

## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОП - ТРАНЗИСТОРА

### Аннотация

Характеристики были разработаны, главным образом, для выполнения измерений биполярных транзисторов. Несмотря на то, что силовые МОП ПТ можно тестировать успешно на большинстве характериографов, ручки управления этих приборов имеют надписи, которые, в основном, относятся к биполярным транзисторам, и процедура, которой нужно следовать, в случае МОП ПТ не всегда бывает сразу очевидной. Эта статья описывает методы измерения силовых МОП ПТ, как при помощи характериографа, так и с помощью специально построенных схем измерения.

### Введение

Измерение МОП ПТ на характериографе является очень простым делом, при условии, что вы постоянно помните о широком соответствии и различии свойств биполярных и МОП ПТ. Таблица 1 дает соответствие некоторых понятий и параметров МОП ПТ с биполярными транзисторами.

Таблица 1. Эквивалентные параметры МОП ПТ и биполярного транзистора (примерно)

HEXFET	Bipolar
Drain	Collector
Gate	Base
Source	Emitter
gfs	$h_{FE}$
$BV_{DSS}$	$BV_{CES}$
$V_{GS(th)}$	$V_{BE(on)}$
$V_{DS(on)}$	$V_{CE(sat)}$
$I_{DSS}$	$I_{CES}$
$I_{GS}$	

Во всех примерах использовался МОП ПТ IRF630. Установка ручек управления, данная в примерах, относится к IRF630. Пользователь может видоизменять эти величины соответствующим образом при тестировании другого прибора. IRF630 был выбран потому, что он является типичным прибором среднего диапазона с нормой напряжения 200 вольт, нормой постоянного тока 9 ампер (при  $T_c = 25^\circ C$ ). Для измерений при токах выше 20 ампер или для импульсных тестов, не управляемых затвором, вместо стандартного контактного устройства должно использоваться контактное устройство для больших импульсных токов Tektronix 176. IRF630 - это N-канальный прибор. Для P-канального прибора все тестовые процедуры те же самые, за исключением того, что положение переключателя выбора полярности должно быть изменено на обратное - что означает, что для P-канальных приборов он должен находиться в положении PNP. Характериографом, который был примером в этой статье, являлся Tektronix 576, так как этот измерительный прибор широко распространен. Однако, используемые принципы могут быть одинаково хорошо применены к другим моделям и изготовителям. Рис.1 показывает расположение органов управления характериографа Tektronix 576, где основные ручки управления обозначены названиями, используемыми в этой статье. Когда упоминаются органы управления, названия их пишутся заглавными буквами на английском языке.

Для всех тестов начальное состояние характериографа предполагается следующим:

LEFT/RIGHT переключатель в положении «off».

VARIABLE COLLECTOR SUPPLY на нуле.

DISPLAY не инвертирован.

DISPLAY OFFSET установлен на ноль.

STEP POLARITY не инвертирована.

VERTICAL DISPLAY MAGNIFIER установлена в нормальное положение.

Кнопка REP селектора STEP FAMILY должна быть нажата.

Кнопка AID селектора OFFSET должна быть нажата.

Кнопка селектора NORM RATE должна быть нажата.

В некоторых тестах требуется пользоваться опасными напряжениями. После того, как прибор установлен в контактирующее устройство, как описано для каждого теста, защитная крышка контактного устройства должна закрываться, и нужно придерживаться правил безопасности, предписываемых изготовителем характериографа. Открытые металлические детали многих МОП ПТ (например, колпачок TO-3 или лепесток TO-220) соединяются со стоком и поэтому находятся под потенциалом коллекторного питания. Как и у других полупроводниковых приборов, некоторые из характеристик МОП ПТ являются температурно-зависимыми. Для тестов, в которых нагрев МОП ПТ значителен, должна использоваться низкая частота импульсов. Для тестов, в которых имеет место медленный переход через линейную область, к затвору должен быть последовательно подключен демпфирующий резистор величиной, по крайней мере, 10 Ом, близко к выводу затвора, чтобы предотвратить возбуждение.

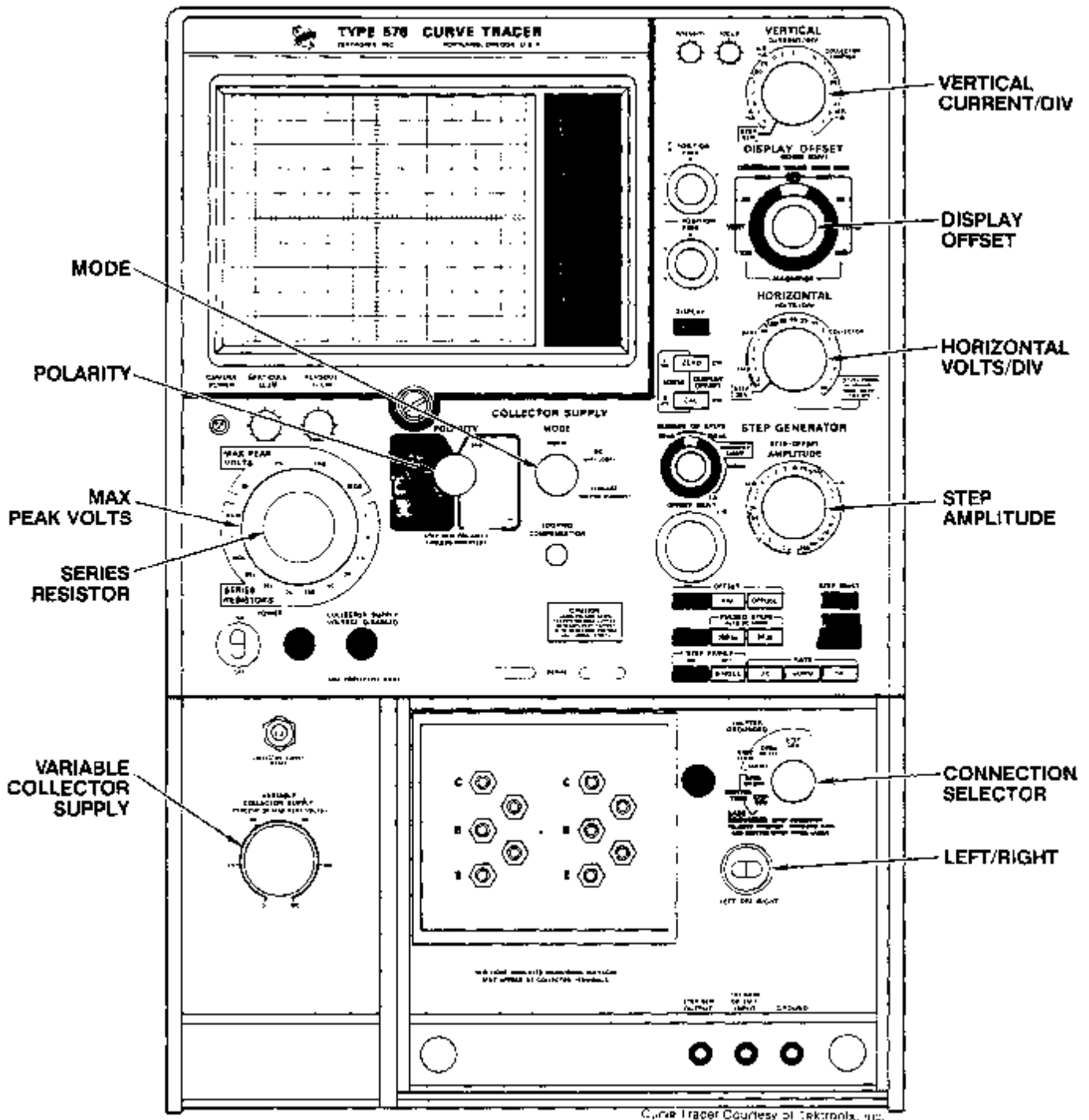


Рис. 1. Лицевая панель характеристрографа

### 1. $BV_{DSS}$

Это пробивное напряжение сток-исток (при  $V_{GS} = 0$ ).  $BV_{DSS}$  должно быть больше или равно норме напряжения прибора при специфицированном токе утечки.

1. Подключите прибор следующим образом: сток к «С», затвор к «В», исток к «Е».
2. Установите MAX PEAK VOLTS на 350 В.
3. Установите SERIES RESISTOR так, чтобы оно ограничивало лавинный ток безопасной величиной, т.е. десятками миллиампер. Подходящим значением для этого будет 14кОм.
4. Установите переключатель POLARITY в положение NPN.
5. Ручку MODE нужно установить в нормальное положение.
6. HORIZONTAL VOLTS/DIV должен быть установлен на 50 В/дел «коллекторного» диапазона.
7. VERTICAL CURRENT/DIV должен быть установлен на 50 мкА/дел.

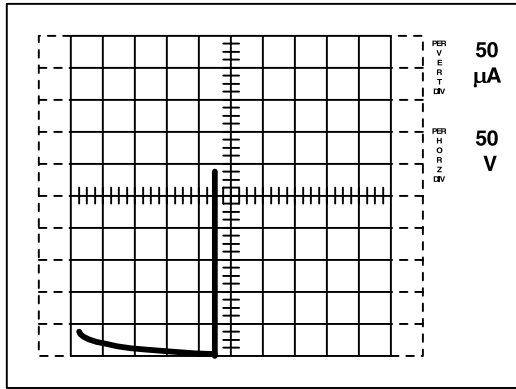


Рис.2. Форма сигналов напряжения пробоя сток-исток ( $BV_{DSS}$ )

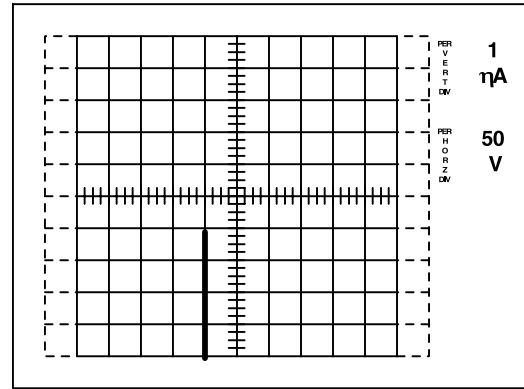


Рис.3. Ток утечки сток-исток ( $I_{DSS}$ )

8. В подключаемом контактном устройстве CONNECTION SELECTOR должен быть установлен на «sho.1» (закорочен) в секторе «emitter grounded» (эмиттер заземлен).

9. Подключите прибор с помощью ключа LEFT/RIGHT. Увеличивайте напряжение питания коллектора с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR SUPPLY до тех пор, пока ток, указываемый кривой на экране, не достигнет 250 мкА. (См. рис.2). Считайте значение  $BV_{DSS}$  с экрана.

## 2. $I_{DSS}$

Это ток стока для напряжения сток-исток, равного 100% напряжения нормы из спецификации, при  $V_{GS} = 0$ . Это измерение делается таким же образом, как и  $BV_{DSS}$ , за исключением следующего:

1. Переключатель MODE устанавливается в положение «LEAKAGE»(утечка).
2. Подключите прибор с помощью переключателя LEFT/RIGHT и отрегулируйте напряжение, подаваемое на коллектор так, чтобы оно было равно норме напряжения МОП ПТ (200 В для IRF630). Считайте значение  $I_{DSS}$  с изображения (см. рис.3). Может потребоваться изменение чувствительности по вертикали, чтобы получить изображение подходящего размера. Часто  $I_{DSS}$  оказывается в диапазоне наноампер и видимый ток будет представлять собой токи емкостей, возникающие из-за незначительных изменений напряжения, подаваемого на коллектор.

## 3. $V_{GS(th)}$

Это напряжение затвор-исток, которое создает ток стока, равный 250 мкА ( $V_{DS} = V_{GS}$ ) и при котором прибор входит в активную область. В схемах, в которых приборы включаются параллельно, потери переключения могут быть минимизированы, используя приборы с очень близкими друг другу пороговыми напряжениями. Этот тест требует, чтобы затвор был соединен со стоком.

1. Подключите прибор следующим образом: исток к «С», затвор к «В», сток к «Е». Такое включение прибора может потребовать создания специального контактирующего устройства. Изгибание выводов прибора может вызвать механические напряжения, которые приведут к выходу прибора из строя.
2. Установите MAX PEAK VOLTS на 15 В.
3. Установите SERIES RESISTOR на 0.3 Ом.
4. Установите POLARITY на PNP. Это сделает вывод стока (коллектора) отрицательным по отношению к выводу истока (эмиттера).
5. Установите ручку MODE в нормальное положение.
6. Установите VERTICAL CURRENT/DIV на 50 мкА/дел.

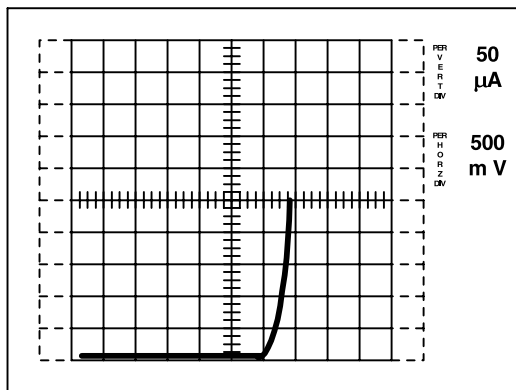


Рис.4. Пороговое напряжение затвор-исток  $V_{GS(th)}$

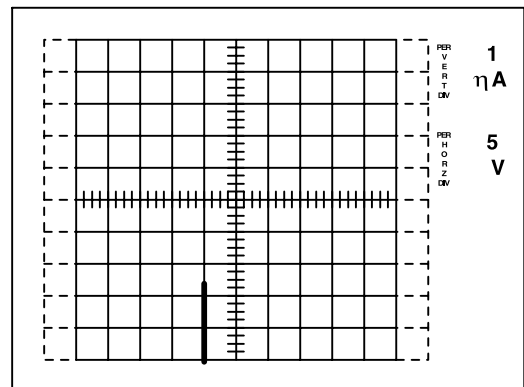


Рис.5. Ток утечки затвор-исток ( $I_{GSS}$ ) при +20 В

7. Установите HORIZONTAL VOLTS/DIV на 500 мВ/дел.
8. Установите CONNECTION SELECTOR на «SHORT»(закорочено) в секторе «EMITTER GROUNDED» (эмиттер заземлен).
9. DISPLAY должен быть инвертирован.
10. Подключите прибор с помощью переключателя LEFT/RIGHT. Увеличивайте напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR VOLTAGE, пока ток стока не достигнет величины 250 мкА, что будет указывать луч на экране. Считайте величину напряжения на горизонтальной центральной линии (так как эта линия соответствует  $I_d = 250 \text{ мкА}$ ). (См.Рис.4.)

#### 4. $I_{GSS}$

Это ток утечки затвор-исток, когда затвор соединен с истоком. Величина тока утечки затвора, превышающая норму, указывает на повреждение окисла затвора.

1. Прибор подключается следующим образом: затвор к «С», сток к «В», исток к «Е». Это - не обычная последовательность подключения и, если избегать изгибание выводов, то потребуются специальное контактирующее устройство.
2. Установите MAX PEAK VOLTS на 75 В.
3. Установите SERIES RESISTOR на низкое значение (например, 6,5 Ом)
4. Установите переключатель POLARITY на NPN.
5. Установите переключатель MODE на LEAKAGE.
6. Установите CONNECTION SELECTOR на «SHORT»(закорочено) в секторе «EMITTER GROUNDED» (эмиттер заземлен).
7. HORIZONTAL VOLTS/DIV должен быть установлен на 5 В/дел.
8. VERTICAL CURRENT/DIV должен быть установлен на подходящий низкий диапазон.
9. Подключите прибор с помощью переключателя LEFT/RIGHT. Увеличивайте подаваемое на коллектор напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, но не превышайте 20В, максимально разрешаемого напряжения затвора. Может потребоваться регулировка чувствительности по вертикали. Считайте величину тока утечки с дисплея (см.рис.5). Во многих случаях ток утечки будет в наноамперном диапазоне, в этом случае на луче будут доминировать токи, которые протекают через емкость прибора, в результате незначительных флуктуации напряжения, подаваемого на сток.
10. Вышеуказанная процедура служит для определения тока утечки затвора при положительном напряжении затвора. Для выполнения такого же измерения при отрицательном напряжении нужно снизить напряжение VARIABLE COLLECTOR SUPPLY до нуля, изменить положение переключателя POLARITY на PNP и еще раз подать напряжение (См.Рис.6). Лучу потребуется время для установления из-за емкости затвор-исток.

#### 5. $G_{FS}$

Это - прямая проводимость прибора при заданном значении  $I_d$ . Она представляет усиление сигнала (ток стока, деленный на напряжение затвора) в линейной области. Этот параметр должен измеряться при малом переменном напряжении, наложенном на смещение затвора, и характеристика не является подходящим прибором для этого измерения. Даже при использовании специального измерительного оборудования постоянное смещение приводит к очень быстрому перегреванию МОП ПТ, поэтому следует очень внимательно проверить, чтобы импульс был достаточно короток.

1. Установите VERTICAL CURRENT/DIV на 1 А/дел.
2. Подключите прибор с помощью переключателя LEFT/RIGHT. Увеличивайте напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, чтобы увеличивать  $I_d$ , но не превышая величины  $I_{dm}$ . На дисплее будет картинка, подобная изображенной на рис.7. Измеряемый прибор нагреется в течение нескольких секунд. Поэтому может оказаться необходимым сфотографировать лучи как можно быстрее после подключения прибора, чтобы потом сделать подробный анализ. Может оказаться необходимым варьирование напряжения смещения, чтобы отцентрировать лучи около желаемого уровня тока. Проводимость получают делением величины токовой ступеньки между лучами в линейной области на величину используемой ступеньки (шага) напряжения затвора. В показанном случае, величина токовой ступеньки равна 0,45 А в области, где  $I_d = 5 \text{ А}$  и ступенька напряжения затвора равна 0,1 В. Таким образом проводимость получается равной 4,5 сименса. Чтобы снизить рассеиваемую мощность прибора, тест должен выполняться в импульсном режиме, так как  $g_{fs}$  зависит от температуры. Должна быть нажата кнопка 80 мксек или 300 мксек. Полученная картинка показана на рис.8.

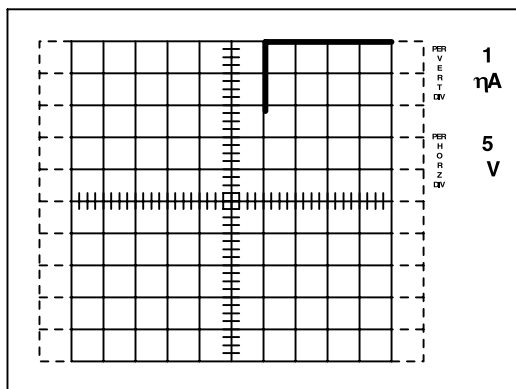


Рис.6. Ток утечки затвор-исток ( $I_{GSS}$ ) при - 20 В

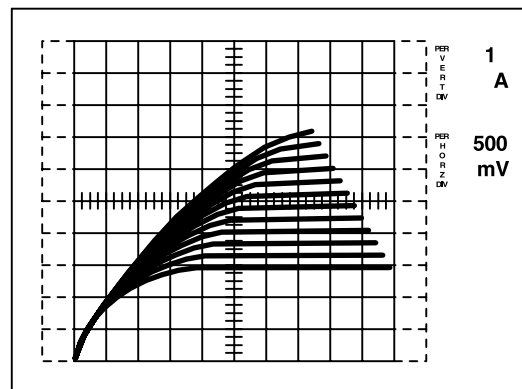


Рис.7. Прямая проводимость ( $G_{FS}$ )

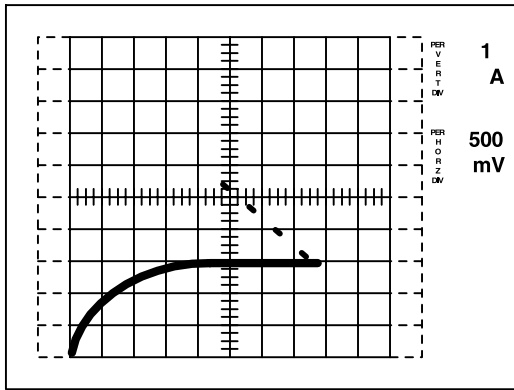


Рис.8. Прямая импульсная проводимость (  $G_{FS}$  )

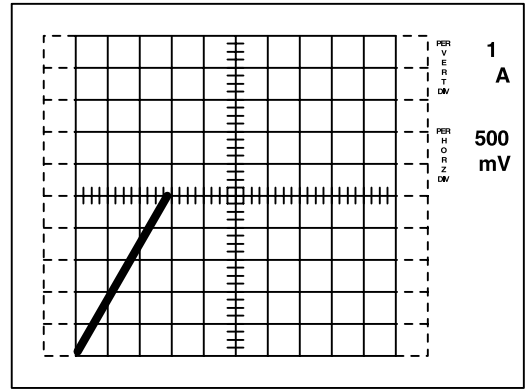


Рис.9. Сопротивление сток-исток

### 6. $R_{DS(on)}$

Это сопротивление сток-исток при  $25^{\circ}\text{C}$  и  $V_{GS} = 10\text{ V}$ . Так как  $R_{DS(on)}$  зависит от температуры, важно минимизировать нагрев перехода во время измерения. Поэтому для измерения этого параметра используется импульсный тест. Установка теста делается так же, как для  $g_{fs}$ , за исключением следующего:

1. Установить NUMBER OF STEP на 10.
2. Установить STEP AMPLITUDE на 1 В. Другой вариант, STEP AMPLITUDE может быть установлена на 2 В, в случае, когда число ступенек уменьшено так, что максимальное напряжение затвора не превышаетя.
3. CURRENT LIMIT должен быть установлен на 500 мА.
4. Кнопка STEP MULTIPLIER должна быть отжата - это означает, что 1X не выбрано.
5. На селекторе PULSED STEPS должна быть нажата кнопка 80 мксек.
6. На селекторе RATE должна быть нажата кнопка.5X.
7. Подключите прибор с помощью переключателя LEFT/RIGHT и увеличивайте напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, пока не будет достигнута желаемая величина тока стока.  $R_{DS(on)}$  получают из картинке, считывая пиковые значения тока и напряжения (См. Рис.9).  $R_{DS(on)} = V_d/A$ .

### 7. $V_{SD}$

Это напряжение исток-сток при нормативном токе спецификации и  $V_{GS} = 0$ . Это прямое падение напряжения на диоде тело-сток при протекании нормативного тока. (Если требуется применение импульсного режима испытаний, используйте контактирующее устройство для высоких токов).

1. Подключите прибор следующим образом: затвор к «В», сток к «С», исток к «Е».
2. Установите ручки MAX PEAK VOLTS на 15 В.
3. Установите SERIES RESISTOR на 1,4 Ом или величину, существенно меньшую той, при которой может быть получен нормативный ток.
4. Установите POLARITY на PNP.
5. Установите MODE на «normal».
6. Кнопка 80 ксек селектора PULSED STEPS должна быть нажата.
7. CONNECTION SELECTOR должен быть установлен в положение «short» (коротко замкнуто) в секторе «emitter grounded».
8. HORIZONTAL VOLTS/DIV должна быть на 200 мВ/дел.,
9. VERTICAL CURRENT/DIV должна быть на 1 А/дел.
10. Кнопка DISPLAY должна быть установлена на инвертирование.
11. Прибор подключается с помощью переключателя LEFT/RIGHT. Увеличивайте напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, пока не будет достигнут нормативный ток (ЭА для IRF630.) Считайте значение  $V_{sd}$  с изображения (См. Рис.10).

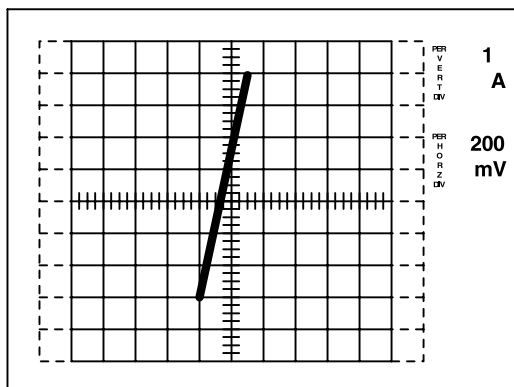


Рис.10. Напряжение исток-сток ( $V_{SD}$ )

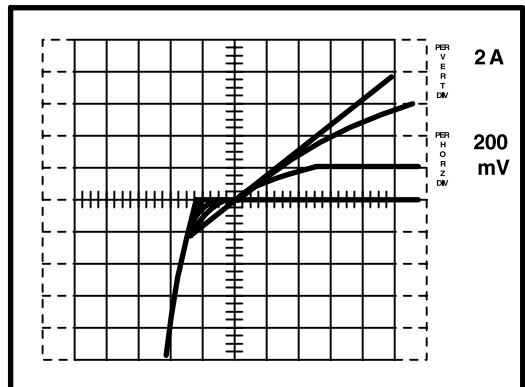


Рис.11. Смешанные характеристики N-канального транзистора

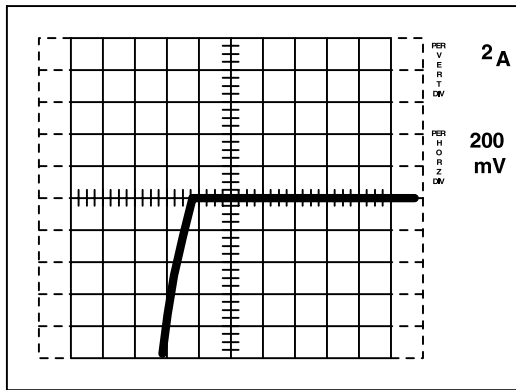


Рис. 12. Характеристики N-канального прибора при отсутствии управления затвором

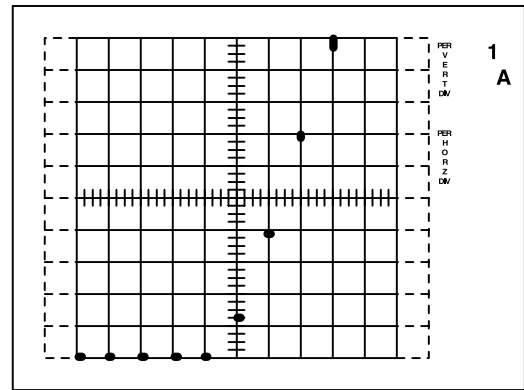


Рис. 13. Передаточные характеристики (зависимость  $I_D$  от  $V_{GS}$ )

### Смешанные характеристики

Прямые и обратные характеристики МОП ПТ могут рассматриваться одновременно. Эта картинка может использоваться для оценки поведения МОП ПТ в схемах, когда ток протекает в обоих направлениях, таких как синхронные выпрямители и схемы переключения аналоговых сигналов. Процедура та же, что и для  $g_{fs}$ , за исключением следующего:

1. Кнопка STEP MULTIPLY IX должна быть отжата (чтобы давать ступеньки 1 В).
2. OFFSET установлен на ноль.
3. Ручка POLARITY установлена на «AC».
4. Прибор подключается с помощью переключателя LEFT/RIGHT. Напряжение увеличивается ручкой VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, чтобы достигнуть требуемого пикового значения  $I_d$ . Помните, что прибор нагревается. Рис. 11 показывает картинку, полученную на IRF630. Чтобы получить отдельную обратную характеристику диода, измените полярность ступеньки. Полевой транзистор не работает и изображение будет напоминать то, что показано на рис. 12. Полярность ступеньки тоже нужно изменить для получения смешанных характеристик P-канального прибора.

### Передаточные характеристики

Кривые передаточной характеристики - зависимость  $I_d$  от  $V_{GS}$  - могут быть изображены, используя импульсный режим. Подготовка к тесту такая же, как для дтз, за исключением следующего:

1. OFFSET MULTIPLY должна быть установлена на ноль.
2. Установите HORIZONTAL VOLTS/DIV на «step gen».
3. Кнопка 300 мксек PULSED STEP SELECTOR должна быть нажата.
4. Увеличивайте напряжение VARIABLE COLLECTOR SUPPLY, чтобы получить картинку, показанную на рис. 13. Передаточные характеристики состоят из изображаемых точек.

### Изменение характеристик МОП ПТ без характериографа

Параметры МОП ПТ могут быть измерены с помощью стандартного лабораторного оборудования. Схемы измерений и процедуры для их выполнения описаны в последующих разделах, используя IRF630 в качестве примера. Организация тестирования должна изменяться соответствующим образом для других приборов.

#### $BV_{DSS}$ - пробивное напряжение сток-исток

Источником тока обычно служит источник питания с выходным напряжением, которое может примерно в три раза превышать норму  $BV_{DSS}$ , с последовательно включенным резистором, определяющий соответствующую величину тока. При измерении высоковольтных МОП ПТ может быть непрактично или небезопасно использовать источник с напряжением, в три раза превышающим  $BV_{DSS}$ , в этом случае могут использоваться другие типы источника постоянного тока.

#### $V_{GS(th)}$ - пороговое напряжение

Требуется резистор затвора 1 кОм, чтобы подавлять потенциально разрушительные осцилляции на затворе. Источник тока может браться от источника напряжения, равного норме напряжения МОП ПТ с последовательным резистором.

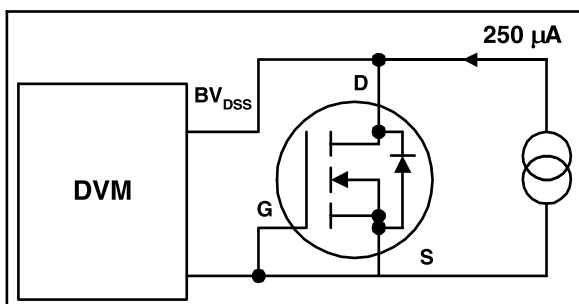


Рис. 14. Схема измерения  $BV_{DSS}$

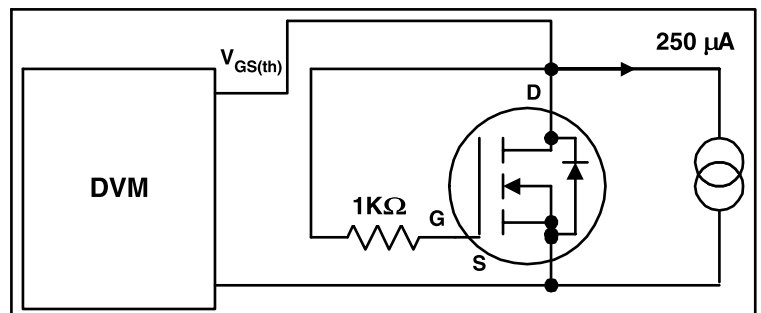


Рис. 15. Схема измерения  $V_{GS(th)}$

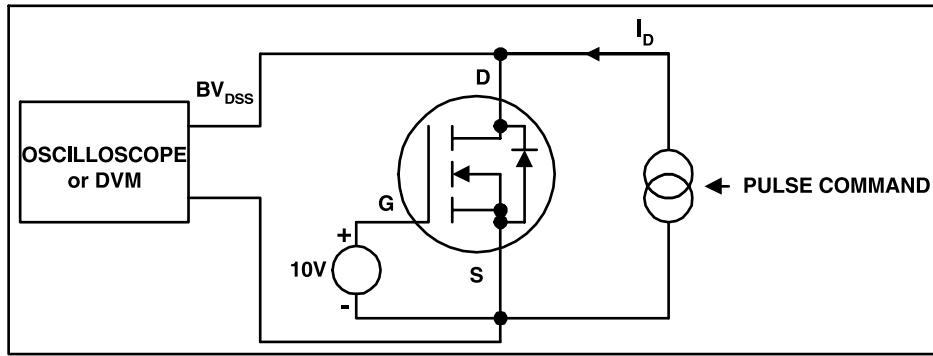


Рис. 16. Схема измерения  $V_{DS(on)}$

**$V_{DS(on)}$  -сопротивление насыщения во включенном состоянии**

Ширина импульса должна быть 300 мксек при коэффициенте заполнения менее 2%. Указываемое значение берется при 25°C.  $R_{DS(on)}$  вычисляется делением  $V_{DS(on)}$  на  $I_D$ . Подключайте землю питания затвора как можно ближе к выводу истока.

**$G_{FS}$  -передаточные характеристики**

Подключите источник питания 50 В между стоком и истоком. Пользуйтесь токовым пробником для измерения  $I_D$ . Используется генератор сигналов, работающий с малым коэффициентом заполнения, чтобы предотвратить нагрев прибора, для получения импульсов 80 мксек с требуемым напряжением, чтобы получать следующие токи:  $0,015 \times I_D$ ,  $0,05 \times I_D$ ,  $0,15 \times I_D$ ,  $0,5 \times I_D$  и  $1,5 \times I_D$ , где  $I_D$  - нормативный ток спецификации при  $T_c = 25^\circ\text{C}$ . Постройте график зависимости  $V_{GS}$  от  $I_D$ . Проводимость равна наклону графика при соответствующем значении тока стока.

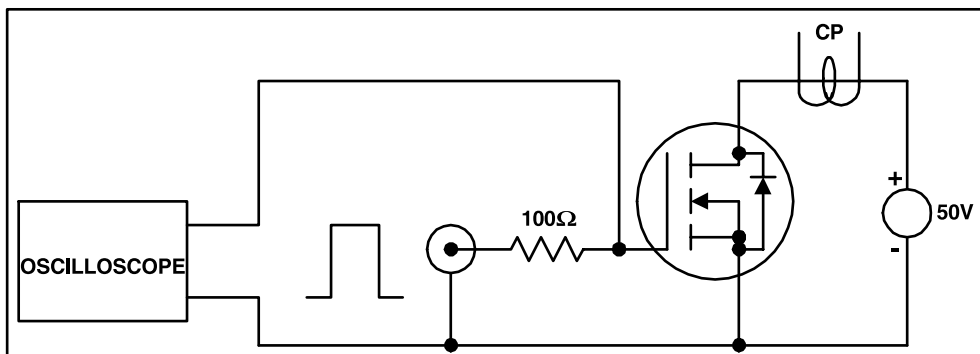


Рис. 17. Схема измерения для  $G_{FS}$

**$C_{jss}$ ,  $C_{oss}$  и  $C_{riss}$  - емкости: выходная, входная и обратной передачи**

Для всех этих измерений используется емкостный мост на 1 МГц. Измеряемая емкость последовательно подключается к емкости известной величины для разделения по постоянному току. Если  $C_U$ -это неизвестная емкость,  $C_k$  - известная емкость, а  $C_m$  - измеряемая емкость, тогда  $C_U$  может вычисляться следующим образом:

$$C_U = C_m C_k / (C_k - C_m)$$

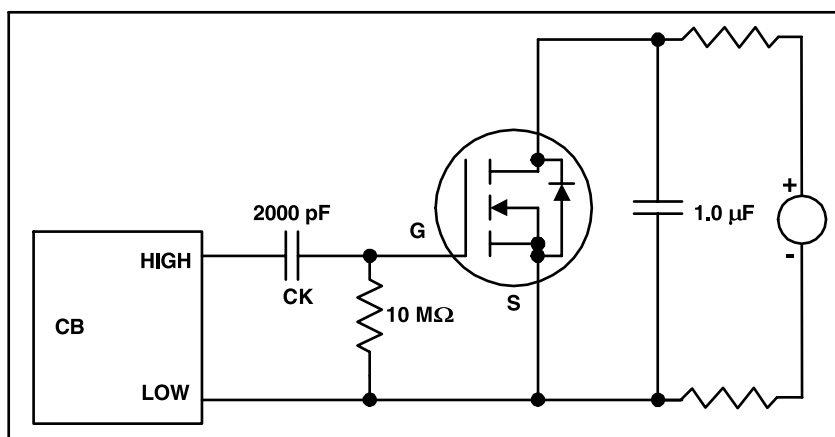


Рис. 18. Схема измерения для  $C_{iss}$

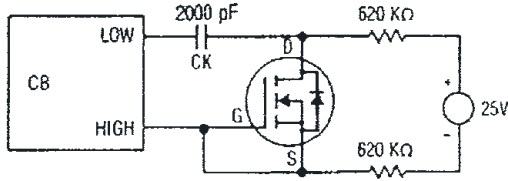


Рис. 19. Схема измерения для  $C_{qss}$

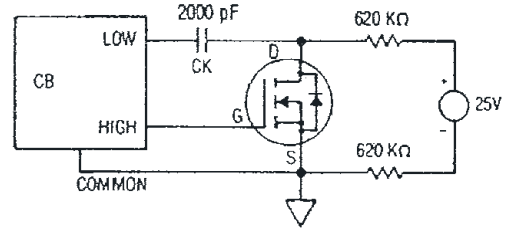


Рис.20. Схема измерения для  $C_{rss}$

$t_{d(on)}$ ,  $t_r$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_f$  - время задержки включения, время нарастания, время задержки выключения, время спада

Импульсы, подаваемые на затвор, должны быть достаточной длительности, чтобы достигнуть полного включения с коэффициентом заполнения порядка 0,1%. Последовательное сопротивление подбирается в соответствии с размером кристалла МОП ПТ, как показано в табл.2. В обозначении МОП ПТ имеется цифра, указывающая на используемый кристалл, так IRF630 использует кристалл HEX-3. Определения времен нарастания, спада и задержек даны на рис.22.

Таблица.2. Величины сопротивления в зависимости от размера кристалла.

HEX-Z	24 Ω
HEX-1	24 Ω
HEX-2	12 Ω
HEX-3	12 Ω
HEX-4	6.2 Ω
HEX-5	6.2 Ω

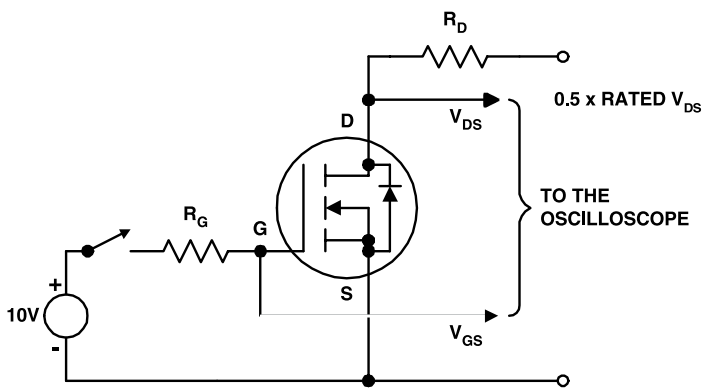


Рис.21. Схема измерения  $t_{d(on)}$ ,  $t_r$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_f$

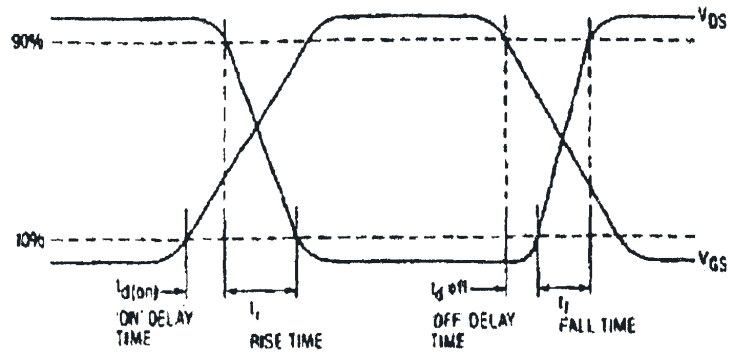


Рис. 22. Форма сигналов при измерении

$\Theta_g$ ,  $\Theta_{gs}$ ,  $\Theta_{gd}$  - полный заряд затвора, заряд затвор-исток, заряд затвор-сток

Полный заряд затвора имеет две составляющих: заряд затвор-исток и заряд затвор-сток (часто называемый зарядом Миллера). Ток стока может быть получен от источника напряжения величиной 0,8 x Vds с последовательным резистором соответствующей величины. Импульс, подаваемый на затвор, должен быть достаточной длительности, чтобы гарантировать полное включение МОП ПТ. Он может быть получен от генератора, работающего при малом коэффициенте заполнения. Рис.24 показывает формы сигналов при измерении. Из соотношения  $\Theta = i$ , был получен следующий результат:

$$Q_g = (t_3 - t_0)i_g; \quad Q_{gd} = (t_2 - t_1)i_g; \quad Q_{gs} = Q_g - Q_{gd}$$

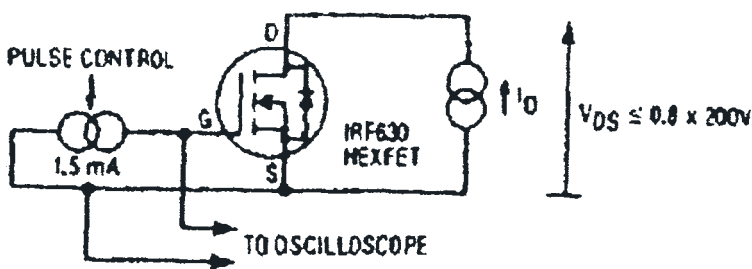


рис.23. Схема измерения для  $\Theta_g$ ,  $\Theta_{gd}$ ,  $\Theta_{gt}$

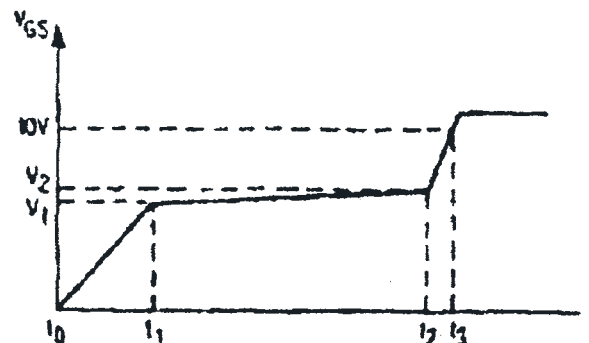


Рис.24. Формы сигналов при измерении



**$V_{SD}$ - напряжение проводимости интегрального диода**

Источник тока может состоять из источника напряжения и последовательного резистора. Напряжение должно подаваться короткими импульсами (менее 300 мксек ) с малым коэффициентом заполнения (менее 2%).

**$t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ - время обратного восстановления и заряд обратного восстановления интегрального диода**

Принцип работы следующий: замыкание S1 приводит к прямому току диода, определяемому V1 и R1. Как только установится стабильная прямая проводимость, S1 размыкается и одновременно замыкается S2. Заряд диода удаляется со скоростью, управляемой с помощью L1 и V2. Когда диод восстановится, ток через L1 иссякнет. Длительность времени, в течение которого диод проводит должна поддерживаться как можно меньшей, чтобы минимизировать температурные изменения кристалла МОП ПТ. Формы сигналов при испытании приведены на рис.27.

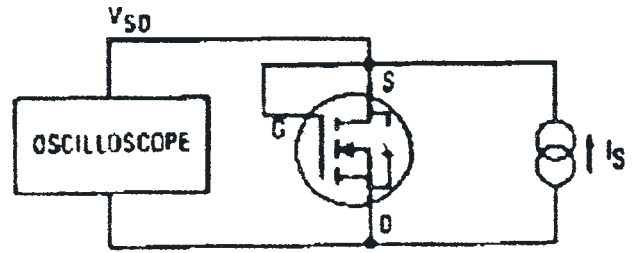


Рис.25. Схема измерения для  $V_{SD}$

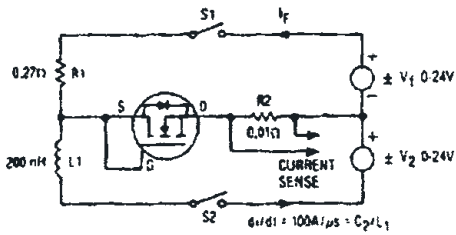


Рис.26. Схема измерения для  $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ .

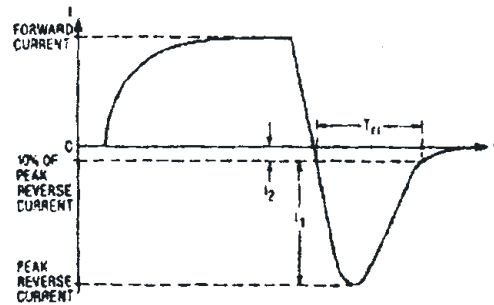


Рис.27. Формы сигналов при измерении