

# Активные электронные компоненты MOSFET транзисторы

---

КУРС ЛЕКЦИЙ

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

**RAZUMDOM**



# Активные компоненты

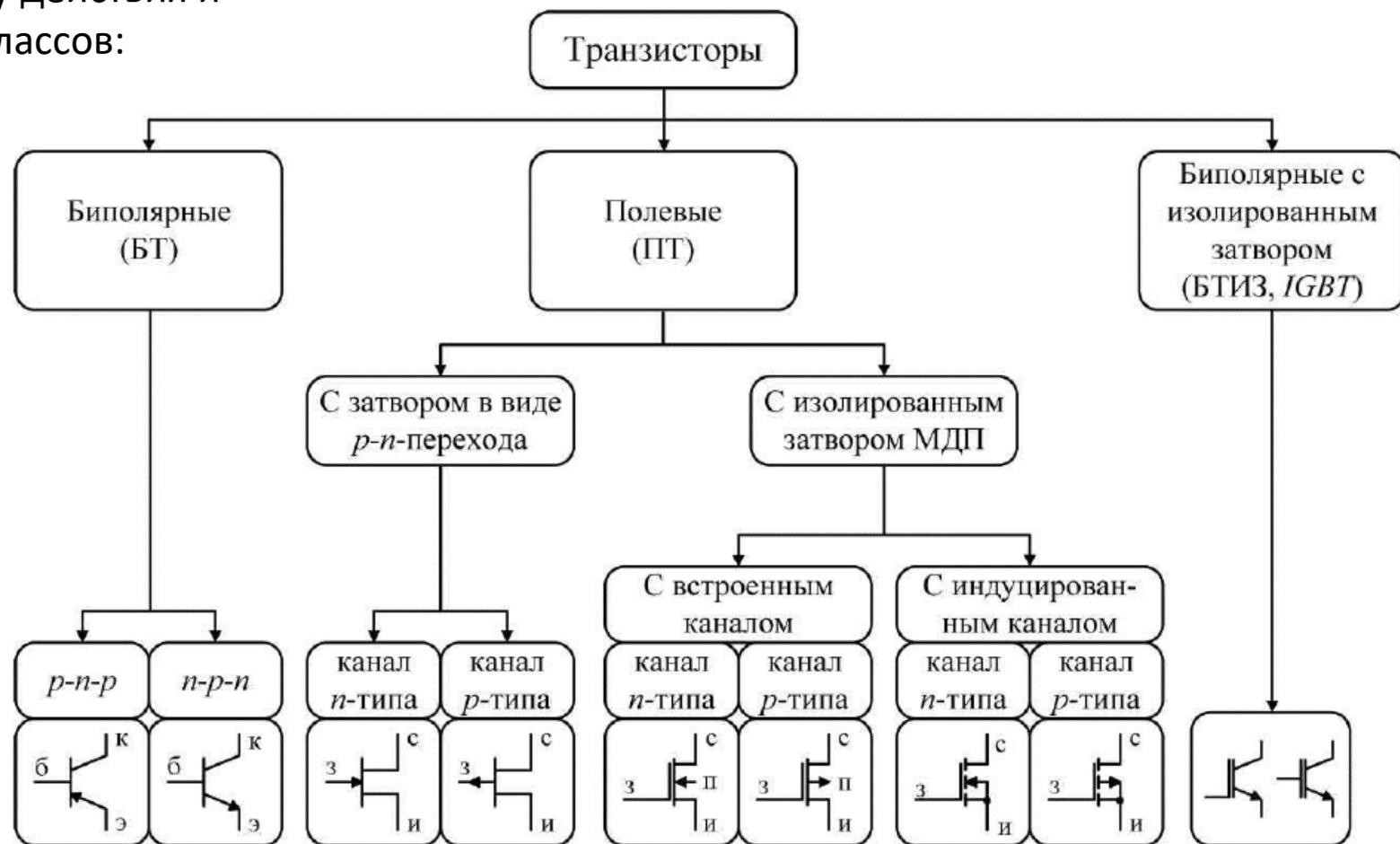
1. Диоды
2. Тиристоры
3. Биполярные транзисторы
4. Полевые и MOSFET транзисторы
5. IGBT транзисторы
6. Микросхемы



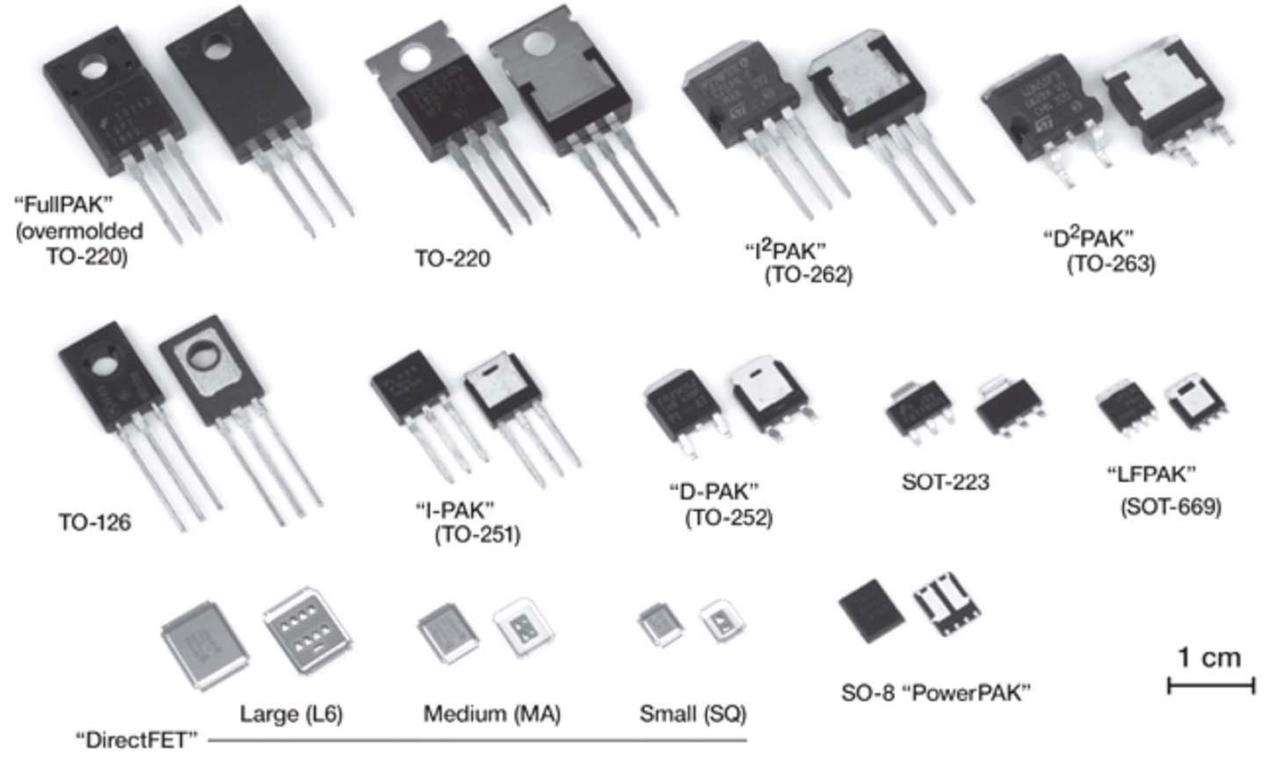
# Классификация транзисторов

Транзисторы по структуре, принципу действия и параметрам делятся на несколько классов:

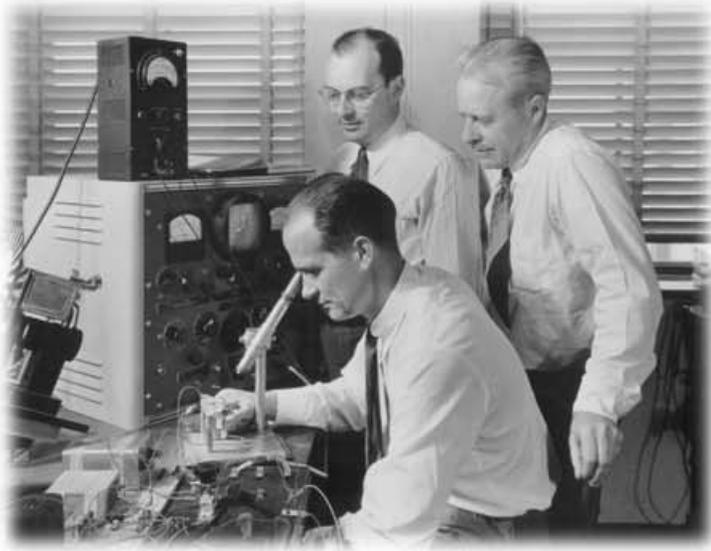
- **Биполярные**
- **Полевые (униполярные).**
- **IGBT биполярные транзисторы с изолированным затвором**



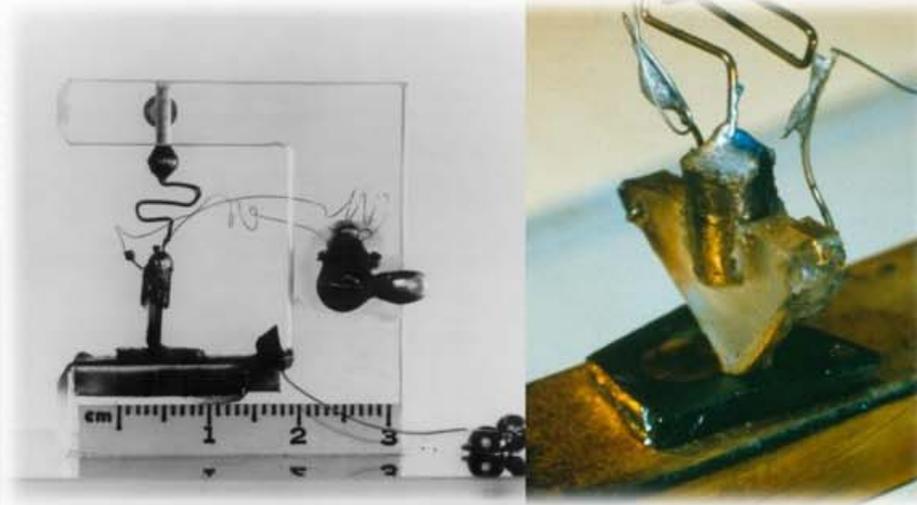
**Транзистор** (transistor), полупроводниковый триод — электронный компонент из полупроводникового материала, способный небольшим входным сигналом управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов.



## Создатели транзисторов



Бардин, Браттейн и Шокли – создатели первого транзистора



Первый германиевый PNP транзистор с точечным контактом.



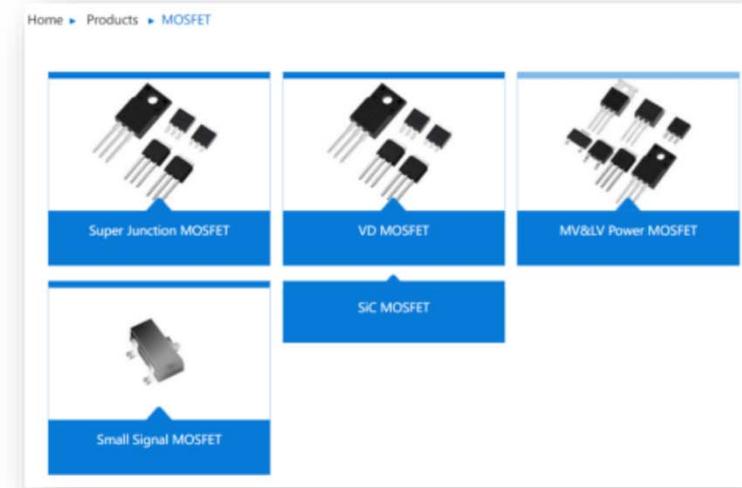
Музыкальная шкатулка Джона Бардина, воспроизводившая 5 тонов

В 1959 году Мартин Аттала из Bell Labs предложил выращивать затворы полевых транзисторов из диоксида кремния. В том же году Аттала и его коллега Дион Канг создали первый работоспособный МОП-транзистор. Первые серийные МОП-транзисторы вышли на рынок в 1964 году, в 1970-е годы МОП транзисторы стали применяться в микросхемах.

С 1947 года было произведено ~13 000 000 000 000 000 000 000 (13\*10<sup>21</sup>) транзисторов всех типов.

# Как выбрать MOSFET транзистор

MOSFETs	
Trench MOS	SGT MOS
Planar MOS	Super Junction MOS



## MOSFET

- ☰ Trench MOSFETs
- ☰ SJ MOSFETs
- ☰ IGBTs
- ☰ Planar MOSFETs
- ☰ SGT MOSFETs



## POWER MOSFET List

- JFET
- Combo Power MOSFET
- Trench Power MOSFET (N-CH)
- Trench Power MOSFET (P-CH)
- Planar Power MOSFET (N-CH)
- Fast Body Diode Power MOSFET (N-CH)
- Planar Power MOSFET (P-CH)
- Resonance Mode MOSFET (N-CH/P-CH)

### 12-300V N MOSFET

- ▶ 12-200V N-Channel Trench MOSFET
- ▶ 30-250V N-Channel SGT-I MOSFET
- ▶ 30-120V N-Channel SGT-II MOSFET

### 12-150V P MOSFET

- ▶ 12-150V P-Channel Trench MOSFET
- ▶ 30-100V P-Channel SGT-I MOSFET

### 500-1050V N MOSFET

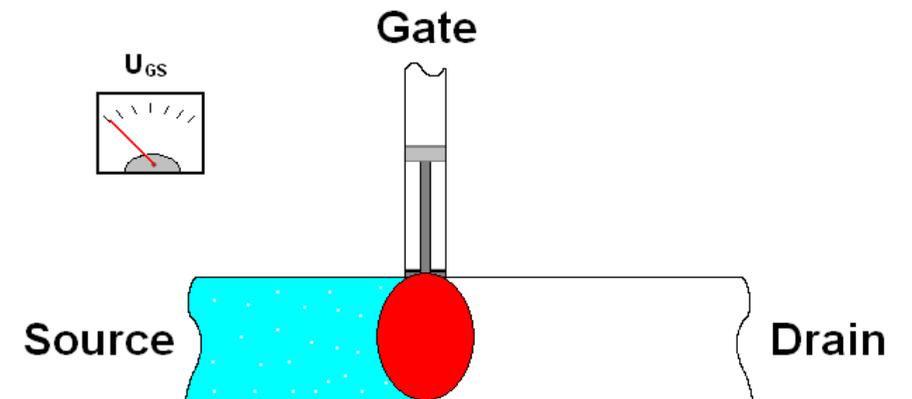
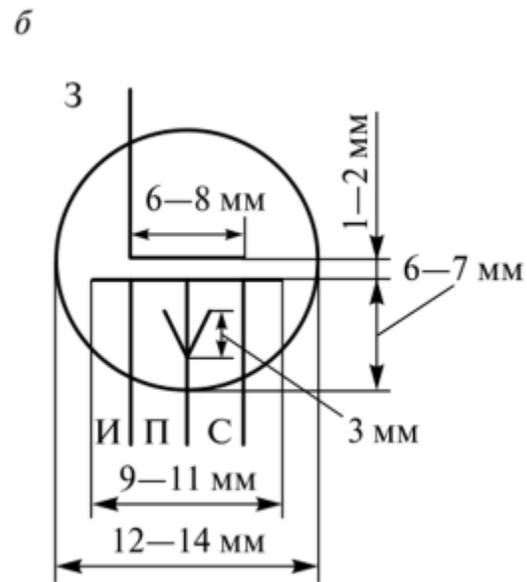
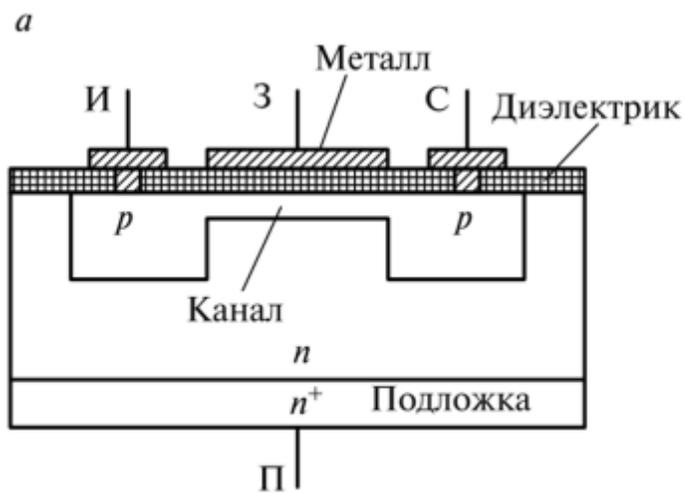
- ▶ 500-800V N-Channel SJ-III MOSFET
- ▶ 600-650V N-Channel SJ-III TF MOSFET
- ▶ 500-650V N-Channel SJ-IV NF MOSFET
- ▶ 500-1050V N-Channel SJ-IV MOSFET

### 12-300V NP MOSFET

- ▶ Complementary MOSFET
- ▶ Dual N and P-Channel MOSFET
- ▶ Half-bridge N-Channel MOSFET

# Полевой транзистор

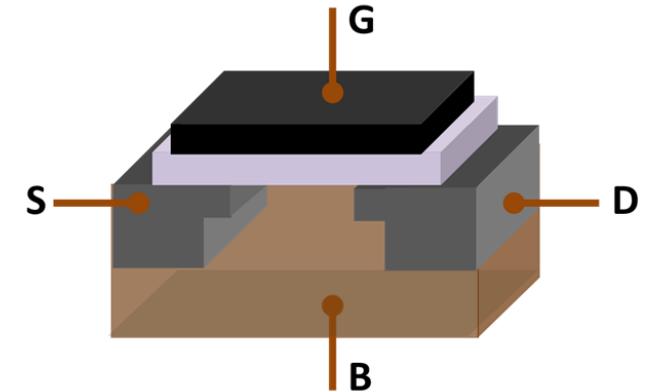
В полевом транзисторе используется полупроводник только одного типа проводимости, расположенный в виде тонкого канала, на который воздействует электрическое поле изолированного от канала затвора, управление осуществляется изменением напряжения между затвором и истоком. Полевой транзистор, в отличие от биполярного, управляется напряжением, а не током.



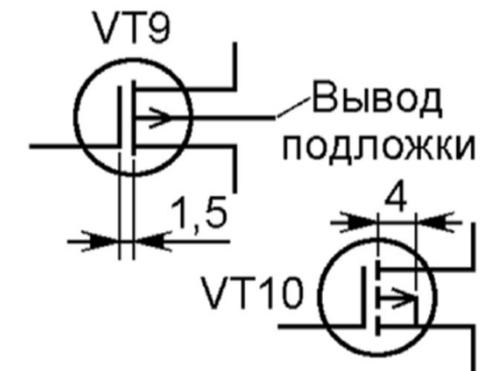
# MOSFET транзистор

**МОП-транзистор, или Полевой** (униполярный) транзистор с изолированным затвором (англ. **metal-oxide-semiconductor field-effect transistor**, сокращённо «MOSFET») — полупроводниковый прибор, разновидность полевых транзисторов. Аббревиатура **МОП** образована от слов «металл-оксид-полупроводник».

МОП-транзистор имеет три вывода: затвор, исток, сток. Тыльный контакт (В) обычно соединяется с истоком. В области вблизи поверхности полупроводника создаётся при изготовлении или индуцируется (возникает при приложении напряжений) так называемый канал. Величина тока в нём (тока исток—сток) зависит от напряжений исток—затвор и исток—сток. Полупроводниковым материалом является кремний (Si), а металлический затвор отделяется от канала тонким слоем изолятора — диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>). Если SiO<sub>2</sub> заменён неоксидным диэлектриком (Д), используется название МДП-транзистор (англ. MISFET, I = insulator). В отличие от биполярных транзисторов, которые управляются током, транзисторы с изолированным затвором управляются напряжением. Они обладают очень высоким входным сопротивлением.

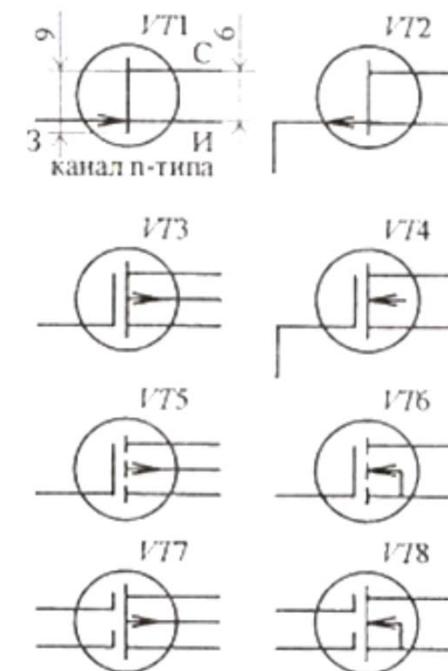
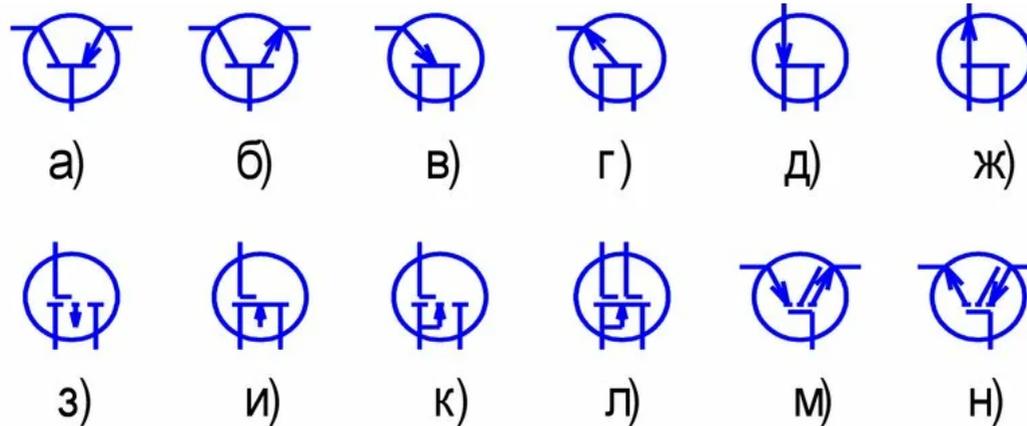
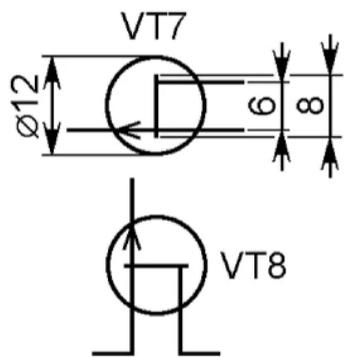


G — Gate (затвор), S — Source (исток), D — Drain (сток), В- база



# Условное графическое обозначение

Условное графическое обозначение транзисторов (УГО) ГОСТ 2.730-73  
Для биполярных, полевых, IGBT и других видов различное обозначение.  
**УГО полевого транзистора.**



# MOSFET транзистор. Классификация по типу канала

Существуют МОП-транзисторы с **собственным** (или встроенным) (depletion mode transistor) и **индуцированным** (или инверсным) каналом (enhancement mode transistor).

- В транзисторах **со встроенным каналом** при нулевом напряжении затвор-исток канал сток-исток открыт (то есть проводит ток между стоком и истоком); для запираения канала нужно приложить к затвору напряжение.
- В транзисторах **с индуцированным каналом** при нулевом напряжении затвор-исток канал сток-исток закрыт (не проводит ток); для открытия канала нужно приложить к затвору напряжение определённой полярности относительно истока.
- В цифровой и силовой технике обычно применяются транзисторы только с индуцированным каналом. В аналоговой технике используются приборы обоих типов.

	Индуцированный канал	Встроенный канал
Р-канал		
N-канал		

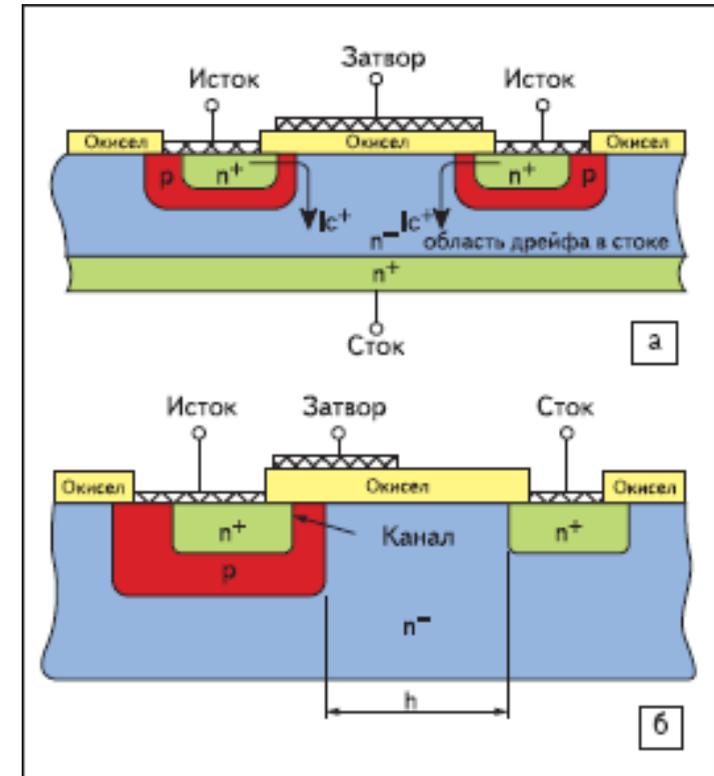
Условные обозначения: З — затвор (G — Gate), И — исток (S — Source), C — сток (D — Drain)

# MOSFET транзистор. Классификация по типу проводимости

Полупроводниковый материал канала может быть легирован примесями для получения электропроводности **p-** или **n-**типа.

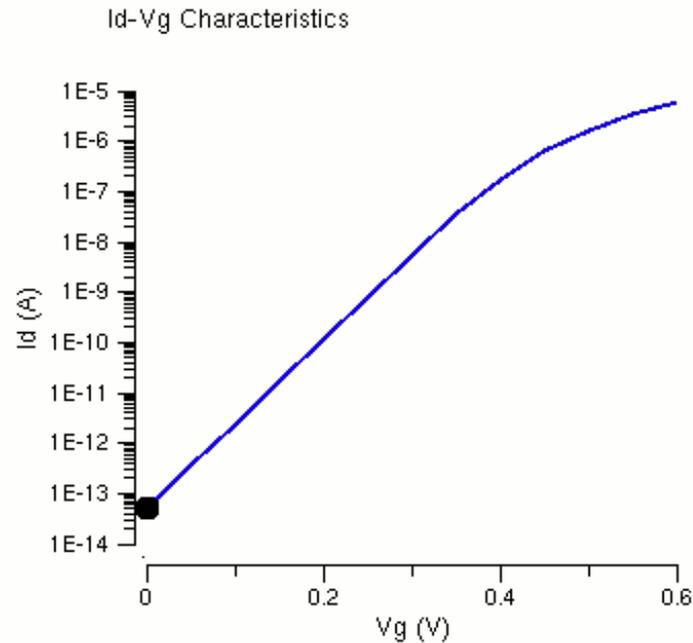
Подачей на затвор определённого потенциала можно менять состояние проводимости участка канала под затвором.

- Если при этом из канала вытесняются его основные носители заряда, при этом обогащая канал неосновными носителями, то это режим называют **режимом обогащения**. При этом проводимость канала растёт.
- При подаче противоположного по знаку потенциала на затвор относительно истока **канал обедняется** от неосновных носителей и уменьшается его проводимость (это называется **режимом обеднения**, который характерен только для транзисторов со встроенным каналом).

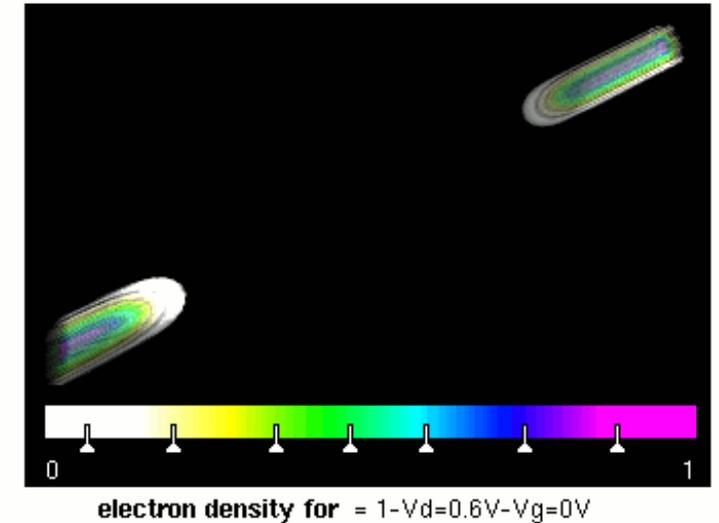


# MOSFET транзистор. Классификация по типу проводимости

Для n-канальных полевых транзисторов отпирающим является положительное (относительно истока) напряжение, приложенное к затвору и при этом превышающее пороговое напряжение открывания этого транзистора. Соответственно, для p-канальных полевых транзисторов отпирающим будет являться отрицательное относительно истока напряжение, приложенное к затвору и превышающее его пороговое напряжение.



3D electron density for  $V_d=0.6$



Моделирование формирования инверсионного канала (электронной плотности) и достижения порогового напряжения (IV) в нанопроводном МОП-транзисторе (порог 0,45 В).

# MOSFET транзистор

Ключевыми преимуществами MOSFET-транзисторов являются:

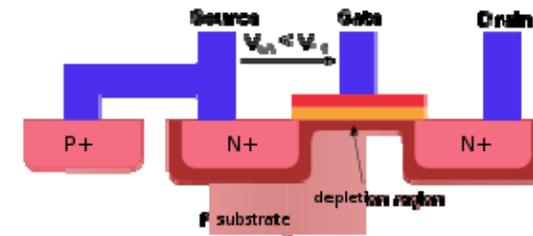
- малая энергия на переключение транзисторы (фактически нужно только перезарядить емкость затвора);
- высокая скорость переключения;
- во включённом состоянии представляет собой омическое сопротивление.

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

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;
- **p-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 p-канальных MOSFET-транзисторов.



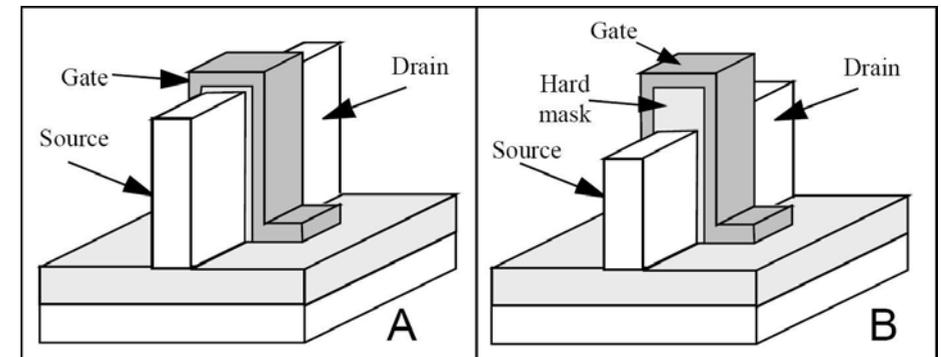
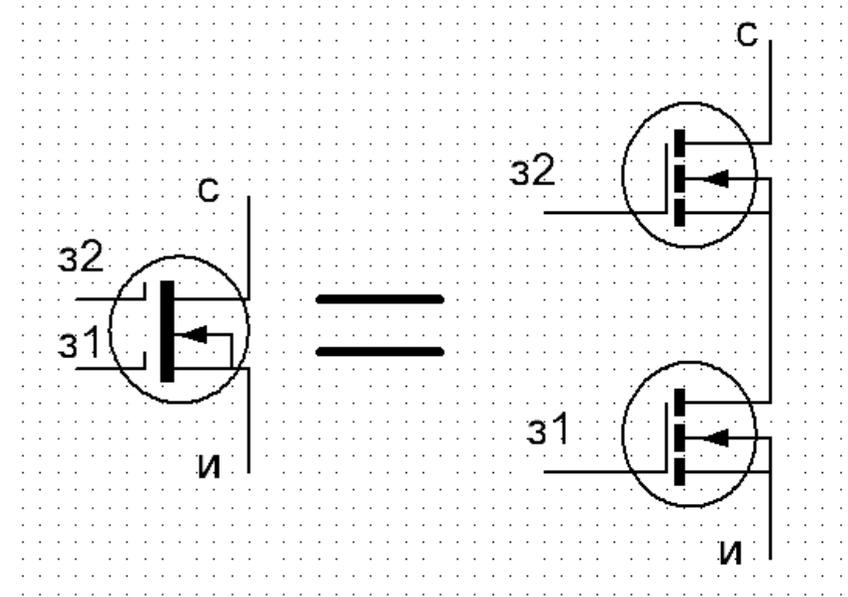
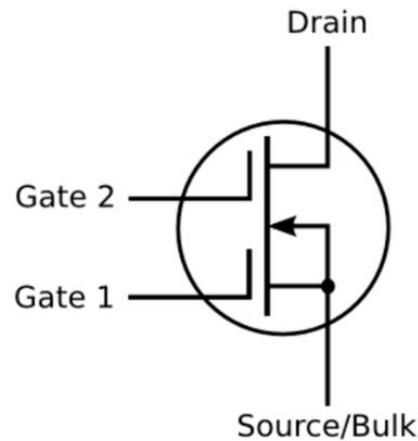
Когда напряжение затвора  $V_{GS}$  ниже порога создания проводящего канала; между клеммами стока и истока проводимость отсутствует. Когда затвор выше порога, он притягивает электроны, создавая проводящий канал n-типа в подложке под оксидом (желтый), который позволяет электронам течь между n-легированными выводами.

# Специальные транзисторы

Существуют транзисторы с **несколькими затворами**. Они используются в цифровой технике для реализации логических элементов или в качестве ячеек памяти в EEPROM. В аналоговой схемотехнике **многозатворные** транзисторы также получили распространение, например в схемах смесителей или устройств для регулировки усиления.



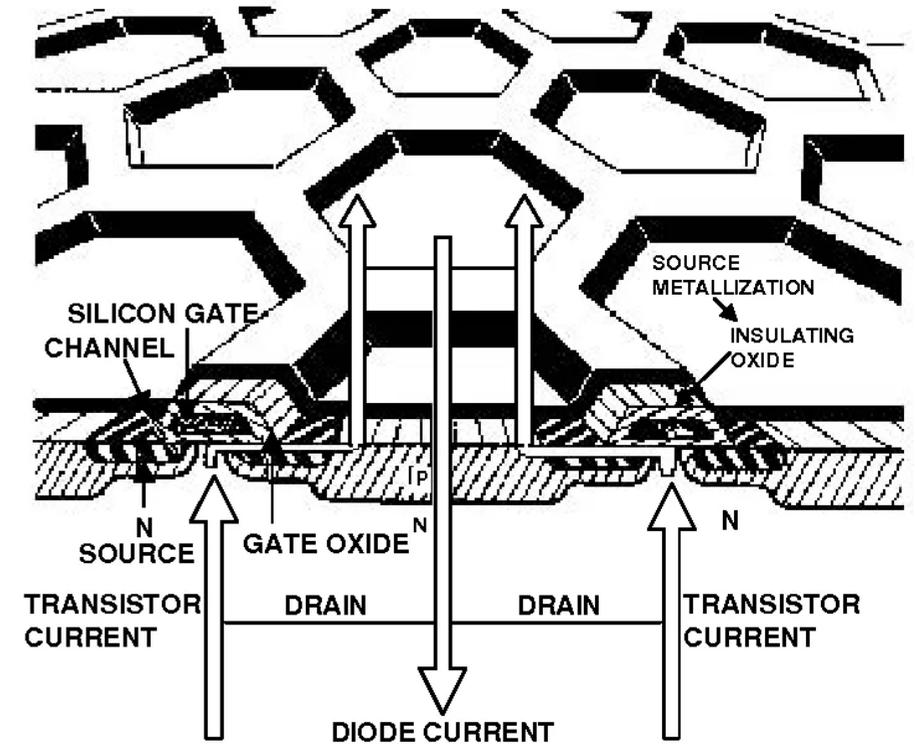
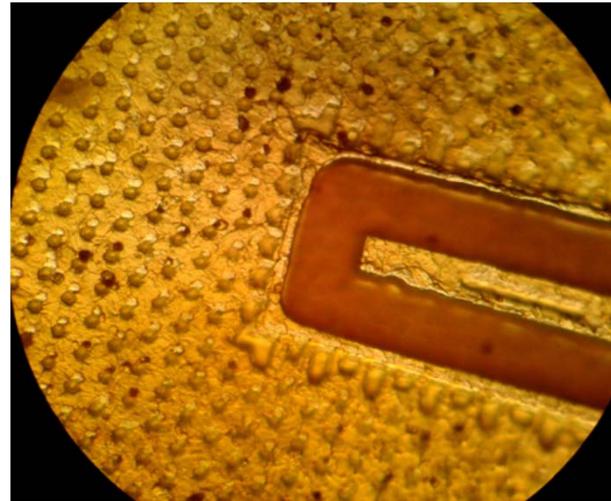
1-Исток; 2-Затвор 1; 3-Затвор 2; 4-Сток



## Специальные транзисторы

Силовые МОП-транзисторы (**Power MOSFET**). Первые в мире мощные МОП-транзисторы, представила компания Siliconix в 1976 году, а чуть позже, в 1979 году, компания International Rectifier предложила альтернативную МОП-структуру для построения мощных транзисторов, которая получила название HexFET®.

**HexFET** — организация в одном кристалле тысяч параллельно-включенных МОП-транзисторных ячеек, образующих шестиугольник. Такое решение позволяет существенно снизить сопротивление открытого канала  $R_{DS(on)}$  и делает возможным коммутацию больших токов. С точки зрения классификации полевых транзисторов **HexFET** относятся к полевым транзисторам с индуцированным каналом.



# Основные параметры MOSFET транзисторов

1. Максимальное напряжение сток-исток (**Drain-Source Voltage**) **VDS** – максимально допустимое напряжение между стоком и истоком транзистора.
2. Сопротивление сток-исток **RDS** – сопротивление между стоком и истоком в открытом состоянии.
3. Максимальное напряжение затвор-исток (**Gate-Source Voltage**) **VGS** – максимальное управляющее напряжение затвор-исток.
4. Максимальный ток стока в непрерывном режиме (**Continuous Drain Current**) **ID** – максимальная величина постоянно протекающего тока стока в непрерывном режиме.
5. Максимальный импульсный ток стока (**Pulsed Drain Current**) **IDM** - максимальная величина импульсного тока стока. Зависит от коэффициента заполнения, условий теплоотвода. Ограничивается энергией рассеивания кристалла.
6. Энергия рассеивания кристалла (**Single Pulse Avalanche Energy**) **EAS** – максимальная энергия, которая может быть рассеяна на кристалле транзистора без его разрушения.
7. Максимальная рассеиваемая мощность (**Maximum Power Dissipation**) **PD** – максимальная тепловая мощность, которая может быть отведена от корпуса транзистора.
8. Диапазон рабочих температур - диапазон температур, в пределах которого допускается эксплуатация транзистора.
9. Тепловое сопротивление транзистор-воздух **RthJA (Maximum Junction-to-Ambient)** - максимальное тепловое сопротивление транзистор-воздух.  
Тепловое сопротивление корпус транзистора – теплоотвод (**Case-to-Sink, Flat, Greased Surface**) **RthCS** - максимальное тепловое сопротивление перехода корпус транзистора – теплоотвод.

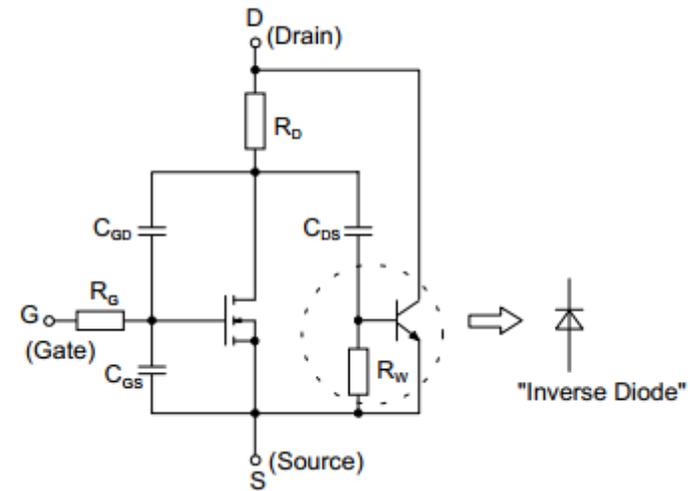
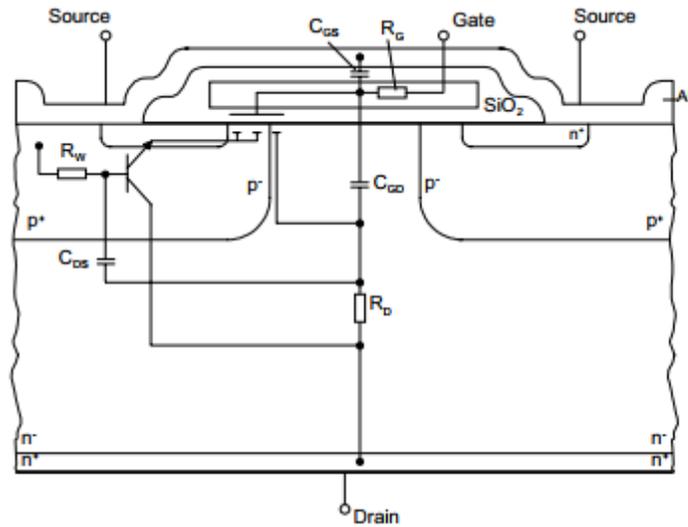
## Основные параметры MOSFET транзисторов

10. Тепловое сопротивление корпус транзистора (**Maximum Junction-to-Case (Drain) RthJC**) - максимальное тепловое сопротивление кристалл - корпус транзистора.
11. Пороговое напряжение затвор-исток (**Gate-Source Threshold Voltage) VGS(th)** - пороговое напряжение затвор-исток, при котором начинается переход транзистора в проводящее состояние.
12. Ток утечки стока (**Zero Gate Voltage Drain Current) IDSS** – ток стока выключенного транзистора.
13. Ток утечки затвора (**Gate-Source Leakage) IGSS** – ток через затвор при максимальном напряжении затвор-исток.
14. Входная емкость (**Input Capacitance) Ciss** – суммарная емкость затвор-исток и емкость затвор-сток.
15. Выходная емкость (**Output Capacitance) Coss** – суммарная емкость затвор-сток и емкость сток-исток.
16. Прходная емкость (**Reverse Transfer Capacitance) Crss** – емкость затвор-сток.
17. Общий заряд затвора (**Total Gate Charge) Qg** – суммарный заряд затвора, необходимый для перевода транзистора в проводящее состояние.
18. Заряд затвор-исток (**Gate-Source Charge) Qgs** – заряд емкости затвор-исток.
20. Заряд затвор-сток (**Gate-Drain Charge) Qgd** - заряд емкости затвор-сток.
21. Время задержки включения (**Turn-On Delay Time) td(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) td(off)** – время за которое заряд затвора становится меньшим заряда включения, и транзистор начинает закрываться.

# Основные параметры MOSFET транзисторов

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**) **LD** – паразитная индуктивность вывода стока транзистора.
26. Индуктивность вывода истока (**Internal Source Inductance**) **LS** – паразитная индуктивность вывода истока транзистора.
27. Постоянный прямой ток через обратный диод (**Continuous Source-Drain Diode Current**) **IS** – максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный p-n диод.
28. Импульсный ток через обратный диод (**Pulsed Diode Forward Current**) **ISM** – максимальное значение постоянно протекающего прямого тока через паразитный p-n диод.
29. Падение напряжения на диоде (**Body Diode Voltage**) **VSD** – прямое падение напряжения на диоде. При заданных температуре и токе истока.
30. Время восстановления паразитного диода (**Body Diode Reverse Recovery Time**) **trr** - время восстановления обратной проводимости паразитного диода.
31. Заряд восстановления паразитного диода (**Body Diode Reverse Recovery Charge**) **Qrr** – заряд необходимый для восстановления обратной проводимости паразитного диода.
32. Время включения паразитного диода (**Forward Turn-On Time**) **ton** - время перехода диода в проводящее состояние. Обычно составляет пренебрежимо малую величину.
33. Паразитное сопротивление затвора (**Gate resistance**) **RG** – паразитное последовательное сопротивление затвора. Оно ограничивает скорость переключения при управляющем драйвере с большим выходным током.

# Эквивалентная схема MOSFET транзисторов



## Управление MOSFET транзистором

Полевые транзисторы управляются напряжением, приложенным к затвору транзистора относительно его истока, при этом:  $I_c = I_u$ ;  $I_3 \rightarrow 0$ . При изменении напряжения  $U_{3u}$  изменяется состояние транзистора и ток стока  $I_c$ .

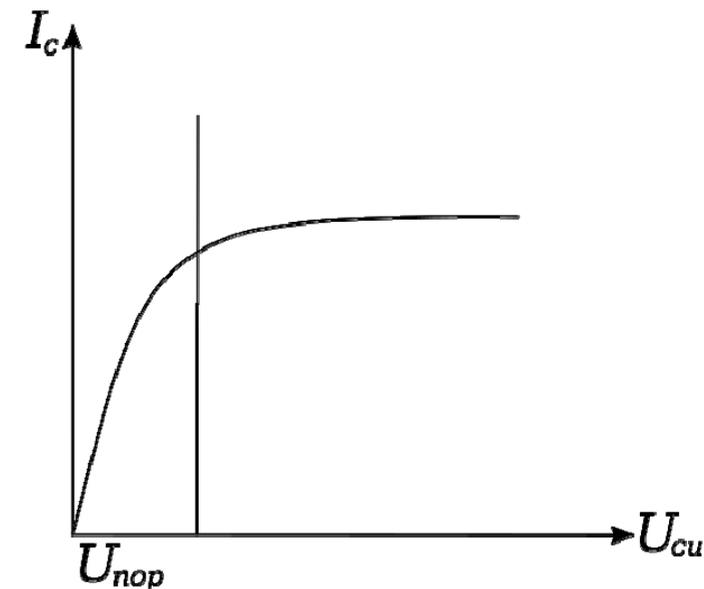
1. Для транзисторов с каналом n-типа при  $U_{3u} < U_{пор}$ ,  $I_c = 0$  транзистор закрыт;
2. При  $U_{3u} > U_{пор}$  транзистор открывается и рабочая точка находится на нелинейном участке управляющей (сток-затворной) характеристики полевого транзистора:

$$I_c = K_n \left[ (U_{3u} - U_{пор}) \cdot U_{cu} - \frac{U_{cu}^2}{2} \right]$$

$K_n$  — удельная крутизна характеристики транзистора;

3. При дальнейшем увеличении управляющего напряжения  $U_{3u}$  рабочая точка переходит на линейный участок стоко-затворной характеристики;

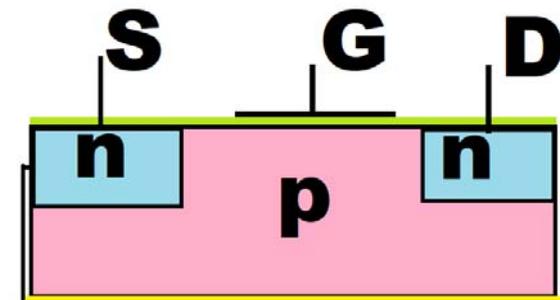
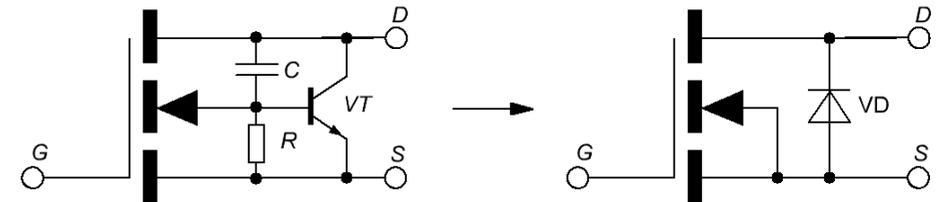
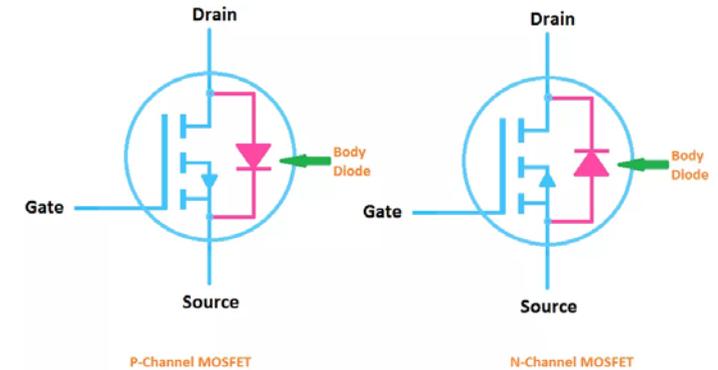
$$I_c = K_n / 2 [U_{3u} - U_{пор}]^2 \text{ — уравнение Ховстайна.}$$



# MOSFET встроенный диод

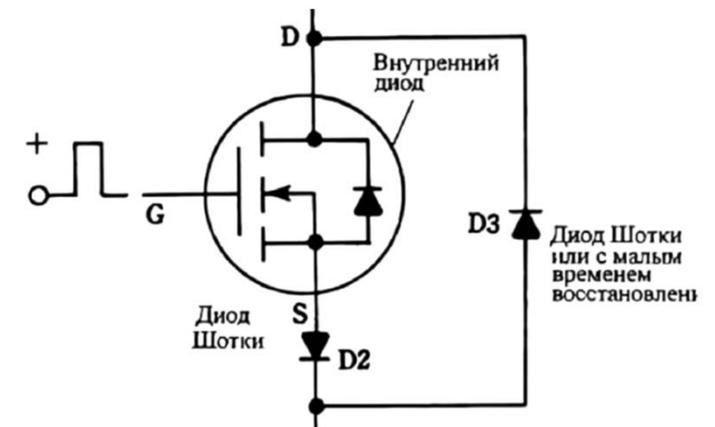
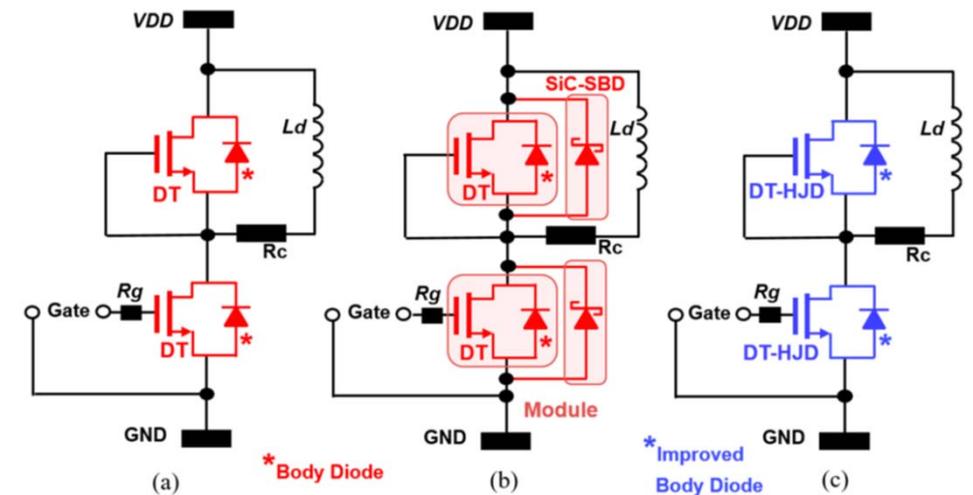
Встроенный диод, который иногда называют защитным, а иногда — паразитным. Он характерен для транзисторов с индуцированным каналом.

Диод образован внутренней структурой самого транзистора. У него имеются области разной проводимости, которые можно рассматривать, как обычный биполярный транзистор, который в свою очередь, состоит из двух диодов. При этом в «правильную» сторону диод можно игнорировать — сопротивление индуцированного канала намного меньше сопротивления данного диода, и через последний пойдёт минимальный ток. А вот обратный диод и является паразитным. Диод проводит ток даже в закрытом состоянии транзистора, когда основной канал уже закрыт и почти не проводит ток. При штатной эксплуатации транзистора к нему просто не прикладывают напряжение в обратную сторону и он всегда закрыт.



# MOSFET встроенный диод

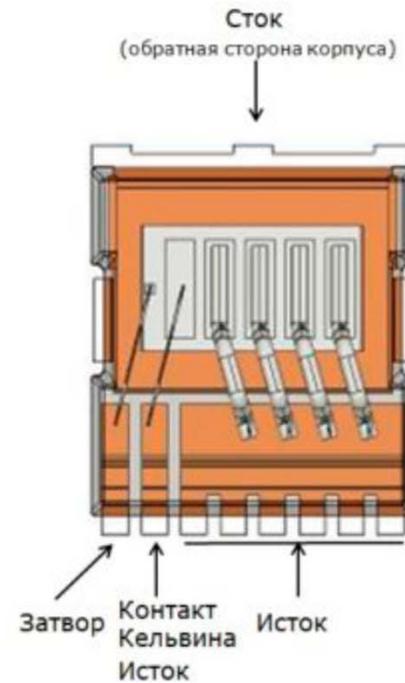
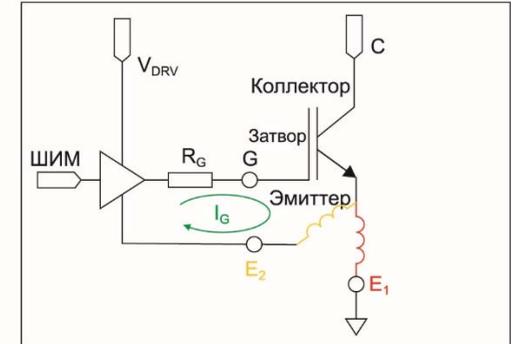
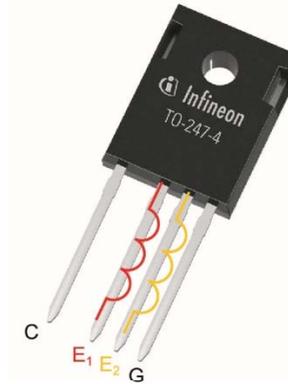
При коммутации индуктивной нагрузки, типа реле, дросселя или обмоток двигателя всегда возникает обратный выброс напряжения, что связано с ЭДС самоиндукции, которая накапливается в магнитном поле катушки. То есть, данный диод будет проводить ток этого самого обратного выброса. В 99% случаев это хорошо и погасит паразитный импульс. Но данный диод имеет очень «плохие» характеристики — высокое падение на нём напряжения, а значит — высокое сопротивление, что приводит к большому тепловыделению. Разработчики MOSFET'ов встроили внутрь самого транзистора ещё один диод, но уже специальный «защитный», который ставится в ту же сторону, что и паразитный, но имеет уже вполне приличные характеристики. Часто это диод Шоттки, у которого низкое падение напряжения. В даташитах MOSFET'ов указывают характеристики этого диода, по которым легко определить — является ли диод паразитным или защитным. Если падение напряжения на нём велико ( $>1V$ ) — диод паразитный, мало ( $<0.5V$ ) — защитный.



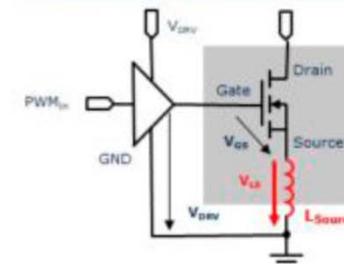
# Вывод Кельвина

Некоторые мощные МОП-транзисторы, используемые в силовой технике в качестве электрических ключей, снабжаются дополнительным выводом от канала транзистора для уменьшения индуктивности выводов. Использование вывода Кельвина на примере IGBT-транзистора позволяет получить снижение полных потерь переключения до 20% в диапазоне номинальных токов.

Дополнительный вывод E2 подсоединяется непосредственно к драйверу, как показано на рисунке. Этот отдельный эмиттерный вывод часто называют выводом Кельвина по аналогии с известным методом измерения низких сопротивлений, изобретенным лордом Кельвином. Суть метода в разделении линий питания измеряемого резистора током и линий измерения напряжения на нем. Данный принцип привел к так называемой четырехпроводной схеме измерения сопротивления, исключая из искомой величины сопротивления подводящих проводов, что повысило точность измерения низкоомных резисторов.

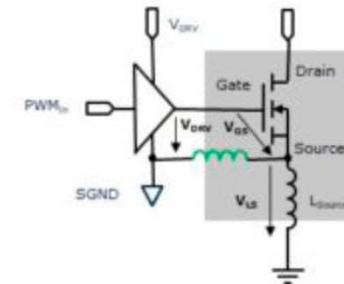


## TO-220/D<sup>2</sup>PAK



> Паразитная индуктивность истока просаживает напряжение управления, снижая КПД из-за затягивания процесса включения и выключения

## TOLL 4pin configuration



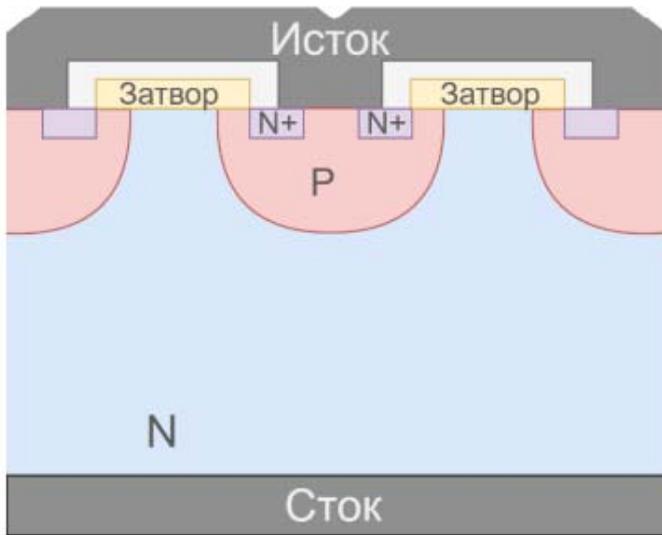
> Дополнительный вывод истока не ослабляет напряжение управления  
> **Выше КПД** на полной нагрузке

# VD MOSFET транзистор

**VD (Vertical Double-Diffused) MOSFET.**

**Планарные вертикальные полевые транзисторы с двойной диффузией**

# VD (Vertical Double-Diffused) MOSFET



Структура планарных VD MOSFET

## Преимущества

- + Высокое напряжение сток-исток ( $V_{ds}$ )
- + Высокая устойчивость к лавинному пробую

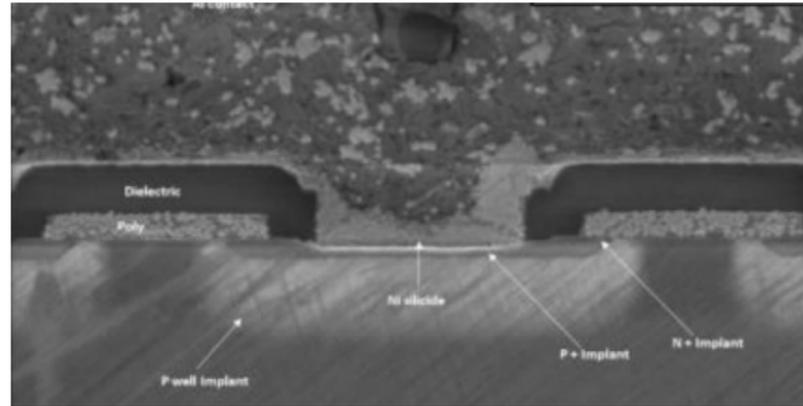
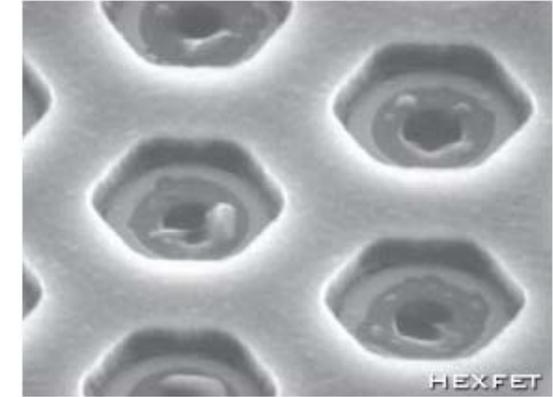


Фото разреза планарного VD MOSFET

## Недостатки

- Высокие  $Q_g$  и  $C_{iss}$
- Высокая стоимость кристалла из-за его размера



Форма единичных ячеек на кристалле планарного транзистора HEXFET

## Особенности

- $V_{ds}$  до 1500В
- $R_{ds(ON)}$  единицы Ом
- 5-8 слоев литографии
- Шаг ячейки  $\sim 20$  мкм

# Применения планарных VD MOSFET

Импульсные источники питания



DC/DC преобразователи



Драйверы электродвигателей

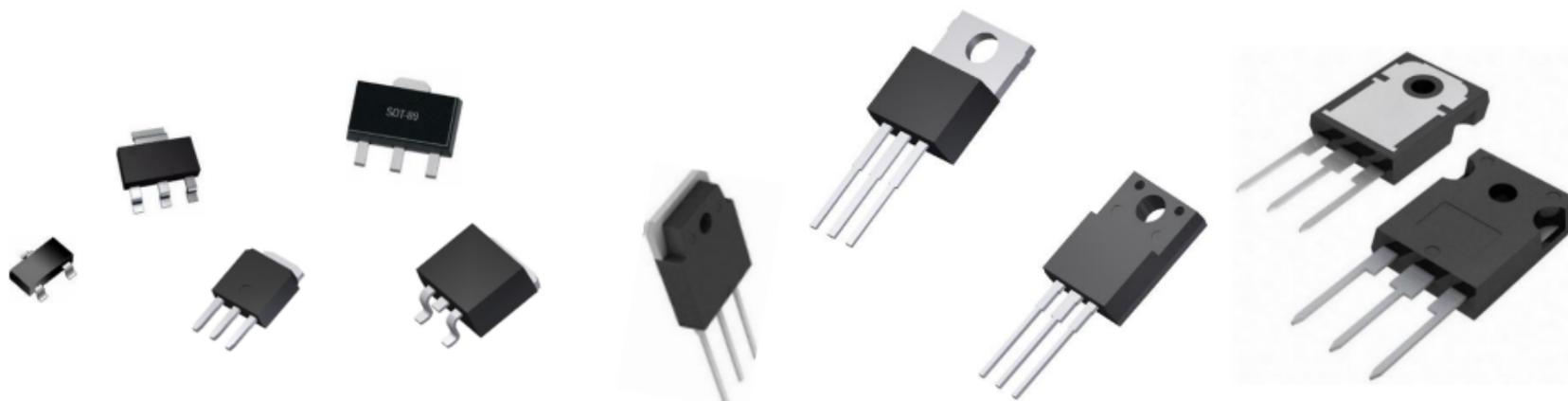


Электрочарядные станции для электротранспорта



## Планарные VD MOSFET азиатских производителей

Бренд	Тип проводимости	Vds, В	Rds(ON), Ом	Id, А	Количество PN
WayOn	N	400...1500	0.11...11.5	1...40	109
JSCJ		600, 650	0.67...2.7	2...12	18
CR Micro		400...1500	0.18...9,4	0,03...30	~200
Jie Jie		500...1000	0.68...8.8	1...20	26
Belling		250...1500	0.012...8	2...90	81



## Сравнение планарных VD MOSFET

Бренд	VISHAY	WAYON	JSCJ	CR MICRO	JIEJIE	BELLING
P/N	SiHF12N65E	WML12N65D1B	CJPF12N65	CS12N65FA9H	JMPF12N65BJ	BL12N65
Vds, V	650	650	650	650	650	650
Id @ 25°C, A	12	12	12	12	12	12
Id @ 100°C, A	8	-	-	10	7	7.6
Eas, mJ	226	296	540	700	605	680
Rds(on) @ 25°C (typ), Ohm	0,33	0.58	0.7	0.54	0.64	0.5
Qgate, nC	35	44.7	42	44	47	49
FOM	11.55	25.926	29,4	23,76	30,08	24,5
Ciss @ 25V, pF	1224	2010	1800	2060	2078	2580
Coss @ 25V, pF	65	161	200	184	170	176
Diode Vsd, V	1.0	1.4	1.4	1.5	1.2	1.0
Diode Trr, ns	309	364	-	345	432	515
Diode charge Qrr, uC	3.8	6.8	-	2.68	5.1	4.29
Total power Ptot @ 25°C, W	33	65	50	55	30	50

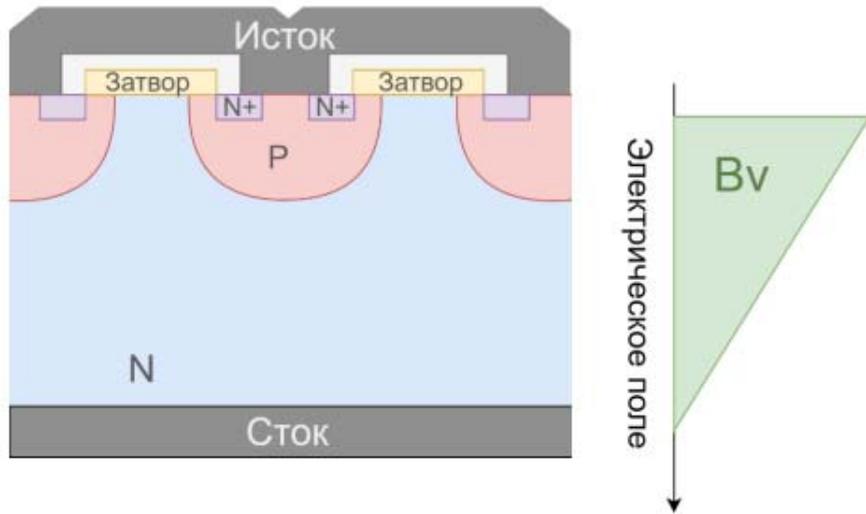
**TO-220F**



# SJ MOSFET

**SJ (Super Junction) MOSFET.**  
**Полевые транзисторы с супер переходом**

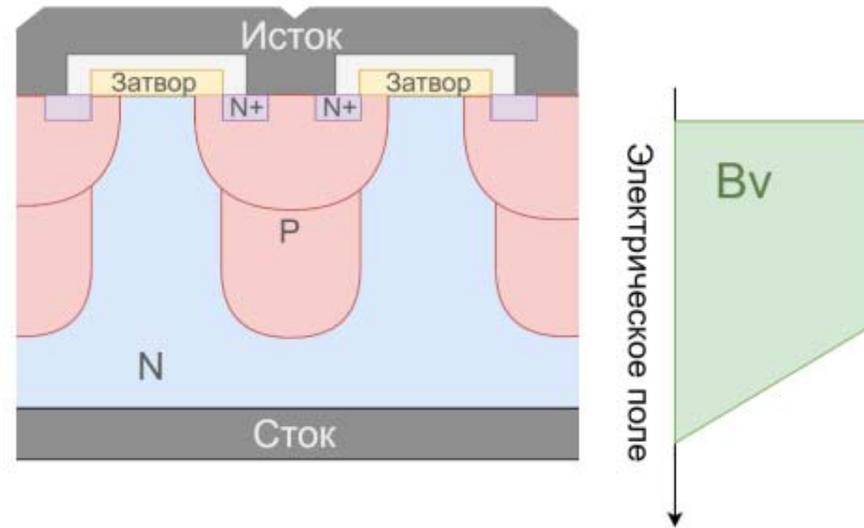
## SJ MOSFET



Структура планарных VD MOSFET и распределение электрического поля в кристалле транзистора

### Преимущества

- +  $R_{ds}(ON)$  ниже чем у VD MOSFET
- +  $Q_g$  и  $C_{iss}$  ниже чем у VD MOSFET.
- + Меньшие габариты кристалла по сравнению с VD MOSFET
- + Нет значительного увеличения  $R_{ds}(ON)$  при увеличении рабочего  $V_{ds}$



Структура SJMOSFET и распределение электрического поля в кристалле транзистора

### Недостатки

- Сложный производственный процесс.
- Ниже устойчивость к лавинному пробою в сравнении с планарными MOSFET

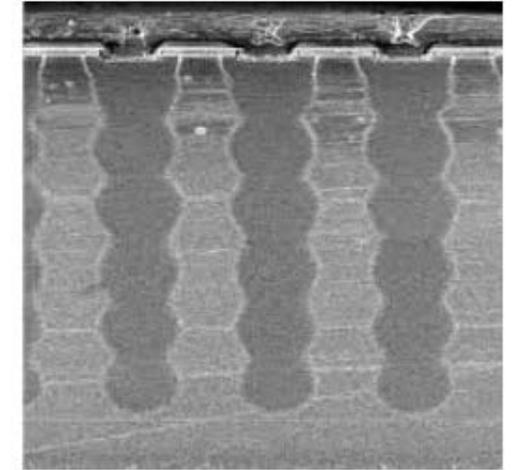


Фото разреза SJ MOSFET

### Особенности

- $V_{ds}$  до 250В
- $R_{ds}(ON)$  единицы...десятки мОм
- До 15 слоев литографии
- Шаг ячейки  $\sim 13$  мкм

# Применения планарных SJ MOSFET

Резонансные преобразователи с PFC



Бесперебойные источники питания



Импульсные источники питания

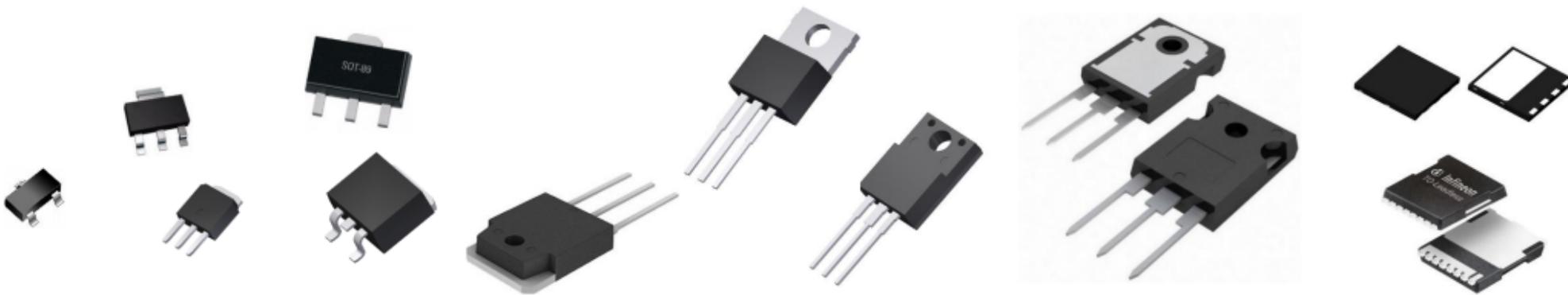


Электрoзарядные станции для электротранспорта



# SJ MOSFET азиатских производителей

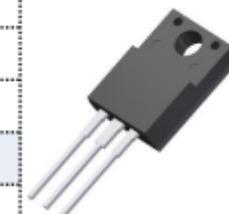
Бренд	Тип проводимости	Vds, В	Rds(ON), Ом	Id, А	Количество PN
WayOn	N	500...1050	0.0205...4	1.5...99	700
Yangjie		650...900	0.22...1.1	5...17	4
JSCJ		650	0.32	11.5	2
NCE		500...1050	0.036...4.5	1...83	88
CR Micro		550...800	0.025...1.55	8...83	~300
Jie Jie		650...700	0.04...0.98	4...71	35



# Сравнение SJ MOSFET

Бренд	ST	WAYON	YJ	JSCJ	CR MICRO	JIEJIE	NCE
P/N	STF16N65M2	WML14N65C4	YJF12C65H	CJPF360JN65A	CRJF380N65G2	JMH65R430ACFP	NCE65TF360F
Vds, V	650	650	650	650	650	650	650
Id @ 25°C, A	11	11	12	11.5	11	11.2	11.5
Id @ 100°C, A	6.9	6	7.5	-	7	7.8	7
Eas, mJ	360	115	303	50	75	180	144
Rds(on) @ 25°C (typ), Ohm	0.32	0.33	0.28	0.32	0.32	0.364	0.29
Qgate, nC	19.5	13	25	13.7	19.8	18.4	19
FOM	6.24	4,29	7	4.384	6.336	6.69	5.51
Ciss @ 25V, pF	718	665	1050	807	640	703	870
Coss @ 25V, pF	32	21.5	30	42	32	25	54
Diode Vsd, V	1.6	1.2	0.9	1.2	0.85	0.75	0.9
Diode Trr, ns	342	170	173	-	240	239	130
Diode charge Qrr, uC	3.5	1.4	4.18	-	2.43	2.513	0.72
Total power Ptot @ 25°C, W	25	31	62.5	89	21	28	32.6

TO-220F

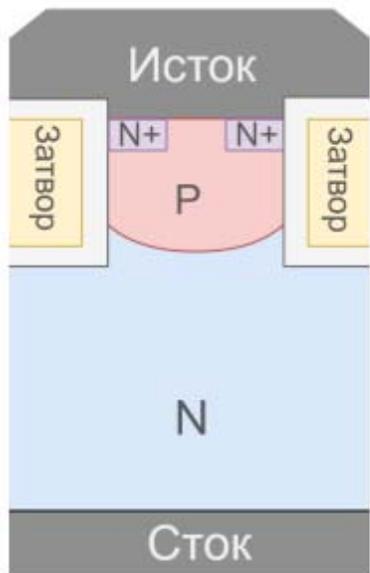


# Trench MOSFET

**Trench MOSFET.**

**Полевой транзистор с затвором в «траншее»**

# Trench MOSFET. Полевой транзистор с затвором в «траншее»



Структура Trench MOSFET

## Преимущества

- + Низкое  $R_{ds}(On)$ .
- +  $I_d$  выше чем у VD и SJ MOSFET
- + Малые габариты единичной структуры
- + Малые габариты кристалла по сравнению с планарными MOSFET

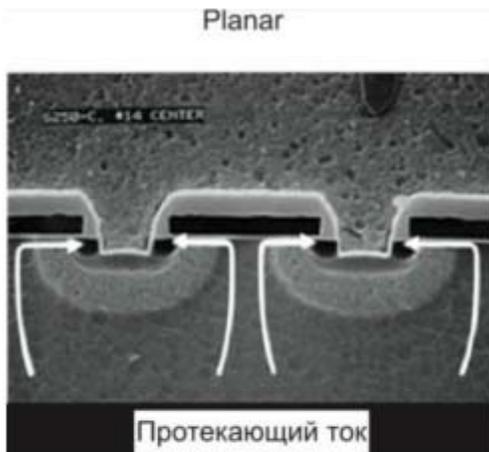


Фото разреза планарного VD MOSFET с указанием пути протекания тока

## Недостатки

- Низкое напряжение сток-исток ( $V_{ds}$ )
- Низкие динамические характеристики

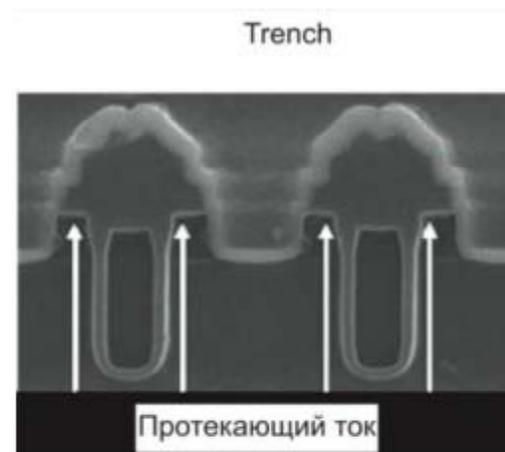
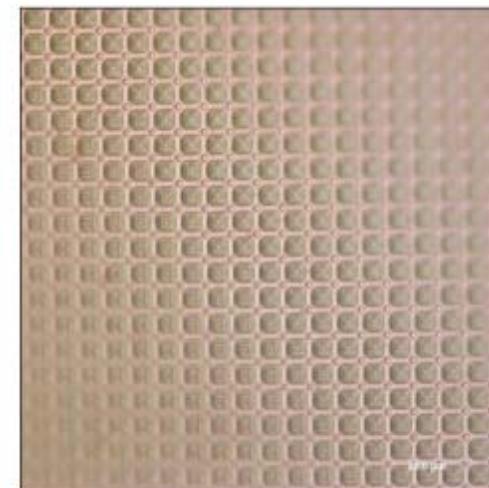


Фото разреза Trench MOSFET с указанием пути протекания тока



Форма единичных ячеек на кристалле Trench MOSFET

## Особенности

- $V_{ds}$  до 250В
- $R_{ds}(ON)$  единицы – десятки мОм
- 5-7 слоев литографии
- Шаг ячейки 5 мкм

# Применения Trench MOSFET

Драйверы электродвигателей



Бесперебойные источники питания

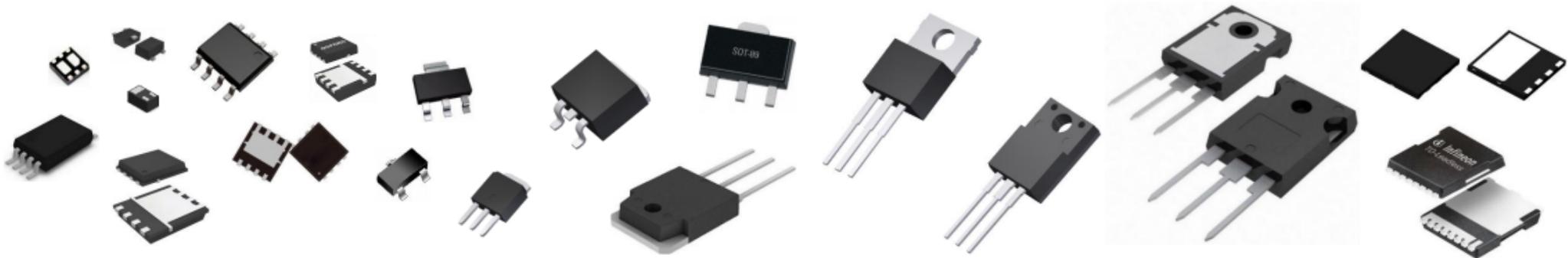


DC/DC преобразователи



# Trench MOSFET азиатских производителей

Бренд	Logo	P			N			Количество PN
		Vdss, В	Rds(ON), Ом	Id, А	Vdss, В	Rds(ON), Ом	Id, А	
WayOn		-20...-100	0.0041...0.17	-3.8...-120	20...250	0.0026...0.77	3.7...240	429
Yangjie		-15...-100	0.0045...3.3	-0.5...-100	20...150	0.00065...3	0.2...220	156
JSCJ		-12...-100	0.0019...4.5	-0.13...-100	15...150	0.0014...3.5	0.1...180	319
NCE		-12...-155	0.0041...0.2	-0.66...-85	16...200	0.001...6.1	0.17...350	276
CR Micro		-20...-100	0.008...0.072	-6...-80	16...200	0.006...0.9	0.2...88	502
Jie Jie		-12...-40	0.008...0.072	-4.1...-70	20...100	0.0027...0.225	0.2...88	280



# Сравнение Trench MOSFET

Бренд	INFINEON	WAYON	YJ	JSCJ	CR MICRO	JIEJIE
P/N	IRFR7546PbF	WMO80N06TS	YJD80G06C	CJU80N07	CRTD082NE6N	JMTK80N06A
Vds, V	60	60	60	65	65	60
Id @ 25°C, A	71	80	80	80	85	80
Id @ 100°C, A	50	51	50	-	54	52
Eas, mJ	178	105.8	150	320	100	182
Rds(on) @ 25°C (typ), Ohm	0.0066	0.0065	0.0055	0.0065	0.0069	0.0053
Qgate, nC	58	67	34	87	73	77
FOM	0,3828	0,4355	0,187	0,5655	0,5037	0,4081
Ciss @ 25V, pF	3020	4160	2000	3705	3275	3782
Coss @ 25V, pF	280	235	390	300	312	297
Diode Vsd, V	1.2	1.2	0.85	1.2	0.9	1.2
Diode Trr, ns	26	31	27	-	29	25
Diode charge Qrr, nC	22	43	36	-	33	29
Total power Ptot @ 25°C, W	99	92	78	100	99	136

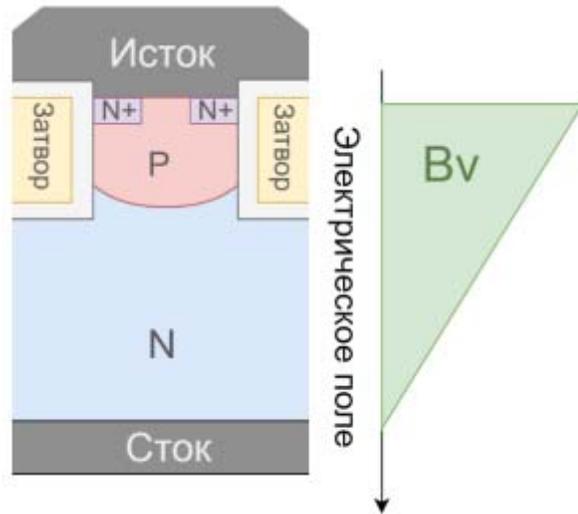
TO-252



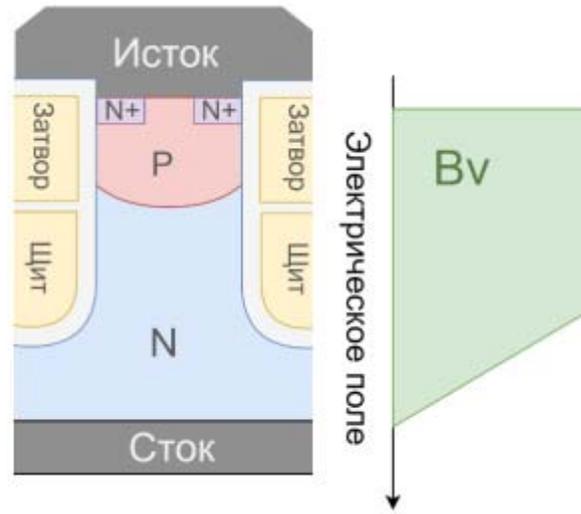
# SGT MOSFET

**SGT MOSFET. Полевой транзистор с экранированным затвором**

# SGT MOSFET. Полевой транзистор с экранированным затвором



Структура Trench MOSFET и распределение электрического поля в кристалле транзистора



Структура SGT MOSFET и распределение электрического поля в кристалле транзистора

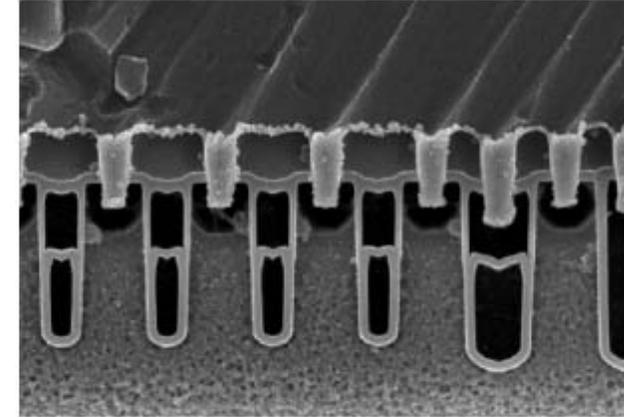


Фото разреза SGT MOSFET

## Преимущества

- +  $R_{ds(ON)}$  ниже чем у Trench MOSFET.
- +  $Q_g$  и  $C_{iss}$  ниже чем у Trench MOSFET.
- + Выше устойчивость к лавинному пробую
- + Экран выполняет роль снаббера и уменьшает потери на переключение.

## Недостатки

- Сложный производственный процесс.

## Особенности

- $V_{ds}$  до 200В
- $R_{ds(ON)}$  десятки доли...единицы мОм
- 6-9 слоев литографии
- Шаг ячейки  $\sim 3$  мкм

# Применения SGT MOSFET

РоЕ инжекторы



Бесперебойные источники питания



DC/DC преобразователи



Системы управления батареями



Драйверы электродвигателей





# Сравнение SGT MOSFET

Бренд	INFINEON	WAYON	YJ	JSCJ	CR MICRO	JIEJIE	NCE
P/N	ISC0702NLS	WMB025N06HG4	YJG175G06AR	CJAC13TH06	CRSM024N06L2	JMSL0603BG	NCEP025N60G
Vds, V	60	60	60	60	60	60	60
Id @ 25°C, A	135	140	175	130	160	142	165
Id @ 100°C, A	95	88.6	110	-	101	90	115
Eas, mJ	58	352.8	992	250	189	338	540
Rds(on) @ 25°C (typ), Ohm	0.0023	0.0021	0.0018	0.0022	0.0024	0.0024	0.0022
Qgate, nC	42	68	50	63.7	37	51	75.5
FOM	0.0966	0,1428	0,09	0,14014	0,0888	0,1224	0,1661
Ciss @ 25V, pF	2700	4080	5250	5298	4610	3174	4850
Coss @ 25V, pF	580	1053	1085	1635	2188	872	850
Diode Vsd, V	0.85	1.2	0.9	1.3	0.82	0.65	1.2
Diode Trr, ns	43	56	35	-	53	49	56
Diode charge Qrr, nC	49	67.5	140	-	56	52	80
Total power Ptot @ 25°C, W	100	92.6	140	140	113	114	145

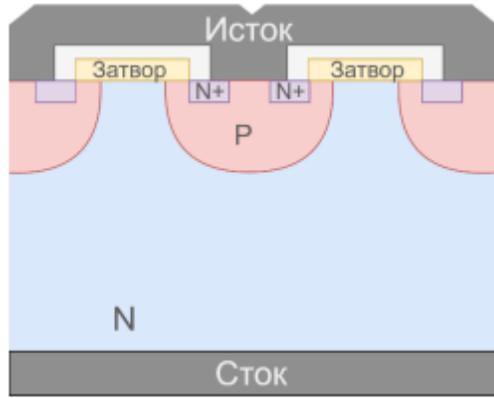
PDFN5060-8L



# SiC MOSFET

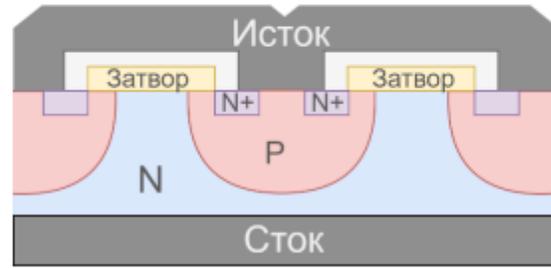
**SiC MOSFET. Полевые транзисторы на основе карбида кремния**

# SiC MOSFET. Полевые транзисторы на основе карбида кремния



Структура планарного Si MOSFET

Дрейфовый N-слой в 10 раз тоньше благодаря высокой электрической прочности SiC.



Структура планарного SiC MOSFET

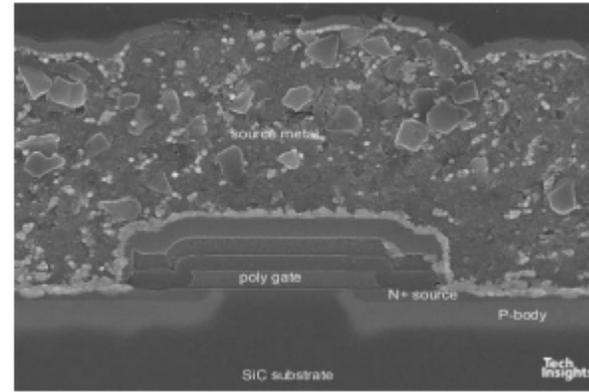


Фото разреза планарного SiC MOSFET

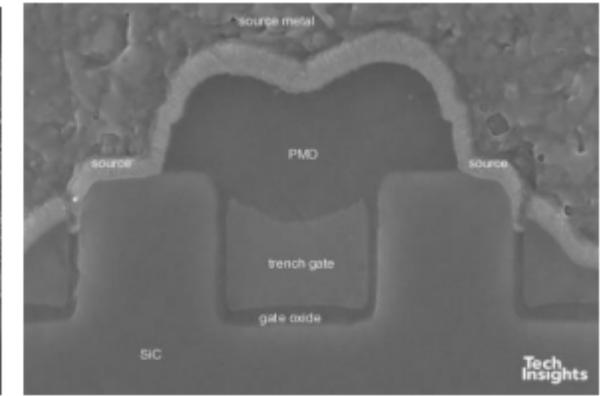


Фото разреза Trench SiC MOSFET

## Преимущества

- + Высокое  $V_{ds}$
- + Высокая частота переключений
- + Низкое  $R_{ds}(ON)$
- + Электрические свойства слабо зависят от температуры
- + Высокая теплопроводность

## Недостатки

- Высокая сложность производства
- Высокая стоимость

## Особенности

- $V_{ds}$  до 1700В
- $R_{ds}(ON)$  десятые доли, единицы мОм
- Шаг ячейки ~5 мкм
- ~300 операций при производстве

# Применения SiC MOSFET

Солнечные преобразователи



Модульные бесперебойные источники питания



Электроразрядные станции

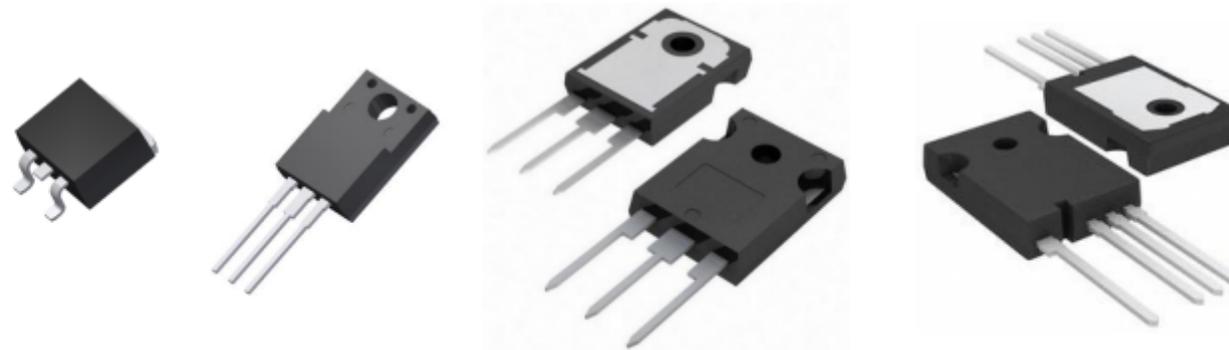


Драйверы маломощных промышленных электродвигателей



# SiC MOSFET азиатских производителей

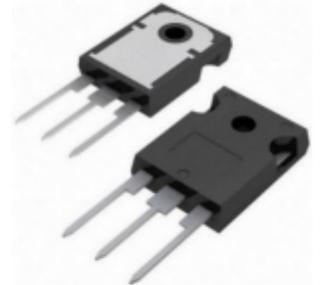
		N			
Бренд		Vdss, В	Rds(ON), Ом	Id, А	Количество PN
WayOn		1200, 1700	0.032...50	0.05...87	11
Yangjie		650, 1200	0.03...0.16	21...65	22
CR Micro		650, 1200, 1700	0.017...0.6	5...118	19
Anbon		650, 1200, 1700	0.034...1.3	5...90	14



# Сравнение SiC MOSFET

Бренд	INFINEON	WAYON	YJ	CR MICRO	ANBON
P/N	AIMW120R080M1	WSCM75J120T2B	YJD212080NCTG1Q	CRXQ80M120G1	AS1M080120P
Vds, V	1200	1200	1200	1200	1200
Id @ 25°C, A	33	44	38	36	36
Id @ 100°C, A	24	31	28	25	24
Rds(on) @ 25°C (typ), mOhm	0.080	0.075	0.077	0.085	0.080
Qgate, nC	28	40	41	105	79
FOM	2,24	3	3,157	8,925	6,32
Ciss @ 25V, pF	1060	1020	890	1372	1475
Coss @ 25V, pF	58	64	58	88	94
Diode Vsd, V	3.8	3.8	3.9	3.5	3.6
Diode Trr, ns	-	81	28.24	42	35
Diode charge Qrr, nC	230	267	190	120	91
Total power Ptot @ 25°C, W	150	214	220	192	192

**TO-247-3L**



# Сравнительный анализ MOSFET по технологиям

Планарный VD MOSFET	SJ MOSFET	Trench MOSFET	SGT MOSFET	SiC MOSFET
WAYON	WAYON	WAYON	WAYON	WAYON

# Силовые полупроводники с широкой запрещенной зоной

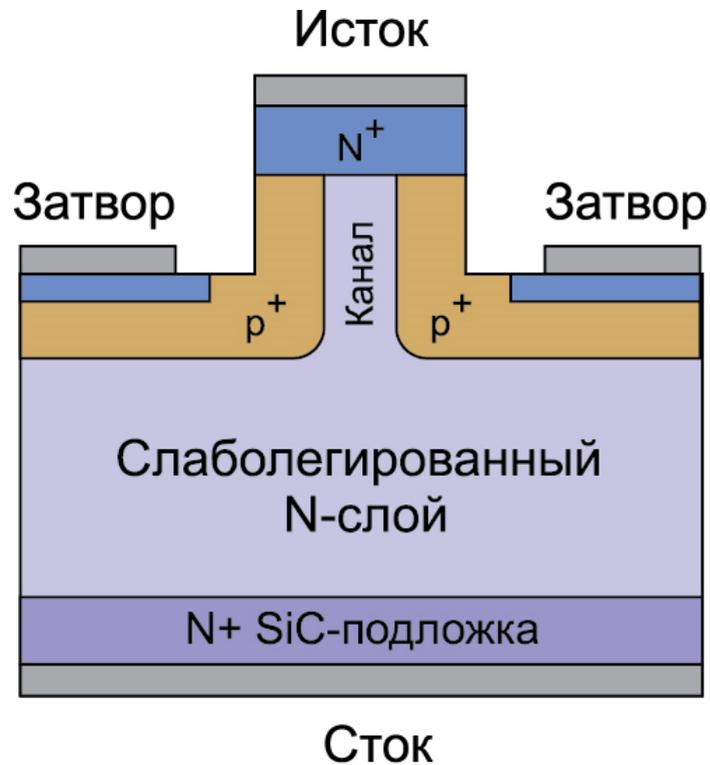
Пионером стал карбид кремния (SiC), затем – нитрид галлия (GaN).

Основное отличие карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN от традиционного кремния Si заключается в ширине запрещенной зоны и, соответственно, в критической напряженности электрического поля. Именно эти отличия и определяют главное преимущество SiC и GaN – они могут работать с большим максимально допустимым напряжением. На сегодняшний день этот параметр полевых GaN FET составляет 650 В, а их собратьев SiC FET – 1700 В. Высоковольтные SiC FET, в отличие от IGBT, в ряде приложений выигрывают конкурентную битву благодаря заметно меньшим потерям и большей рабочей частоте.

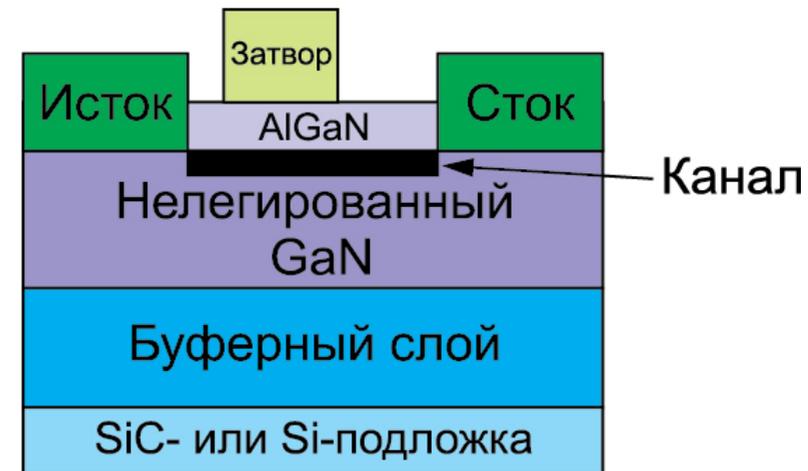
Электрические параметры	Si	SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	3,26	3,44
Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К)	1,5	3,7	1,3
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /(В·с)	1300	900	900–1200
Максимальная скорость движения электронов, 10 <sup>6</sup> см/с	10	22	25
Критическая напряженность электрического поля, 10 <sup>6</sup> В/см	0,3	3	3,5

# Силовые полупроводники с широкой запрещенной зоной

Главным недостатком является более высокая стоимость, сложность тестирования и производства. Основная проблема заключается в том, что на границе разделения SiC с оксидом SiO<sub>2</sub> уменьшается подвижность носителей. Следовательно, для того чтобы не снижать динамические параметры, приходится увеличивать напряженность электрического поля до 4–5 МВ/см (в Si MOSFET она не превышает 3 МВ/см).



а)

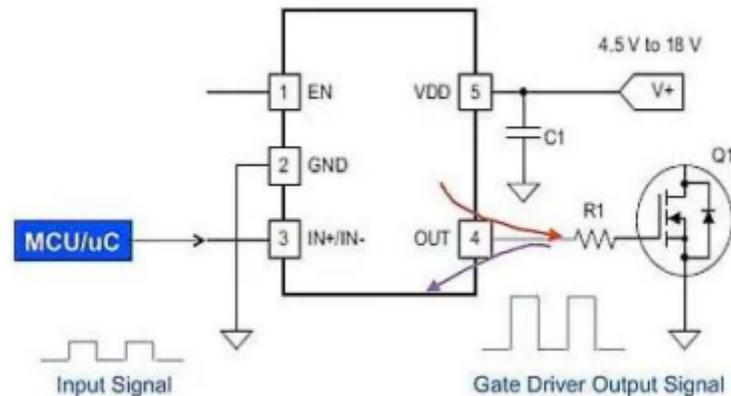


б)

# Драйверы затвора

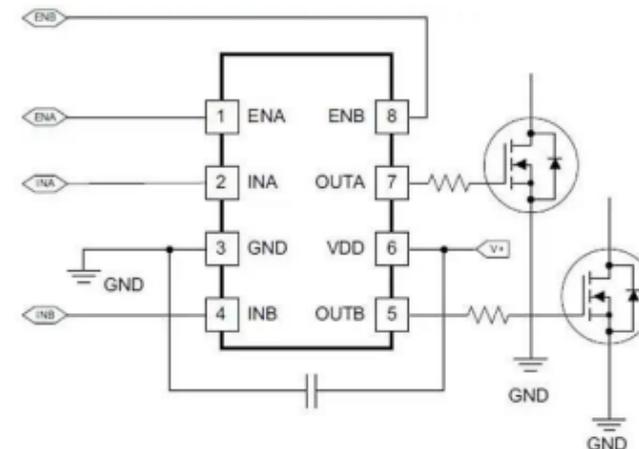
## ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

- Упрощает схему управления, разгружает ее по току
- Обеспечивает быстрое переключения транзистора для минимизации коммутационных потерь (увеличение КПД)
- Согласование уровней между управляющей схемой и транзистором
- Простая реализация схемы управления транзистора в верхнем плече
- Безопасная работа с полумостовой схемой, исключающая возникновение сквозного тока
- Защита транзистора при аварийном режиме работы
- Увеличение помехоустойчивости и стойкости к электромагнитным помехам схемы управления



## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

- AC/AC-, AC/DC-преобразователи
- Резонансные и квазирезонансные источники питания
- Корректоры коэффициента мощности
- Схемы синхронного выпрямления
- Приводы электродвигателей переменного и постоянного тока
- Мощные коммутаторы нагрузки
- Инверторы для солнечных панелей
- Интеллектуальные модули питания
- Мощные DC/DC-преобразователи
- Источники бесперебойного питания



# Драйверы затвора

	Ruimeng	MORNSUN	ЗРЕАК	Novosense	Belling	Chipown	ChipAnalog	SILAN	UTC	2PAI
1CH Low Side	☆	-	★	-	★	-	☆	★	★	-
2CH Low Side	☆	-	★	★	★	★	☆	★	★	-
High Side Driver	-	-	-	-	-	-	-	-	☆	-
HS + LS / Half-bridge	-	-	☆	★	★	★	☆	★	★	-
3-Phase Driver	-	-	-	-	★	★	-	★	-	-
Automotive (AEC-Q100)	-	-	★	★	-	-	★	-	-	★
Isolated Driver	-	★*	☆	★	-	★	★	-	-	★

★ - серийная продукция

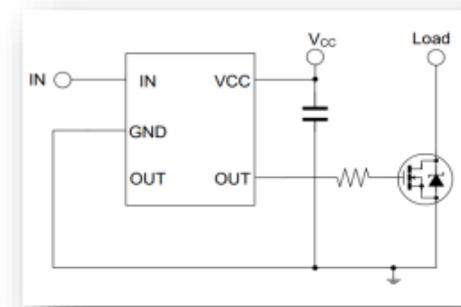
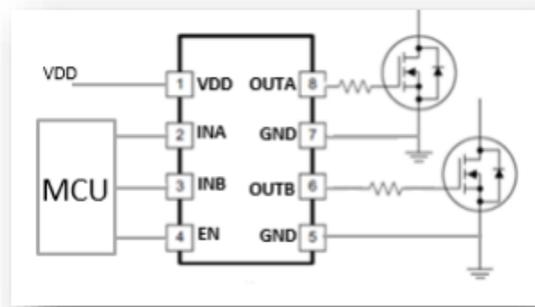
☆ - в разработке

\* - представлены в виде модулей

# Драйверы затвора

## Сравнение основных параметров Драйверы нижнего плеча (Low Side)

	3PEAK	Nonosense	Belling	Chipown	Unisonic
Напряжение питания	4.5 ~ 25 V	4.5 ~ 24 V	5.0 ~ 25 V	4.5 ~ 30 V	4.5 ~ 18 V
Выходной пиковый ток	±5 A	±5 A	+1.0 A / -1.5 A	±5 A	+8.0 A / -4.0 A
Входное напряжение (max)	-5 ~ 20 V	-3 ~ 14 V	-0.3 ~ 25 V	0 ~ 30 V	0 ~ 18 V
Рабочая температура кристалла	-40°C ~ 150°C	-40°C ~ 150°C	-40°C ~ 150°C	-40°C ~ 150°C	-40°C ~ 125°C
Время спада/нарастания выходного сигнала	7 / 6 ns	9 / 8 ns	25 / 25 ns	6 / 6 ns	8 / 7 ns
Задержка сигнала	14 ns	21 ns	ND	22 ns	19 ns
Время согласования между выходами	1 ns	1 ns	ND	1 ns	ND
Потребление тока (25°C, 12VDD)	350 uA	950 uA	120 uA*	600 uA	100 uA*



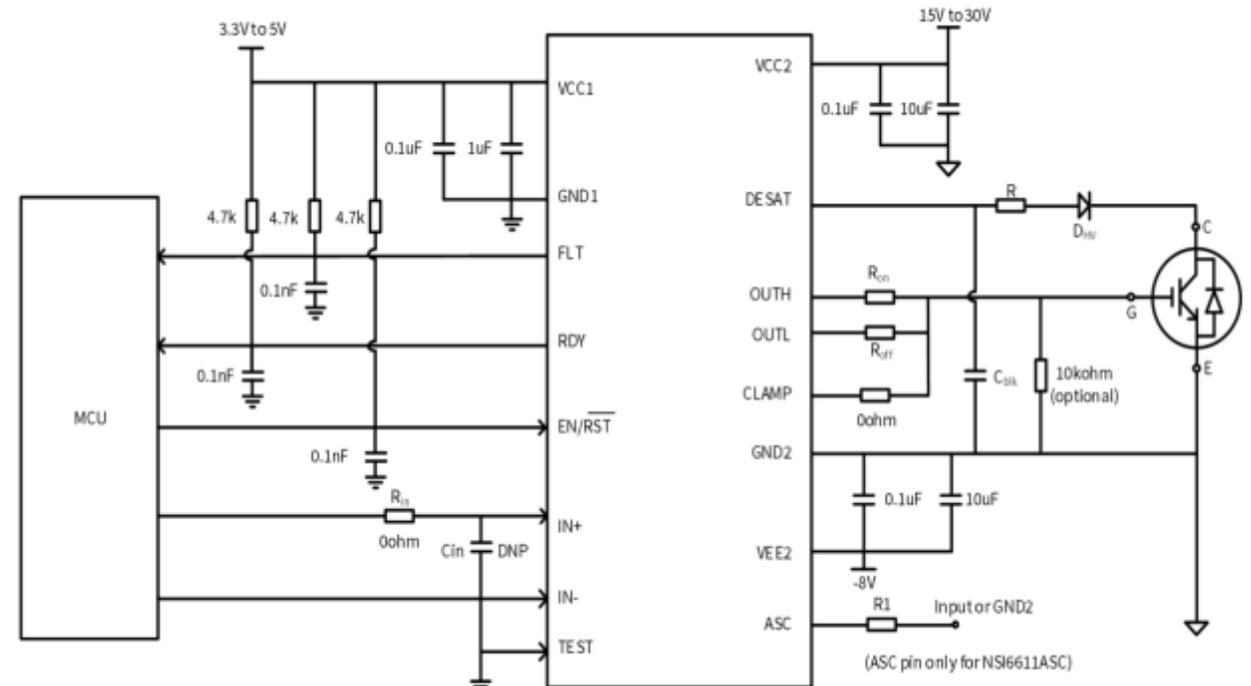
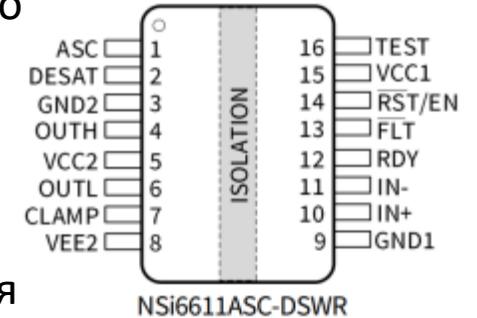
# Интеллектуальные изолированные драйверы от Novosense

## ОСОБЕННОСТИ

- Работа с IGBT и SiC MOSFET
- Напряжение изоляции 5.7 кВ (RMS)
- Рабочее напряжение драйвера 1500 В (RMS)
- Питание драйвера до 32 В со схемой UVLO
- Выходной ток  $\pm 10$  А
- Высокая стойкость к синфазным помехам  $\pm 150$  кВ/мкс
- Функция активного короткого замыкания ASC
- Высокое быстродействие схемы DESAT 200 нс
- Мониторинг состояние работы микросхемы (выводы Fault и Ready)
- Типовая задержка распространения 80 нс
- Мягкое выключение током 400 мА
- Макс. искажение длительности импульса 30 нс
- Схема активного подавления эффекта Миллера
- Температурный диапазон работы  $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$
- Широкий корпус SO16-300 (SOW16)
- Квалификация AEC-Q100 для автомобильного применения (NSi66x1AxC-Q)

## ПРИМЕНЕНИЕ

- Тяговые инверторы для электромобилей
- Зарядные устройства для гибридных авто и электромобилей
- Промышленные приводы электродвигателей
- Инверторы солнечных панелей
- Мощные импульсные источники питания



**Спасибо за внимание**

**ЧУ ПО «Социально-технологический колледж» г Тула**

**Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович**