

10124

79 / 2-77

473

A-724

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

10/1-77



13 - 10124

А.В.Антонов, В.Н.Синицын, В.Г.Субботин

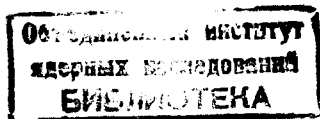
ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ  
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА

1976

13 - 10124

А.В.Антонов, В.Н.Синицын, В.Г.Субботин

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ  
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА



Антонов А.В., Сеницын В.Н., Субботин В.Г.

13 - 10124

Зависимость параметров полевых транзисторов от температуры и электрического режима

Описана методика измерения основных параметров полевых транзисторов с помощью характериографа, приводится схема, описание характериографа и характеристики полевых транзисторов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полевые транзисторы являются наиболее перспективными активными элементами, применяемыми в усилителях с большим входным сопротивлением.

Основным параметром, характеризующим спектрметрические свойства системы детектор-предусилитель, является энергетическое разрешение, которое зависит от шумовых свойств как детектора, так и полевого транзистора, используемого в первом каскаде предусилителя.

Поскольку параметрами, определяющими шумовые свойства полевых транзисторов, является ток затвора  $I_{зат.}$  и крутизна  $S$ , то необходимо знать, как изменяются эти величины в зависимости от электрического режима полевого транзистора и температуры. По измеренным значениям  $I_{зат.}$  и  $S$  можно определить теоретическое значение энергетического разрешения предусилителя. Отклонение экспериментально полученного разрешения от теоретического представляет интерес с точки зрения оценки вклада шумов типа "f" и "1/f", относящихся к избыточным шумам полевого транзистора, а также к шумам пассивных элементов входного каскада.

Данная работа посвящена методике измерения параметров полевых транзисторов с помощью характериографа. Снятие вольтамперных характеристик по "точкам" с использованием прибора, описанного в [1], и подсчет параметров  $I_{зат.}$  и  $S$  могут привести к неточностям,

возникающим из-за прогрева кристалла полевого транзистора во время снятия показаний стрелочных приборов, что особенно существенно при больших токах стока.

Отличительной особенностью данного характеристики является возможность изменения частоты напряжения развертки от долей герца до нескольких  $\kappa\Gamma\text{ц}$ , а это является важным фактором при наблюдении выходных вольт-амперных характеристик транзистора с включенным в цепь затвора высокоомным сопротивлением.

## 2. АППАРАТУРА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

На рис. 1 приведена схема установки для снятия электрических параметров полевых транзисторов в зависимости от температуры и режима. Основной частью установки является характериограф, состоящий из блока, вырабатывающего напряжение питания полевого транзистора, и любого стандартного осциллографа, в данном случае - "ОКД-505", имеющего достаточно высокую чувствительность усилителей по "X" и "Y".

Принципиальная схема состоит из двух основных частей: генератора пилообразного напряжения с регулируемой частотой развертки, и генератора ступенчатого напряжения.

Для подсчета крутизны снимаются выходные вольт-амперные характеристики при различных напряжениях на затворе /рис. 4а/.

Для измерения тока затвора  $I_{\text{зат}}$  полевого транзистора необходимо снять две вольт-амперные характеристики, показанные на рис. 4б, одна из которых снимается при заземленном затворе, а вторая - при подключенном сопротивлении  $56 \text{ ГОм}$ , при этом, естественно, наблюдается небольшое увеличение тока стока за счет возрастания потенциала на затворе. Ток затвора для каждого значения  $U_{\text{ст}}$  подсчитывается по формуле:

$$I_{\text{зат}} = \frac{\Delta I_{\text{ст}}}{R_{\text{зат}} : S} \text{ [A].}$$

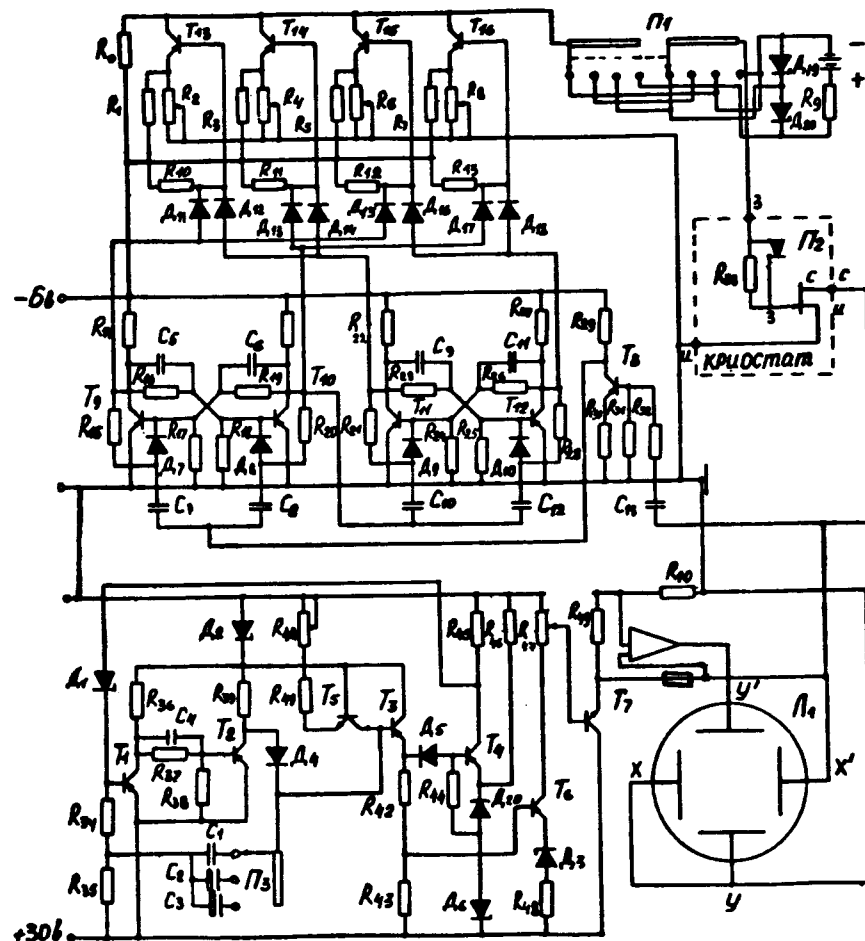


Рис. 1. Принципиальная схема установки для снятия электрических параметров полевых транзисторов.

В реальных схемах предусилителей на затвор через сопротивление  $R_{\text{ос}}$  подается величина смещения, поэтому представляет интерес определение зависимости тока затвора от тока стока и напряжения на нем. Такие вольт-амперные характеристики показаны на рис. 4в,2 при комнатной и оптимальной температурах. Характеристики, предназначенные для измерения тока затвора, снимаются при медленной развертке  $\sim 20 \text{ с}$ .

### Измерение $r_{ис.}$ и $r_{ст.}$

Величины  $r_{ис.}$  и  $r_{ст.}$  представляют собой объемные сопротивления полупроводника на участках между концами канала и контактами истока и стока.  $r_{ис.}$  приводит к уменьшению действующего значения крутизны, снижению частотного предела транзистора, увеличению тепловых потерь.  $r_{ст.}$  увеличивает тепловые потери и повышает напряжение насыщения.

С помощью характеристики можно снять необходимые характеристики, позволяющие простым способом вычислить  $r_{ис.}$  и  $r_{ст.}$ . Поскольку исток и сток полевого транзистора в схеме можно поменять местами, то достаточно рассмотреть вопрос измерения сопротивления истока. Схемы, поясняющие принцип измерения и необходимые вольтамперные характеристики, приведены на рис. 2 и 3.

Сопротивление  $r_{ис.}$  обычно в полевых транзисторах достигает не более десятков Ом. Через сопротивление  $r_{ис.}$  могут проходить два тока:

1/ ток стока  $I_{ст.}$ ;

2/ ток затвора  $I_{зат.}$ , если р-п переход "затвор-исток" включен в прямом направлении. Эти токи создают падение напряжения на сопротивлении  $r_{ис.}$

$$U_{r_{ис.}} = r_{ис.} (I_{зат.} + I_{ст.}).$$

Падение напряжения  $U_{r_{ис.}}$  можно определить, сняв две прямые ветви характеристики  $I_{зат.} = f(U_{зи})$  перехода "затвор-исток", одна из которых - при разомкнутом стоке, а вторая - при включенном напряжении  $U_{ст.}$ . Если принять во внимание, что прямые ветви характеристики можно снимать при достаточно малых токах затвора /единицы мкА/, то падением напряжения на  $r_{ис.}$  за счет тока затвора можно пренебречь, тогда измерение  $U_{r_{ис.}}$  сведется к определению напряжения, на которое сместится характеристика  $I_{зат.} = f(U_{зи})$  при прохождении тока  $I_{ст.}$  через  $r_{ис.}$  /см. рис. 3/

$$U_{r_{ис.}} = \Delta U_{зи}.$$

Зная ток стока, можно вычислить сопротивление  $r_{ис.}$

$$r_{ис.} = \frac{\Delta U_{зи}}{I_{ст.}} \text{ [ Ом ]}.$$

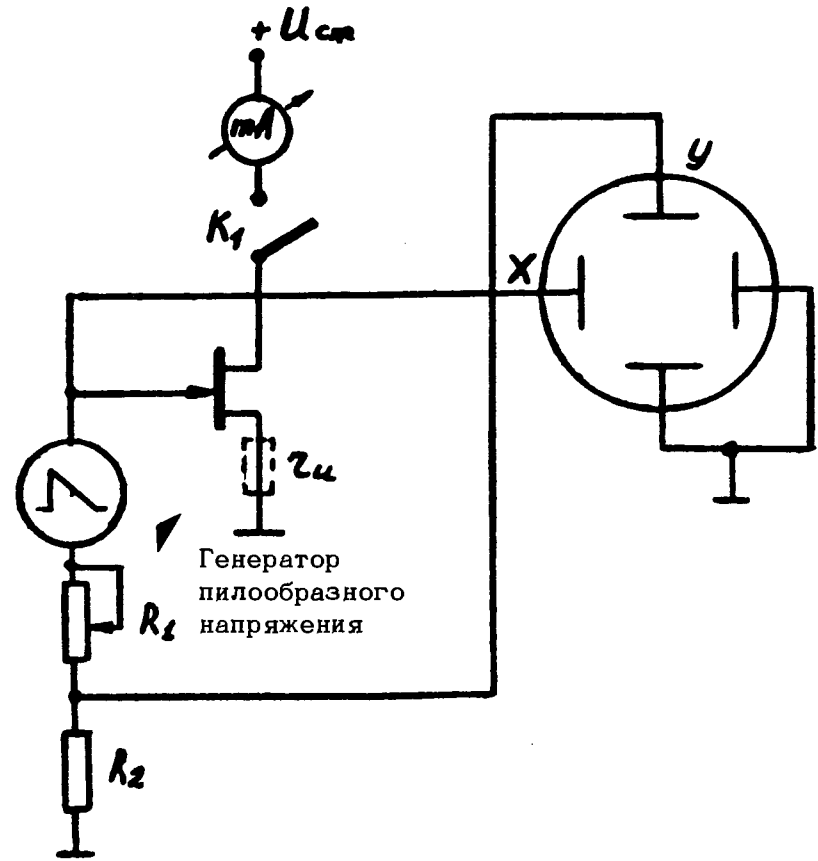


Рис. 2. Принципиальная схема для снятия входных характеристик полевых транзисторов.

Таким образом, для определения  $r_{ис.}$  достаточно на характеристикографе снять две прямые ветви характеристики  $I_{зат.} = f(U_{зи})$  при включенном и отключенном стоке, определить смещение характеристики  $\Delta U_{зи}$  и по формуле вычислить  $r_{ис.}$ , предварительно замерив ток стока.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнительной оценки электрических параметров и дальнейшего их сопоставления с шумовыми свойст-

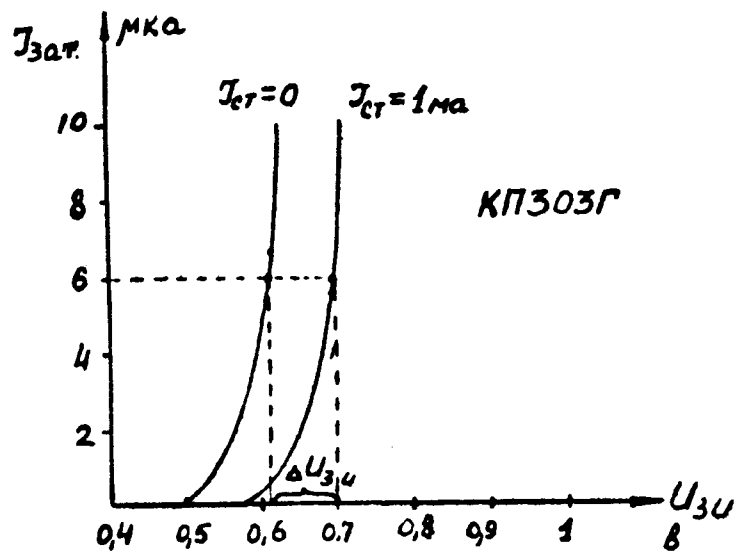


Рис. 3. Прямые ветви входных характеристик полевого транзистора, позволяющие вычислить  $\Gamma_{ис}$ :

вами в качестве объектов исследования были выбраны различные типы транзисторов.

Все параметры, кроме  $\Gamma_{ис}$  полевых транзисторов, измерялись в диапазоне температур от +20 до -180 C. На рис. 4 и 5 приведены вольтамперные характеристики различных типов полевых транзисторов при комнатной и оптимальной температурах.

Результаты измерений сведены в табл. I и II. Из полученных результатов можно установить зависимость основных параметров полевых транзисторов не только от температуры, но и от электрического режима, последнее особенно важно, так как в переходе "З - С" при определенном напряжении на стоке возникает ударная ионизация, влияющая на параметры полевого транзистора. Поэтому характеристики полевых транзисторов необходимо рассматривать отдельно при двух режимах: до возникновения ударной ионизации и при ее наибольшем эффекте. Это обстоятельство является важным для разработчиков схем предусилителей, использующих эффект ударной ионизации для обратной связи в сток.



Рис. 4а. Выходные характеристики транзистора 2N4416 №1. Характеристики сняты при напряжении на затворе  $U_{зи}$  от -0,2 В /верхняя кривая/ до -1,6 В и от -2,4 В до -3,0 В.

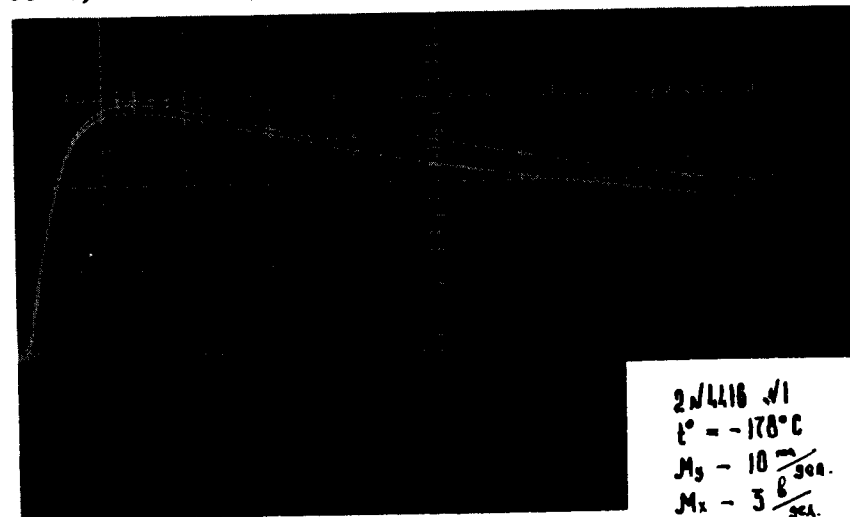
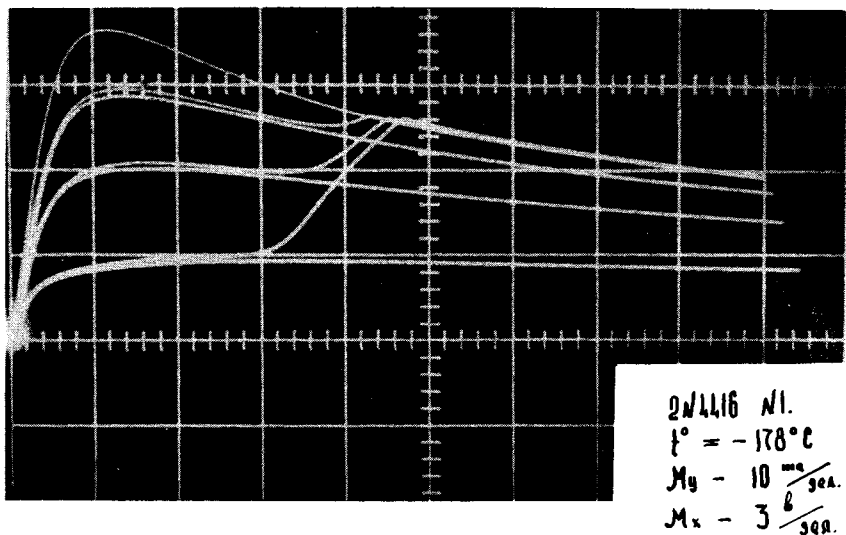
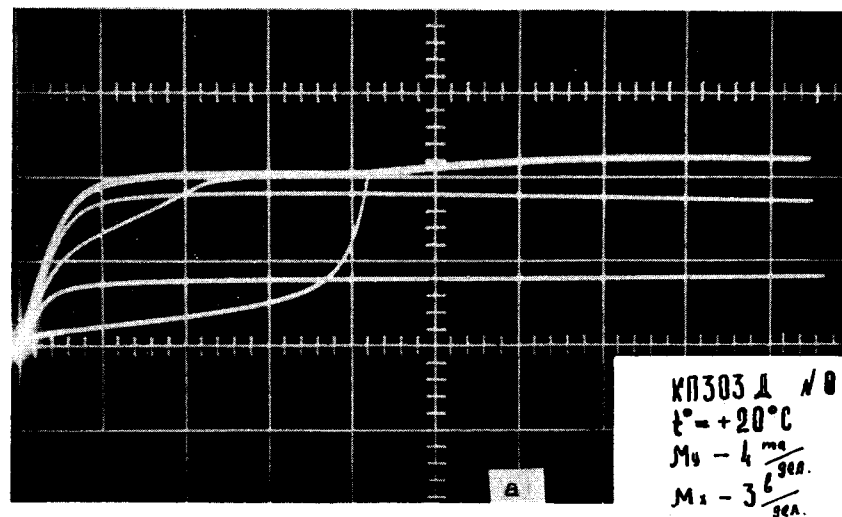


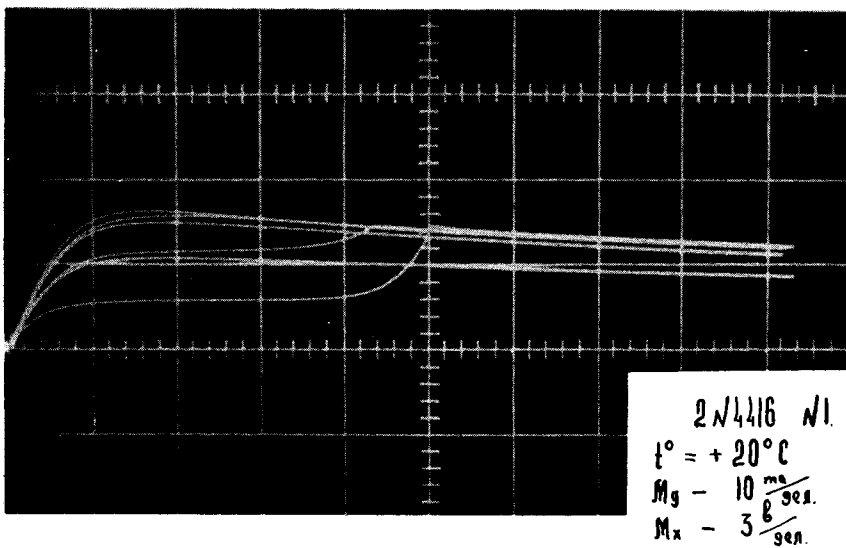
Рис. 4б. Выходные характеристики транзистора 2N4416 №1. Верхняя кривая при включенном в цепь затвора сопротивление, равном 56 Ом, нижняя кривая - затвор заземлен.



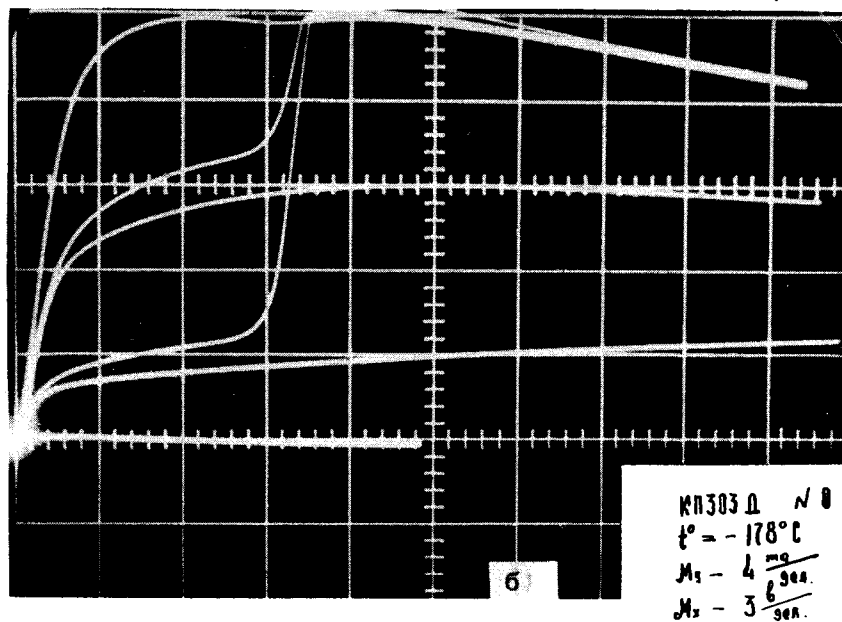
В



А



Г



Б

Рис. 4в,г. Выходные характеристики транзистора 2N4416 №1 при смещении на затворе  $U_{зи} = 0 \text{ В}$ ;  $U_{зи2} = -0,8$ ;  $U_{зи3} = -2,2 \text{ В}$ .

Рис. 5а,б. Выходные характеристики полевого транзистора КП303Д № 8 с включенным в цепь затвора сопротивлением 56 ГОм и без него, при смещении  $U_{зи1} = 0 \text{ В}$ ;  $U_{зи2} = -0,8 \text{ В}$ ;  $U_{зи3} = -2,2 \text{ В}$ .

Таблица 1

№	Тип тран- зистора	T°С	U <sub>от</sub> [В]		3	6	9	12	13	14	15	21
			J <sub>от</sub> [мА]	J <sub>зар.</sub>								
x 10 <sup>-12</sup> [А]												
1.	2M416	+20	14		2.1	3.0	3.5	3.6				3.6
		+20	10		2.1	3.0	3.3	3.2				14
		-178	30		1.8	1.6	2.2	1.0	4.5			
2.	2M416	+20	12		1.8	3.2	3.7	4.2				4.2
		+20	8		1.8	3.2	3.9	5.2				15.7
		-178	20		1.7	1.6	1.6	1.7	6.3			
3.	2M3823	+20	6		2.9	3.0	3.1	3.3				3.5
		+20	2		4.7	5.3	6.7	8	18			10.7
		-178	6		2.4	2.7	2.7	7.8	49			
4.	2M3823	+20	16		3.0	4.0	4.5	4.5				4.5
		+20	12		3.5	5.4	6.2	8.2				7.3
		-178	30		3.5	3.6	3.2	3.2	12.5			
5.	2M3884	+20	5		2.6	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
		+20	3		3.1	2.8	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	5.0
		-178	10		1.8	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	10
6.	M303Г	+20	8		3.6	4.0						
		+20	4		1.3	2.0						
		-178	12		3.3	3.3	3.8	4.0				
		+20	6		2.2	2.8	3.6	4.0				

Продолжение таблицы 1

№	Тип тран- зистора	T°С	U <sub>от</sub> [В]		3	6	9	12	13	14	15	21
			J <sub>от</sub> [мА]	J <sub>зар.</sub>								
x 10 <sup>-12</sup> [А]												
7.	M303Г	+20	10		2.4	2.6	2.6	4.1				
		+20	4		9.0	14.0	25.0	27.0				
		-178	14		2.6	3.7	12.0	12.0				
8.	21E03Д	+20	6		2.5	3.1	36.0	56.0				
		+20	8		2.7	2.7	2.7	4.2				
		+20	3		3.5	15.0	17	17				
		-178	12		2.3	3.2	4.6	71				

Таблица 2.

Тип тран- зистора	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Z <sub>ис</sub> [Ом]	7,3	7,9	17	11,3	29,2	20	8,6	14



## Режим ударной ионизации полевого транзистора

Поскольку детекторы ядерных излучений являются высокоомными источниками сигналов для зарядочувствительного предусилителя, то ток затвора полевого транзистора оказывает существенное влияние на стабильность режима, усилительные и шумовые параметры предусилителя. Вопросу измерения тока затвора посвящен ряд работ /2-4/.

Выходные характеристики полевых транзисторов /5/ имеют три области:

1. Омическая /ток стока пропорционален напряжению стока/.

2. Область насыщения /ток стока практически не зависит от напряжения на стоке/.

3. Область лавинного пробоя участка канала затвор - сток.

Возникновение процесса ударной ионизации в переходе затвор-сток можно наблюдать при снятии выходных вольтамперных характеристик с включенным большим сопротивлением в цепь затвора  $R_{зат.} = 56 \text{ ГОм}$ , с помощью которого можно установить зависимость тока затвора от режима полевого транзистора, величину тока затвора за счет ударной ионизации, а также режим полевого транзистора, при котором начинается ударная ионизация. Эти экспериментальные данные являются важными при построении предусилителей со стоковой обратной связью, а также при построении широкополосных низкошумящих усилителей, так как быстродействие схемы зависит от минимального времени пролета носителей в канале, что, в свою очередь, определяется напряжением на стоке полевого транзистора.

## ВЫВОДЫ

Рассматривая выходные характеристики полевых транзисторов при комнатной и оптимальной температурах, можно сделать следующие выводы:

1. Ток стока и крутизна полевого транзистора при охлаждении увеличиваются примерно в 1,5 - 2 раза.

2. При использовании полевых транзисторов в качестве активных элементов с большим входным сопротивлением изменение тока затвора при комнатной и оптимальной температурах в зависимости от  $I_{ст.}$  и  $U_{ст.}$  необходимо рассматривать до возникновения режима ударной ионизации и после него, поскольку этот параметр ведет себя по-разному в таких режимах.

3. Ток затвора до возникновения режима ударной ионизации при комнатной температуре увеличивается при уменьшении тока стока, благодаря увеличению обедненной области, в которой образуются носители, составляющие генерационную компоненту тока, например, транзисторы №№4 и 8 при напряжении на стоке 3 и 6 В /табл.1/.

4. Ток затвора в холоде уменьшается с уменьшением тока стока до возникновения ударной ионизации, несмотря на увеличившуюся обедненную зону. Уменьшение генерационной компоненты тока происходит за счет уменьшения разогрева кристалла с понижением тока стока. /Транзисторы 4 и 6 для напряжений на стоке 3 и 6 В при токе стока, равном соответственно 30-20 мА и 12-6 мА/.

5. Ток затвора в режиме ударной ионизации при охлаждении увеличивается с уменьшением тока стока, поскольку число пар носителей увеличивается вследствие увеличения объема обедненной зоны перехода затвор-сток. /Транзисторы №№ 1 и 7 при напряжении на стоке 12 В и токе стока, равном 30 - 20 мА и 14 - 6 мА соответственно/. Температурное поведение тока затвора в режиме ударной ионизации обсуждается в работе /2/.

6. Ударная ионизация наблюдается и при комнатной температуре, но так как подвижность носителей мала, то граница возникновения начала пробоя лежит при более высоких напряжениях на стоке. При охлаждении до оптимальных температур /150-180°С/ за счет резкого возрастания подвижности носителей /2,6/ ударная ионизация возникает при меньших напряжениях на стоке.

7. С уменьшением тока стока в области оптимальной температуры уменьшается температура кристалла, увеличивая подвижность носителей, поэтому ударная ионизация возникает при несколько меньшем напряжении на стоке.

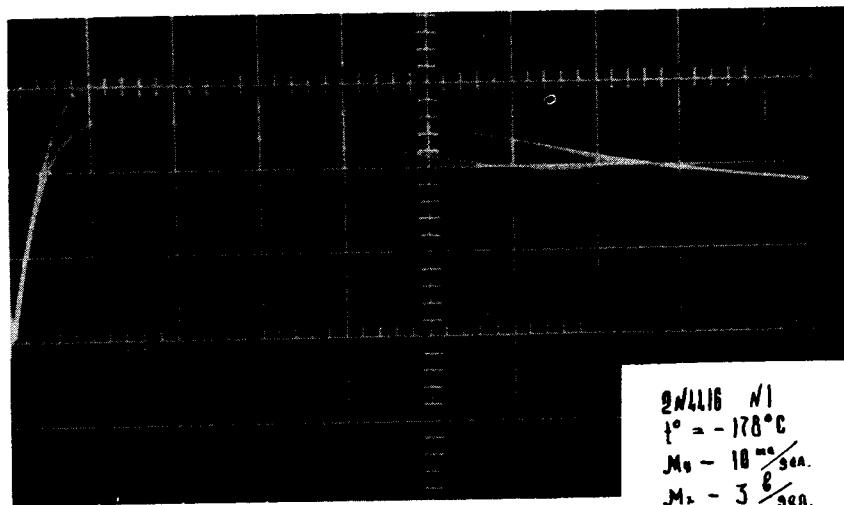


Рис. 6а. Изменение крутизны полевого транзистора 2N4416 в зависимости от режима.

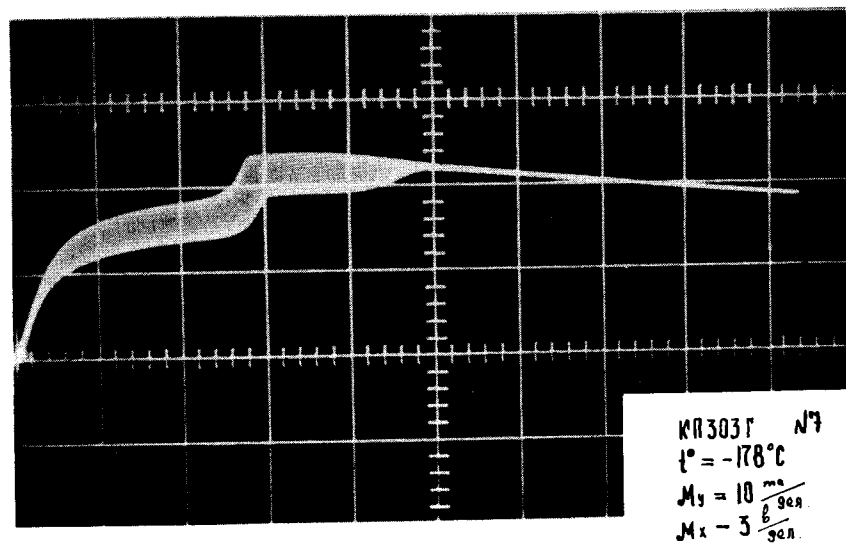


Рис. 6б. Изменение крутизны полевого транзистора КП303Г в зависимости от режима.

8. Крутизна полевого транзистора изменяется в зависимости от режима ударной ионизации /рис. 6а,б/. При протекании больших токов затвора вследствие ударной ионизации переход затвор-канал становится включенным в прямом направлении, и канал больше не управляется затвором, крутизна в таком режиме равна нулю.

9. Сравнивая характеристики различных полевых транзисторов по режиму возникновения ударной ионизации в холоде, можно сделать вывод о длине канала. Так, например, у полевых транзисторов 2N4416, имеющих длину канала  $\sim 10 \text{ мкм}$ <sup>17</sup>, ударная ионизация возникает в области  $10 \div 12 \text{ В}$  на стоке.

10. Ток утечки затвора может зависеть от длины канала, конфигурации обедненной зоны, параметров исходного материала, в особенности от концентрации свободных носителей.

В заключение следует отметить, что снятые на характеристикографе вольтамперные характеристики полевых транзисторов дают наглядную картину об изменении основных спектротрических параметров полевых транзисторов  $I_{\text{зат}}$  и  $S$  при различной температуре и электрическом режиме, что позволяет экспериментатору подобрать наиболее подходящий режим. Наличие вольтамперных характеристик при низких температурах может помочь технологам в разработке спектротрических полевых транзисторов с оптимальными параметрами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.G.Thorburn. *Radio Commun. (Gr.Brit.)*, 47, no. 7, 464 (1971).
2. E.Elad. *IEEE Trans. NS-19*, no. 1, 403 (1971).
3. R.J.Hawkins. *Elect.Lett.*, 6, no. 13, 401 (1970).
4. A.Ambrozy. *Elect.Eng.*, 14, 355 (1970).
5. Л.Севин. *Полевые транзисторы*, "Сов"радио", 1968.
6. F.S.Goulding. *NIM*, 43, no. 1, 1 (1966).
7. V.Radeja. *IEEE Trans. NS-20*, 182 (1973).

Рукопись поступила в издательский отдел 22 сентября 1976 года.