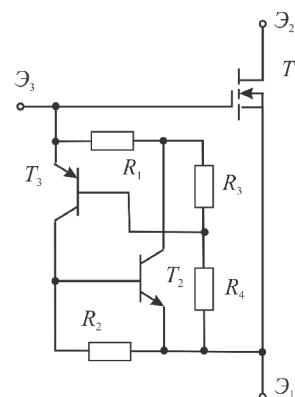
Поскольку в качестве управляемого прибора выбран полевой транзистор с изолированным затвором, то его выходные параметры должны управляться напряжением, приложенным между затвором  $\mathcal{E}_3$  и истоком  $\mathcal{E}_1$ . Если при этом реализовать изменение входного напряжения таким

образом, что оно сначала увеличивается и затем уменьшается, то выходной ток рассматриваемого полевого транзистора, также будет сначала увеличиваться (с ростом напряжения на затворе) а затем уменьшаться (при уменьшении напряжения на затворе). В этом случае передаточная ВАХ такого комбинированного прибора ( $I_{\mathcal{E}2}(U_{\mathcal{E}1\mathcal{E}3})$ ) будет обладать участком отрицательной проводимости, т.е. являться N-образной передаточной характеристикой.

Ситуацию, связанную с первоначальным ростом напряжения на затворе полевого транзистора и дальнейшим его снижением можно реализовать с помощью неуправляемого полупроводникового прибора с S-образной вольт-амперной характеристикой, например, динистора [13,14] или его двухтранзисторного схемотехнического аналога [1,9,15]. Такой полупроводниковый прибор должен включаться параллельно цепи затвор-исток полевого транзистора.

Для подтверждения прогнозных результатов была построена схемотехническая модель, включающая управляемый полевой транзистор с изолированным затвором и управляющий двухтранзисторный аналог динистора с дополнительными резистивными делителями, необходимыми для согласования уровней напряжений и токов.

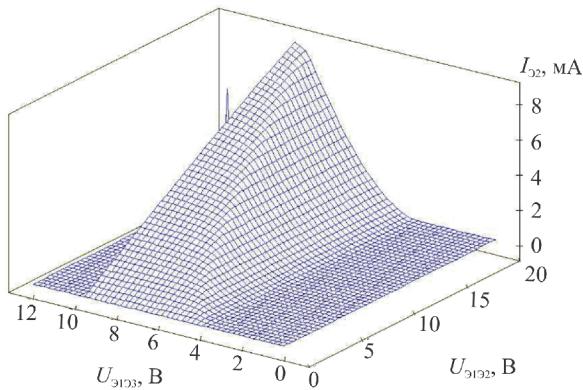
Принципиальная электрическая схема модели приведена на рис. 13.



**Рис. 13.** Схемотехническая модель полевого транзистора с передаточными N-образными ВАХ

Типовые семейства выходных и передаточных характеристик приведены на рис. 14.

Сечения плоскостью  $(I_{\mathcal{E}2}, U_{\mathcal{E}1\mathcal{E}2})$  представляют собой типичные выходные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором, а сечения плоскостью  $(I_{\mathcal{E}2}, U_{\mathcal{E}1\mathcal{E}3})$  являются передаточными ВАХ. Передаточные ВАХ у такой схемотехнической модели имеют N-образный вид, что позволяет отнести их к классу приборов с передаточными N-образными характеристи-

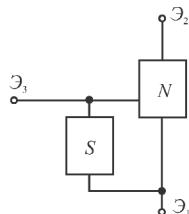


**Рис. 14.** Семейства выходных и передаточных ВАХ полевого транзистора с передаточными N-образными ВАХ

стиками.

При рассмотрении в качестве управляемого прибора с N-образными выходными характеристиками и включении в его цепь управления прибора с выходными S-образными характеристиками можно также получить передаточные N-образные ВАХ (вариант 5 табл. 1).

Структурная схема этого варианта получения N-образных передаточных ВАХ изображена на рис. 15.

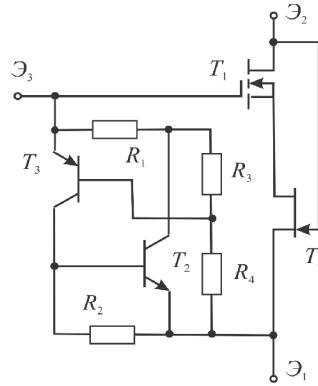


**Рис. 15.** Структурная схема комбинированного прибора с передаточными N-образными ВАХ

В данном случае полупроводниковый прибор, обладающий N-образной выходной ВАХ должен быть управляем напряжением [9]. Тогда наличие изменяющегося напряжения на его входе позволяет получать семейство выходных характеристик N-типа.

При условии, что входное напряжение сначала увеличивается, а потом уменьшается (как у тиристора или динистора) можно получить передаточные характеристики N-типа.

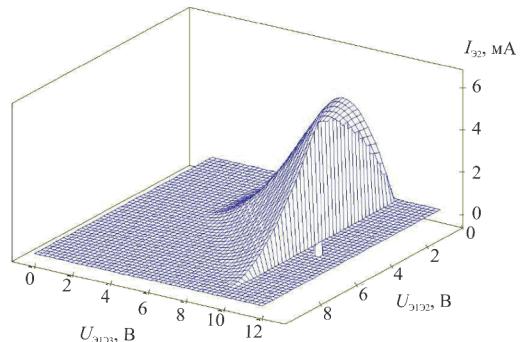
Для проверки правильности прогноза реализована схемотехническая модель такого прибора. В качестве управляемого прибора с N-образной ВАХ использован двухтранзисторный аналог [9], состоящий из полевого транзистора с изолированным затвором и полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом на основе реализации положительной обратной связи посредством модуляции нагрузки. В качестве управляющего элемента использован схемотехнический аналог неуправляемого полупроводниково-



**Рис. 16.** Принципиальная электрическая схема комбинированного прибора с передаточными N-образными ВАХ.

го прибора с S-образной вольт-амперной характеристикой, например, динистора [13,14] или его двухтранзисторного схемотехнического аналога [1, 9, 15]. Принципиальная схема исследуемого аналога приведена на рис. 16.

На рис. 17 приведены типовые семейства выходных и передаточных ВАХ рассмотренной схемы. Как видно из графиков, характеристики образуют поверхность, ограничивающую область рабочих режимов для данного прибора.



**Рис. 17.** Семейства выходных и передаточных ВАХ комбинированного прибора с передаточными N-образными ВАХ

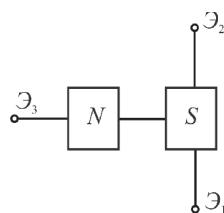
Как и в предыдущем случае, сечения плоскостью  $(I_{32}, U_{3132})$  представляют собой выходные характеристики комбинированного прибора, а сечения плоскостью  $(I_{32}, U_{3133})$  являются передаточными ВАХ. Данные характеристики также имеют участок отрицательной дифференциальной проводимости.

Таким образом, комбинации двух приборов у одного из которых во входной ВАХ наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления, а другой прибор управляет напряжением, могут обладать передаточной ВАХ, содержащей участок отрицательной проводимости. Подобные комбинации ограничивают области допустимых токов и напряжений при работе

управляемых приборов, что существенно снижает вероятность их выхода из строя при различных несанкционированных скачках токов и напряжений в управляющих ветвях.

Кроме того, рассмотренные варианты комбинированных приборов можно отнести к классу приборов с отрицательным сопротивлением и отрицательной проводимостью на передаточной ВАХ. Кроме N-образных передаточных характеристик возможно также реализовать и передаточные S-образные ВАХ. В соответствии с табл. 1 возможны два варианта 3 и 6 наблюдения передаточных S-образных ВАХ, которые реализуются при использовании в качестве управляемого элемента прибора с выходной S-образной ВАХ.

В первом случае (рис. 18) в качестве управляемого элемента используется трехэлектродный управляемый током прибор с выходной S-образной характеристикой. Как отмечалось в предыдущем параграфе, в качестве такого прибора могут выступать тиристор или симистор. В качестве управляющего прибора можно использовать любой двухэлектродный N-прибор или его схемотехнический аналог. В результате такой комбинации происходит следующее. При первоначальном росте тока управления, протекающего через N-прибор, включенный в цепь управления S-прибора, у последнего наблюдается снижение напряжения переключения, вплоть до спрямления (исчезновения участка ОДС) характеристики. Однако при дальнейшем снижении тока управления S-прибора, связанного с переходом на участок отрицательной проводимости на характеристике N-прибора, на выходной ВАХ S-прибора происходит рост напряжения переключения.

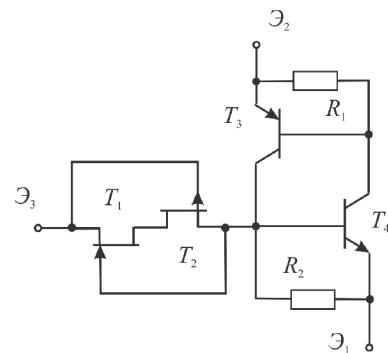


**Рис. 18.** Структурная схема комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ

Таким образом, зависимость выходного напряжения прибора, реализованного по структурной схеме, изображенной на рис. 18, от входного тока имеет участок отрицательного сопротивления.

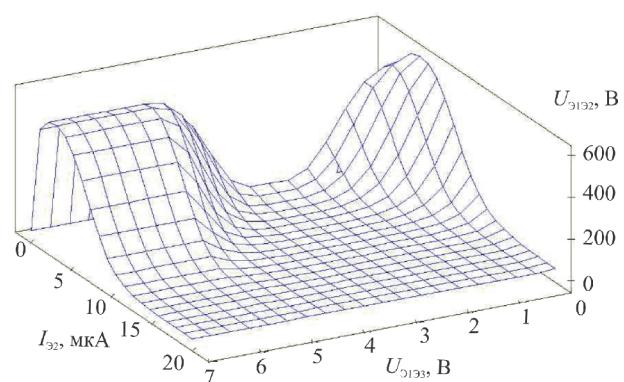
На рис. 19 изображена модельная схема комбинированного прибора такого типа. В качестве управляемого S-прибора использован двухтранзисторный схемотехнический аналог тиристора, а в качестве управляющего - схемотехнический аналог  $\lambda$ -диода. Дополнительные резистивные элементы в схеме обеспечивают режим согласования токов и напряжений для этих двух анало-

гов в составе схемы комбинированного прибора с передаточной ВАХ S-типа.



**Рис. 19.** Схема комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ

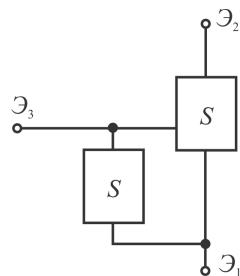
На рис. 20 приведены выходные и передаточные характеристики такого прибора. График представляет собой поверхность, сечение которой плоскостью  $(U_{Э1Э2}, I_{22})$  представляют собой типичные выходные характеристики S-прибора, управляемого током, а сечения плоскостью  $(U_{Э1Э2}, U_{Э1Э3})$  являются передаточными ВАХ.



**Рис. 20.** Выходные и передаточные характеристики комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ

Особенностью представленной на рис. 20 характеристики является то, что поверхность является неограничивающей. Для нахождения рабочих режимов для данного прибора, необходимо искусственно ограничить области входных напряжений для предотвращения перехода выходной характеристики N-прибора в область вторичной положительной ветви.

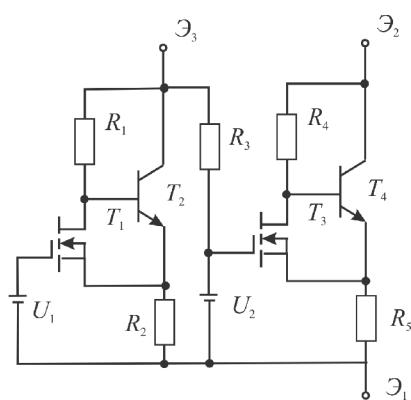
Другой вариант (вариант 6 табл. 1) представляет собой комбинированный трехэлектродный прибор управляемый напряжением с выходной S-образной ВАХ, управляемый двухэлектродным прибором также с S-образной выходной ВАХ (рис. 21). В результате такого взаимодействия на передаточной ВАХ наблюдается участок отрицатель-



**Рис. 21.** Структурная схема комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ ного дифференциального сопротивления.

При использовании такой комбинации начальный рост входного напряжения, а затем его уменьшение обеспечивают первоначальный рост выходного напряжения а затем его уменьшение, и появление таким образом передаточной ВАХ S-типа.

В качестве модели такого прибора рассмотрена схема, представленная на рис. 22.



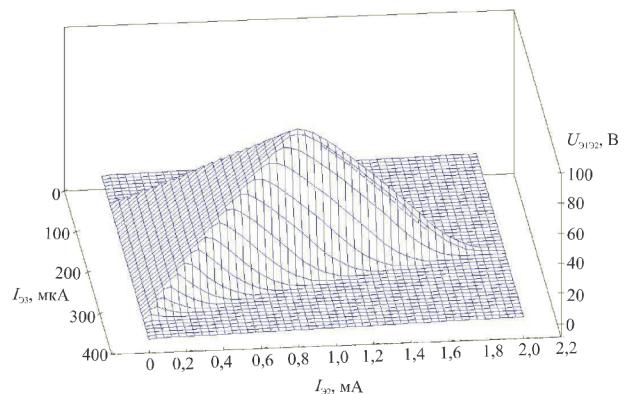
**Рис. 22.** Схема комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ

Для построения S-приборов использована схема [9], включающая в себя полевой транзистор с изолированным затвором и биполярный транзистор. Полевой транзистор выполняет роль управляемого шунта, включенного параллельно база-эмиттерному переходу биполярного транзистора. Для получения выходной ВАХ с участком отрицательного дифференциального сопротивления у такого прибора необходимо наличие дополнительного источника напряжения, подключенного к затвору полевого транзистора.

При реализации комбинированного прибора с передаточной S-образной ВАХ использованы два одинаковых S-типов, включенных по схеме, приведенной на рис. 21 с дополнительностью введенными в схему резистивными делителями напряжения для согласования уровней входных и выходных напряжений S-приборов.

Выходные и передаточные характеристики у

рассмотренной схемы в одном поле представляют собой поверхность, представленную на рис. 23.



**Рис. 23.** Выходные и передаточные характеристики комбинированного прибора с передаточными S-образными ВАХ

Сечения представленной поверхности плоскостью  $(I_{\text{Э}2}, U_{\text{Э}1\text{Э}2})$  представляют собой типичные выходные характеристики S-прибора, а сечения плоскостью  $(I_{\text{Э}2}, U_{\text{Э}1\text{Э}3})$  являются передаточными ВАХ. Передаточные ВАХ также имеют участок отрицательного дифференциального сопротивления, т.е. являются S-образными.

Приведенные примеры реализации приборов с передаточными ВАХ S-типа предполагают существование отдельного класса приборов - приборов с передаточными ВАХ S-типа.

По результатам исследований, представленных в данной статье можно сделать следующие выводы:

1. Помимо входных и выходных статических вольт-амперных характеристик с участками отрицательного сопротивления и отрицательной проводимости полупроводниковые приборы могут обладать и передаточными вольт-амперными характеристиками с ОДП и ОДС, в результате чего, для проведения анализа необходимо рассматривать три типа характеристик: входные, выходные и передаточные. наличие участков ОДП и ОДС на этих характеристиках значительно расширяет существующие классификации полупроводниковых приборов.

2. В результате проведенных исследований обнаружен и разработан новый класс приборов с передаточными N-образными ВАХ. Общим важным свойством приборов данного класса является ограничение входных токов и напряжений, предотвращающее переход прибора в режимы теплового пробоя, что можно использовать для создания полупроводниковых приборов с защищенной от скачков тока и напряжения во входных и выходных цепях.

3. Обнаружен новый класс приборов с переда-

точными S-образными ВАХ. Приборы данного класса обладают расширенными функциональными возможностями по сравнению с известными приборами с S-образными выходными ВАХ.

Таким образом, исследования, представленные в данной статье указывают на перспективу дальнейшего развития физики и техники полупроводниковых приборов с ОДС и ОДП в направлении создания твердотельных и интегральных приборов с участками отрицательного сопротивления на передаточных ВАХ, исследования влияния различных полей и излучений на свойства таких приборов, что может привести к созданию новой элементной и компонентной базы современной электроники.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 годы” и “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы”*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гаряинов С.А., Абезгауз И.Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным со противлением. М.: Энергия, 1970. С. 320.
2. Гаряинов С.А., Тихоедев Ю.С. Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением. М.: Радио и связь, 1997. С. 276.
3. Полярно-чувствительные N-образные входные вольт-амперные характеристики симисторной структуры / С.Б. Бакланов, Н.Т. Гурин, Е.В. Лычагин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2003. № 6. С. 17–21.
4. Стafeев B. I., Van-Shou-Цзюе, Филина Л.В. Триоды с N-образной характеристикой // Радиотехн. и электрон. 1962. Т. 7. № 8. С. 1404–1408.
5. Two-terminal negative resistance device employing bipolar-unipolar transistor combination: пат. 3670183 / Ager David Joseph, Stanley Ian William; опубл. June.1972.
6. Многоустойчивый полупроводниковый прибор: пат. 1095409 / Корабельников А.Т. № 3503218; заявл. 14.10.1982; опубл. 30.05.1984. Бюл. №20.
7. Многоустойчивый полупроводниковый прибор (его варианты): пат. 1129720 / Корабельников А.Т. № 3546515; заявл. 28.01.1983; опубл. 15.12.1984. Бюл. №46.
8. Семёнов А.А., Усанов Д.А. Активный двухполюсник с S- и N-образной вольт-амперной характеристикой // Изв. вузов. Электроника. 2009. № 2. С. 17–21.
9. Chua L, YuJuebang, Yu Youying. Bipolar-JFET-MOSFET negative resistance devices // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1985. Vol. 32. P. 46–61.
10. Новиков С.Г., Гурин Н.Т., Корнеев И.В. Моделирование и исследование биполярного транзистора с передаточной п-образной вольт-амперной характеристикой // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 4. С. 14–19.
11. Новиков С.Г., Гурин Н.Т., Корнеев И.В. Моделирование и исследование негатрона с передаточной N-образной вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 4. С. 17–24.
12. Полупроводниковый прибор со встроенной защитой в цепях управления и нагрузки: пат. 2428765 Российская Федерация: / Новиков С.Г. Гурин Н.Т., Корнеев И.В.; заявитель и патентообладатель УлГУ. № 2010116561/28; заявл. 26.04.2010; опубл. 10.09.2011. Бюл. №25.
13. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В. Тиристоры. М.: Сов. радио, 1980. С. 64.
14. Герлах В. Тиристоры [пер. с нем]. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 328.
15. Тейлор П. Расчет и проектирование тиристоров / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 208.

## **SEMICONDUCTOR DEVICES WITH NEGATIVE RESISTANCE OF TRANSFER VOLT-AMPERE CHARACTERISTIC**

© 2013 S.G. Novikov, N.T. Gurin, A.V. Berintsev, V.A. Rodionov, A.A. Shtan'ko

Ulyanovsk State University

We consider a novel class of semiconductor devices with transfer volt-ampere characteristics comprising a segment with negative differential conductivity and negative differential resistance. Methods to describe and realize devices with S-and N-shape transfer volt-ampere characteristics are offered. Also, transfer characteristics have been simulated.

**Keywords:** negative resistance, negative conductivity, modeling, transfer volt-ampere characteristic.

*Sergey Novikov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Radiophysics and Electronics Department.*

*E-mail: novikovsg@ulsu.ru*

*Nectary Gurin, Doctor of Technics, Professor, Head at the Radiophysics and Electronics Department, Vice-chancellor.*

*E-mail:gurinnt@sc.ulsu.ru*

*Alexei Berintsev, Research Fellow at the Laboratory of Solid State Electronics in Research Institute of Technology.*

*E-mail: berints@mail.ru*

*Vyacheslav Rodionov, Research Fellow, Research Institute of Technology. E-mail: slv\_ldm@mail.ru*

*Alexander Shtan'ko, Research Fellow, Research Institute of Technology.*