

## MOSFET-транзисторы

### MOSFET-транзистор, определение и типы

### Особенности MOSFET-транзисторов. Реверсный диод в составе MOSFET-транзистора

### Применение MOSFET-транзисторов

### Основные параметры MOSFET-транзистора

### Паразитные емкости MOSFET-транзистора

### Параллельное включение MOSFET-транзисторов

### MOSFET-транзистор, определение и типы

MOSFET-транзисторы – полевые транзисторы с изолированным затвором. Расшифровка аббревиатуры - Metal-Oxide-Semiconductor (металл – окисел – полупроводник) и Field-Effect-Transistors (транзистор, управляемый электрическим полем) Вообще класс полевых транзисторов включает полупроводниковые приборы, управляемые внутренним полем. Внутреннее поле создается напряжением, поэтому полевые транзисторы, в отличие от биполярных транзисторов управляются напряжением! Именно это свойство обеспечивает широкое применение полевых транзисторов.

Ключевыми преимуществами MOSFET-транзисторов являются:

- малая энергия на переключение транзисторы (фактически нужно только перезарядить емкость затвора);
- высокая скорость переключения;
- во включённом состоянии представляет собой омическое сопротивление.

MOSFET-транзисторы как и биполярные транзисторы имеют две основных типа структуры: n-канальные и p-канальные.

Не вдаваясь во внутренние подробности строения MOSFET транзисторов укажем основные отличия в принципе управления:

- n-канальный MOSFET-транзистор открывается положительной полярностью напряжения затвор-исток, и в открытом состоянии пропускает ток от стока к истоку;

- р-канальный MOSFET-транзистор открывается отрицательной полярностью напряжения затвор-исток, и в открытом состоянии пропускает ток от истока к стоку. По той же причине, что и в биполярных транзисторах, n-канальные MOSFET-транзисторы шустрее р-канальных MOSFET-транзисторов.

Условные обозначения транзисторов n-канального и р-канального MOSFET-транзисторов представлены на рисунке MOSFET.1.



Рисунок MOSFET.1 - Условные обозначения MOSFET транзисторов

### Особенности MOSFET-транзисторов. Реверсный диод в составе MOSFET-транзистора

MOSFET-транзистор в открытом состоянии фактически представляет собой сопротивление. То есть падение напряжения на транзисторе зависит только от его тока. Это очень важное отличие от биполярного транзистора и IGBT-транзистора, всегда имеющих некоторое падение напряжения в открытом состоянии.

В закрытом состоянии сопротивление MOSFET-транзистора составляет десятки-сотни МОм. В открытом – от единиц Ом до единиц миллиОм. Впрочем, сопротивление MOSFET-транзистора в открытом состоянии непостоянно – оно несколько увеличивается с ростом тока. Как правило, не более чем 20-25% при изменении тока от минимального значения до максимального.

Необходимо отметить, что из-за особенностей внутренней структуры MOSFET-транзистор имеет в своем составе паразитный обратный диод, включенный параллельно стоку-истоку, который иногда приводят в условном обозначении транзистора (рисунок MOSFET.2). Если быть до конца точным, то паразитный диод является следствием паразитного транзистора присутствующего в конструкции MOSFET-транзистора. При изготовлении база транзистора электрически соединяется с истоком и коллекторный переход выполняет роль обратного диода.

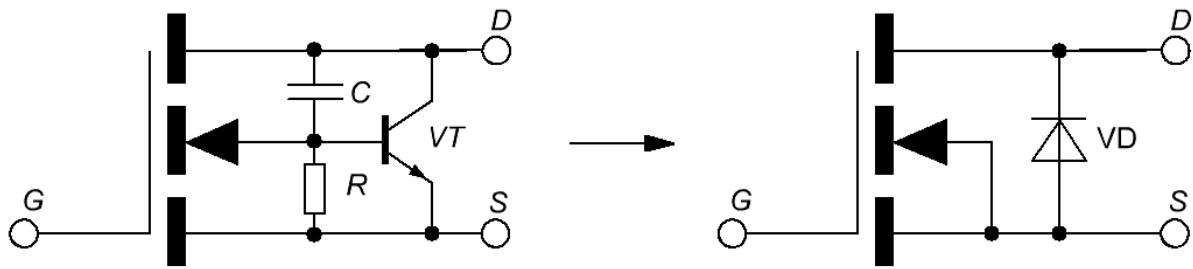


Рисунок MOSFET.2 - Эквивалентные схемы внутренней структуры MOSFET-транзистора

Падение напряжения на обратном диоде составляет 0,6-0,8 В, что меньше падения напряжения на обычном кремниевом р-п диоде (рисунок MOSFET.3). Именно по этой причине параллельное включение внешних обратных диодов бессмысленно. Ложку дегтя еще добавляет и то, что этот диод достаточно медленный, то есть достаточно долго (порядка 0,3-1 мкс) переходит в непроводящее состояние при смене полярности тока. Существуют схемотехнические способы обойти этот диод например путем последовательного включения в цепь стока диода Шоттки и «обходного» быстродействующего диода включаемого параллельно цепи транзистора и диода.

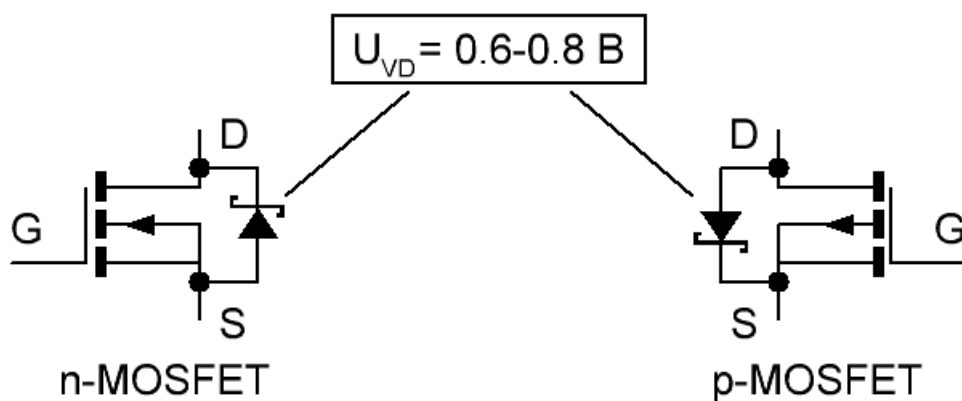


Рисунок MOSFET.3 - Реверсный диод в составе MOSFET-транзистора

Достаточно подробно про внутреннюю структуру MOSFET-транзисторов изложено в [Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. Дьяконов В.П., Максимчук А.А., Ремиев А.М., Смердов В.Ю. СОЛОН-Р. 2002. 512 с.].

### [Применение MOSFET-транзисторов](#)

Области использования MOSFET-транзисторов:

- в импульсных преобразователях и стабилизаторах;
- в генераторных устройствах;
- в усилительных каскадах (особенно в звуковых Hi-Fi усилителях);
- в твердотельных реле;
- в качестве элемента логических схем.

Основные преимущества MOSFET-транзисторов проявляются при их использовании в качестве ключевых элементов.

При всех преимуществах MOSFET-транзисторы достаточно «нежные» существа: боятся статического электричества, разрушаются при перегреве свыше 150 °С. Из этого следует то, что полевые транзисторы более критичны к перегреву при пайке по сравнению с биполярными, а также то, что с ними целесообразно работать при условии защиты от статического электричества.

### Основные параметры MOSFET-транзистора

Ниже перечислены основные параметры MOSFET-транзистора данные на которые приводятся в справочных листках - datasheet-ax:

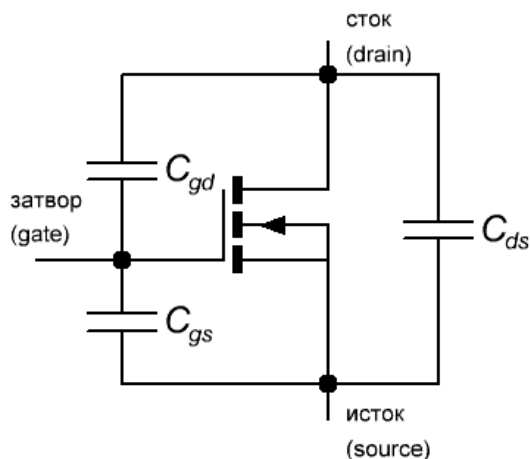
1. Максимальное напряжение сток-исток (Drain-Source Voltage)  $V_{DS}$  – максимально допустимое напряжение между стоком и истоком транзистора.
2. Сопротивление сток-исток  $R_{DS}$  – сопротивление между стоком и истоком в открытом состоянии. При заданном напряжении затвор-исток. И токе стока.
3. Максимальное напряжение затвор-исток (Gate-Source Voltage)  $V_{GS}$  – максимальное управляющее напряжение затвор-исток. При превышении этого напряжения возможен пробой затворного диэлектрика и выход транзистора из строя.
4. Максимальный ток стока в непрерывном режиме (Continuous Drain Current)  $I_D$  – максимальная величина постоянно протекающего тока стока в непрерывном режиме. Зависит от температуры корпуса транзистора и условий теплоотвода.
5. Максимальный импульсный ток стока (Pulsed Drain Current)  $I_{DM}$  - максимальная величина импульсного тока стока. Зависит от коэффициента заполнения, условий теплоотвода. Принципиально ограничивается энергией рассеивания кристалла.
6. Энергия рассеивания кристалла (Single Pulse Avalanche Energy)  $E_{AS}$  – максимальная энергия, которая может быть рассеяна на кристалле транзистора без его разрушения.
7. Максимальная рассеиваемая мощность (Maximum Power Dissipation)  $P_D$  – максимальная тепловая мощность, которая может быть отведена от корпуса транзистора (при заданной температуре корпуса транзистора).
8. Диапазон рабочих температур - диапазон температур, в пределах которого допускается эксплуатация транзистора.
8. Тепловое сопротивление транзистор-воздух  $R_{thJA}$  (Maximum Junction-to-Ambient) - максимальное тепловое сопротивление транзистор-воздух (при условии свободного конвективного теплообмена).
9. Тепловое сопротивление корпус транзистора – теплоотвод (Case-to-Sink, Flat, Greased Surface)  $R_{thCS}$  - максимальное тепловое сопротивление перехода корпус транзистора – теплоотвод. При условии плоской блестящей поверхности теплоотвода.
10. Тепловое сопротивление корпус транзистора (Maximum Junction-to-Case (Drain)  $R_{thJC}$  - максимальное тепловое сопротивление кристалл - корпус транзистора.

11. Пороговое напряжение затвор-исток (Gate-Source Threshold Voltage)  $V_{GS(th)}$  - пороговое напряжение затвор-исток, при котором начинается переход транзистора в проводящее состояние.
12. Ток утечки стока (Zero Gate Voltage Drain Current)  $I_{DSS}$  – ток стока выключенного транзистора (при нулевом напряжении затвор-исток). Значительно зависит от температуры.
13. Ток утечки затвора (Gate-Source Leakage)  $I_{GSS}$  – ток через затвор при некотором (как правило максимальном) напряжении затвор-исток.
14. Входная емкость (Input Capacitance)  $C_{iss}$  – суммарная емкость затвор-исток и емкость затвор-сток (при некотором напряжении сток-исток).
15. Выходная емкость (Output Capacitance)  $C_{oss}$  – суммарная емкость затвор-сток и емкость сток-исток.
16. Проходная емкость (Reverse Transfer Capacitance)  $C_{rss}$  – емкость затвор-сток.
17. Общий заряд затвора (Total Gate Charge)  $Q_g$  – суммарный заряд затвора, необходимый для перевода транзистора в проводящее состояние.
18. Заряд затвор-исток (Gate-Source Charge)  $Q_{gs}$  – заряд емкости затвор-исток.
20. Заряд затвор-сток (Gate-Drain Charge)  $Q_{gd}$  - заряд емкости затвор-сток.
21. Время задержки включения (Turn-On Delay Time)  $t_{d(on)}$  – время за которое транзистор накапливает заряд до напряжения на затворе, при котором транзистор начинает открываться.
22. Время роста тока через транзистор (Rise Time) – время, за которое происходит нарастание тока стока транзистора от 10% до 90%.
23. Время задержки выключения (Turn-Off Delay Time)  $t_{d(off)}$  – время за которое заряд затвора становится меньшим заряда включения, и транзистор начинает закрываться.
24. Время спада тока через транзистор (Fall Time) - время, за которое происходит спад тока стока транзистора от 10% до 90%.
25. Индуктивность вывода стока (Internal Drain Inductance)  $L_D$  – паразитная индуктивность вывода стока транзистора.
26. Индуктивность вывода истока (Internal Source Inductance)  $L_S$  – паразитная индуктивность вывода истока транзистора.
27. Постоянный прямой ток через обратный диод (Continuous Source-Drain Diode Current)  $I_S$  – максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный р-п диод.
28. Импульсный ток через обратный диод (Pulsed Diode Forward Current)  $I_{SM}$  – максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный р-п диод.
29. Падение напряжения на диоде (Body Diode Voltage)  $V_{SD}$  – прямое падение напряжения на диоде. При заданных температуре и токе истока.
30. Время восстановления паразитного диода (Body Diode Reverse Recovery Time)  $t_{rr}$  - время восстановления обратной проводимости паразитного диода.

31. Заряд восстановления паразитного диода (Body Diode Reverse Recovery Charge)  $Q_{rr}$  – заряд необходимый для восстановления обратной проводимости паразитного диода.
32. Время включения паразитного диода (Forward Turn-On Time)  $t_{on}$  - время перехода диода в проводящее состояние. Обычно составляет пренебрежимо малую величину.
33. Паразитное сопротивление затвора (Gate resistance)  $R_G$  – паразитное последовательное сопротивление затвора. Именно оно ограничивает скорость переключения при управляющем драйвере с большим выходным током.

### Паразитные емкости MOSFET-транзистора

На рисунке MOSFET.4 представлены паразитные емкости MOSFET-транзистора. Их всего три – емкость «затвор-исток», «затвор-сток», «сток-исток». И три их производные – входная емкость (Input Capacitance), проходная емкость (Reverse Transfer Capacitance), выходная емкость (Output Capacitance).



$$\begin{aligned} \text{Input Capacitance } C_{iss} &= C_{gs} + C_{gd} \\ \text{Reverse Transfer Capacitance } C_{rss} &= C_{gd} \\ \text{Output Capacitance } C_{oss} &= C_{gd} + C_{ds} \end{aligned}$$

Рисунок MOSFET.4- Паразитные емкости MOSFET-транзистора

Инерционность MOSFET-транзистора, определяющая времена включения и выключения лимитируется, прежде всего, паразитными емкостями транзистора.

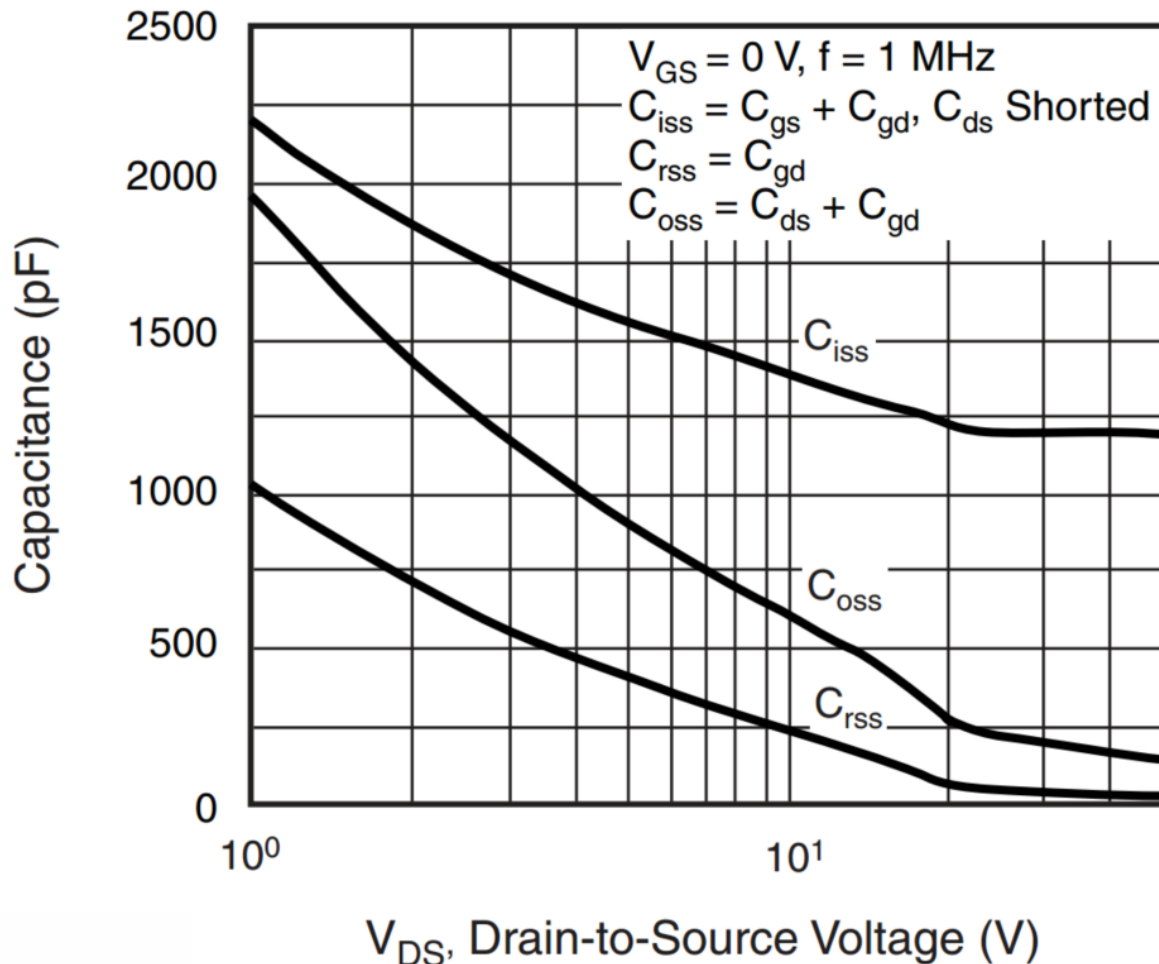


Рисунок MOSFET.5 – Зависимости паразитных емкостей MOSFET-транзистора от напряжения сток-исток (drain-source). На примере транзистора IRF740 по данным datasheet № 91054 VishaySiliconix

В реальности паразитные емкости не являются постоянными величинами: их величина сильно зависит от напряжения между их «обкладками»: при малых значениях напряжения сток-исток ёмкости имеют значительную величину (например, на порядок превышающие численные значения, указанные в справочных листках) которые быстро уменьшается с ростом напряжения сток-исток (рисунок MOSFET.5). Поэтому все справочные значения емкости справедливы при определенном значении напряжения сток-исток.

Для мощных MOSFET-транзисторов на динамику включения-выключения влияет и паразитное сопротивление затвора.

Детально влияние емкостей на процесс коммутации MOSFET транзистора и проявление так называемого эффекта Миллера представлено в разделе «Управление MOSFET и IGBT транзисторами. Схемотехнические решения. Расчет».

### Параллельное включение MOSFET-транзисторов

По причине того, что во включенном состоянии MOSFET-транзистор фактически представляет собой сопротивление, MOSFET-транзисторы легко объединяются параллельно. При этом пропорционально увеличиваются токовые и мощностные характеристики.

Для подавления возможных паразитных осцилляций целесообразно развязывать управляющие затворы через затворные резисторы (рисунок MOSFET.6).

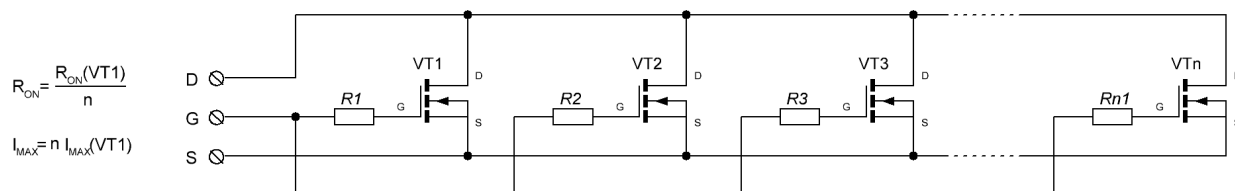


Рисунок MOSFET.6 - Параллельное соединение MOSFET-транзисторов

[Справочник](#)[Практические конструкции](#)[Технологии](#)[О сайте](#)[Контакты](#)