

## СРАВНЕНИЕ И ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА MOSFET ТРАНЗИСТОРИ НА СИЛИЦИЕВ КАРБИД И СИЛИЦИЙ

Ярослав Стефанов, Иван Миленов  
[nibelung.2007@abv.bg](mailto:nibelung.2007@abv.bg), [milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg)

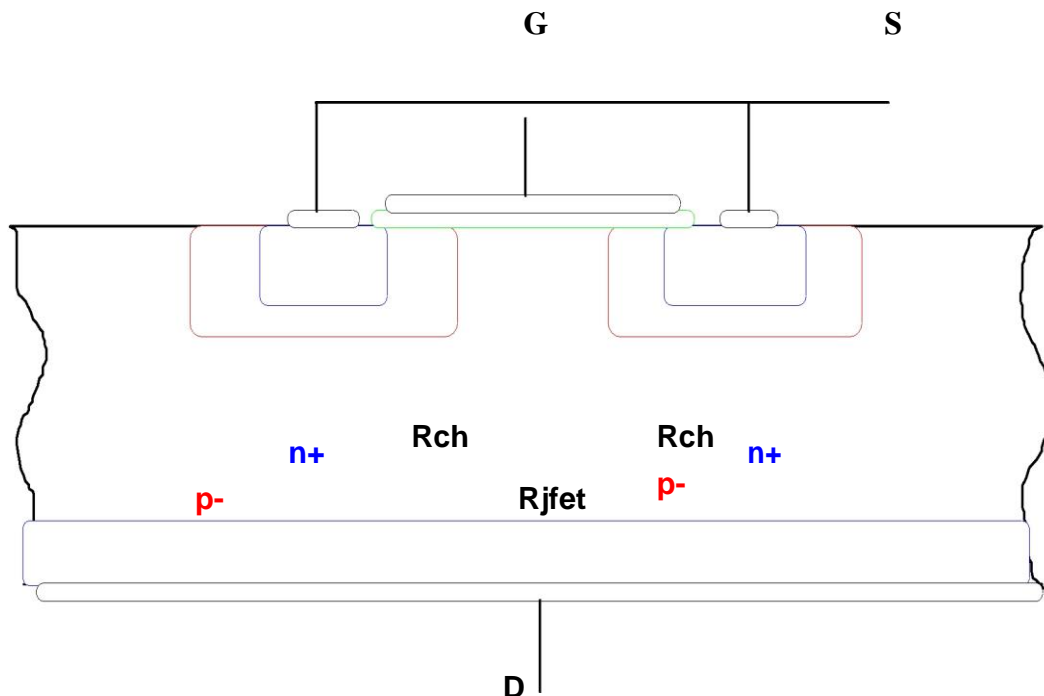
ВТУ „Тодор Каблешков“  
София, 1574, ул. Гео Милев 158  
БЪЛГАРИЯ

**Ключови думи:** транзистори, MOSFET, Si, SiC

**Резюме:** В доклада са изследвани и сравнени параметрите на сравнително новите MOSFET транзистори, произведени на основата на силициев карбид (SiC) и конвенционалните силициеви (Si) MOSFET. Направена е оценка на качествата на новите прибори на силициев карбид и предимствата им при евентуално приложение в различни устройства. Благодарение на по-широката забранена зона на SiC в сравнение с тази на Si и по ниското съпротивление във включено състояние, транзисторите на SiC имат редица предимства пред тези на Si, като например по-малки загуби на мощност в режим на превключване и по-ниска температура на прехода при работа. Последното означава че SiC MOSFET се нуждаят от по-малка площ на радиатора при една и съща мощност на товара което предполага по-голяма компактност на устройствата и също по-малко тегло. Разгледани са различни приложения на транзисторите на SiC.

Силициевият карбид (SiC) е полупроводников материал използван в последно време за производството на високоволтови мощни прибори. Причините за разработването на полупроводникови прибори на основата на SiC са някои негови ценни свойства като по-голямата напрегнатост на пробив на електрическото поле  $E_{bd}(sic)=22 \times 10^5 \text{ V/cm}$  в сравнение със силиция  $E_{bd}(si)= 2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ , по добрата термична проводимост  $K_{th}(sic)= 4.56 \text{ W/K.cm}$  за силиция -  $K_{th}(si) = 1.5 \text{ W/K.cm}$ , също така и по малката диелектрична константа  $\epsilon_r(sic) = 9.7$  за силиция  $\epsilon_r(si)=11.7$  [1]. Тези свойства на силициевият карбид обуславят по- високи  $\text{V/cm}$ , по добрата термична проводимост  $K_{th}(sic)= 4.56 \text{ W/K.cm}$  за силиция -  $K_{th}(si) = 1.5 \text{ W/K.cm}$ , също така и по малката диелектрична константа  $\epsilon_r(sic) = 9.7$  за силиция  $\epsilon_r(si)=11.7$  [1]. Тези свойства на силициевият карбид обуславят по високи пробивни напрежения на приборите изготвени на този полупроводников материал, по-добри честотни свойства и по-добри термични свойства спрямо конвенционалните прибори изготвени на силиций. Най-разпространените мощни MOS транзистори използвани като ключови елементи в импулсни захранвания, инвертори за асинхронни мотори, управления на постояннотокови мотори и различни преобразуватели, имат вертикална и клетъчна структура. На фиг .1 е показан разрез на мощен MOS транзистор изготвен

по метода на двойна дифузия с вертикална и клетъчна структура. Съпротивлението във включено състояние на такъв прибор е сума от няколко компоненти, но основните и определящи са показани на фигурата и това са  $R_{ch}$  - съпротивление на канала,  $R_{jfet}$  - съпротивление на паразитният JFET транзистор образуващ се между две съседни клетки и съпротивлението на дрейфовата зона на дрейна (n-)  $R_d$  [2] така че:



Фиг. 1. Структура на MOS транзистор

$$(1) \quad r_{ds(on)} = R_{ch} + R_{jfet} + R_d$$

Съпротивлението на канала при този тип транзистори е много ниско поради малката дължина на канала която е от порядъка на 0.7-0.8  $\mu\text{m}$  и е разликата между дълбочината на двете дифузии. Съпротивлението на паразитният  $R_{jfet}$  зависи от

разстоянието между две съседни клетки, което е въпрос на оптимизация и също може да се минимизира. Съпротивлението на дрейфовата област е най- голямото и зависи от дебелината на n- областта на дрейна, която се прави с по-голяма дебелина, за да се постигне по-високо пробивно напрежение. Или съпротивлението във включено състояние се определя главно от дебелината на n- областта на дрейна, която е зависима от постигането на по-високо пробивно напрежение. Структурата на транзисторите на силиций и на силициев карбид е идентична. Тъй като силициевият карбид има по-висока стойност на електрическата напрегнатост на пробив в сравнение със силиция, дебелината на n-областта за едно и също напрежение на пробив на транзистора при тях ще бъде много по-малка от тази при силициевите. Това значи, че при едно и също пробивно напрежение транзисторите на SIC ще имат по-ниско съпротивление на дрейфовата област в сравнение с тези на SI, и съответно по-ниско съпротивление във включено състояние  $R_{ds(on)}$ . Това носи редица предимства на SIC MOSFET в сравнение с тези на SI. Електрическата мощност която се отделя в транзистора е:

$$(2) \quad P_e = I_d^2 \times R_{ds(n)},$$

където  $I_d$  е номиналният ток на транзистара,  $R_{d(on)}$  е съпротивлението във включено състояние [3].

Топлинната мощност отделена при това е:

$$(3) \quad P_t = T/R_{th}.$$

където  $\Delta T$  е температурна разлика,  $R_{th}$  топлинно съпротивление между две точки [3].

Ако вземем температурната разлика между прехода на транзистора и корпуса можем да напишем:

$$(4) \quad P_t = (T_j - T_c)/R_{thjc},$$

където  $T_j$  е температура на прехода,  $T_c$  температура на корпуса,  $R_{thjc}$  е температурното съпротивление между прехода и корпуса [3].

Като приравним електрическата и топлинна мощности получаваме:

$$(5) \quad I_d^2 \times R_{ds(on)} = (T_j - T_c)/R_{thjc},$$

След преобразуване за тока на дрейна получаваме:

$$(6) \quad I_d = [(T_j - T_c)/R_{ds(on)} \cdot R_{thjc}]^{1/2}$$

По-ниското съпротивление във включено състояние на транзисторите на SiC в сравнение с тези на силиций позволява по-голям ток на дрейна и по-малко топлинна мощност отделена от прибора.

По-добрата термична проводимост на силициевият карбид намалява термичното съпротивление между прехода и корпуса което допълнително помага за увеличаването на дрейновият ток.

SiC MOSFET сравнени с тези на Si имат и още едно преимущество - по-голяма скорост на превключване заради по-малкият капацитет на преходите обусловен от по-малката диелектрична проницаемост на силициевият карбид [1]. По-малките времена на превключване допълнително намаляват загубите в транзисторите в ключов режим[4].

В долната таблица 1, е направено сравнение на параметрите на два прибора с еднакво пробивно напрежение и приблизително еднакъв ток, произведени по технология SiC MOSFET [5] и Si MOSFET[6]

Таблица 1

Параметър	SI MOSFET [6]	SiC MOSFET [5]	Величина
V <sub>dsmax</sub>	900	900	V
I <sub>dmax</sub>	36	35	A
R <sub>ds(on)</sub>	0.12	0.065	Ω
C <sub>iss</sub>	6800	660	pF
C <sub>oss</sub>	330	60	pF
t <sub>don</sub>	70	35	ns
t <sub>r</sub>	20	11	ns
t <sub>doff</sub>	400	23	ns
t <sub>f</sub>	25	9	ns

Вижда се почти два пъти по-ниското съпротивление във включено състояние на транзистора на SIC. Ciss и Coss, много по-малките времена на превключване на преден и заден фронт, което го прави енергийно по-ефективен от този на силиций.

В таблица 2 е направено сравнение на параметрите на други два прибора на силиций и на силициев карбид, като този на силициев карбид е по високоволтов и за малко по-голям ток на дрейна.

Вижда се че транзистора на силициев карбид превъзхожда не само по напрежение и ток този на силиций, но и по параметрите отговорни за скоростта на превключване - време на включване и време на изключване, входен и изходен капацитет.

Сравнението е относително, тъй като приборите са за различно напрежение и ток, но все пак е показателно за свойствата на двата типа материал използвани за изготвянето им.

Параметър	Таблица2		
	SI MOSFET [6]	SIC MOSFET [5]	Величина
Vdsmax	1000	1200	V
Idmax	52	90	A
Rds(on)	125	25	$\Omega$
Ciss	6725	2788	pF
Coss	1620	220	pF
tdon	34	14	ns
tr	13	32	ns
tdoff	107	29	ns
tf	9	28	ns

По-малките загуби в транзисторите на силициев карбид също така водят до по-ниска температура на загряване при работа, което позволява по-малки размери на охлаждащият радиатор за една и съща работна мощност, или по-малко тегло и по-голяма компактност на устройствата реализирани с тях.

В [6] е показан 40KVA SIC MOSFET инвертор с размерите на корица на списание - 300x370x100mm. Очевидно устройствата които са създадени и тепърва ще се създават на базата на прибори от SIC ще бъдат по-мощни, по-високоволтови и по-енергоефективни.

#### **Изводи:**

- Транзисторите на силициев карбид сравнени с класическите силициеви имат по-ниското съпротивление във включено състояние което позволява по-голям ток на дрейна и по-малка топлинна мощност отделена от прибора.

- SIC в сравнение с SI имат много по-малки времена на включване и изключване, т.е. те са по-бързи и по-енергоефективни;

- По-малките загуби в транзисторите на силициев карбид означава по-ниска температура на загряване при работа, по-малки размери на охлаждащият радиатор за една и съща работна мощност, или по-малко тегло и по-голяма компактност на устройствата реализирани с тях.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Kazimierczuk Marian K. Pulse-width modulated DC-DC Power converters, second edition, 2016 John Wiley & sons, Ltd
- [2] Barkhordarian Vrej, Power MOSFET basics, International Rectifier, El Segundo, Ca
- [3] Вачков П., Д. Иванов Мощни MOS транзистори, Техника, София 1990
- [4] Hazra Samir, Ankan De, Lin Cheng, John Palmour, Marcelo Shupbach, Bred Hull, Scott Allen, Subhashish Bhattacharya, High Switching Performans of 1700V, 50A SiC Power MOSFET over Si IGBT/BiMOSFET for Advenced Power Conversion Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, july 2016.
- [5] CREE E3M0065090D Silicon Carbide Power MOSFET E-series Automotive
- [6] Infineon IPW90R120C3 CoolMOS Power Transistor
- [6] Rabkowski Jacek, Dimosthenis Peftitsis, Hans-Peter Nee, Silicon Carbide Power Transistors, IEEE Industrial Electronics Magazine, june 2012

## **ANALYSIS OF TECHNICAL PARAMETERS AND CHOICE OF TRACTION MOTOR TYPE FOR ELECTROMOBILES**

**Yaroslav Stefanov, Ivan Milenov**

[nibelung.2007@abv.bg](mailto:nibelung.2007@abv.bg), [milenov55@abv.bg](mailto:milenov55@abv.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 1574, 158 Geo Milev str.  
BULGARIA*

**Key words:** *transistors, MOSFET, ,SIC, SI*

**Abstract:** *In this article we examined and compared the parameters of the relatively new MOSFET transistors made on the basis of silicon carbide (SIC) and the conventional MOSFET made of silicon (SI). An evaluation of the properties of the new silicon carbide devices is made, and their advantages in different applications. As a result of the larger energy bandgap of the SIC compared to SI and the lower on resistance of SIC MOSFET, they have a number of advantages over these made on silicon- for example higher breakdown voltage, less power loss in switching mode and lower working junction temperature. The latter means that SIC MOSFET,s will need a smoller area of heat sincat the same load power, which implies more compactness of the units and also less weight. Various applications of the SIC MOSFET are mentioned*