

Výkonové polovodičové súčiastky na báze SiC

SiC Semiconductor Power Devices

Marek Pástor

marek.pastor@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice

Abstrakt—Článok sa zaoberá prehľadom výkonových polovodičových súčiastok na báze karbidu kremíka. Je zameraný na komerčne dostupné diskkrétne súčiastky a ich vlastnosti. V článku sú spomenuté základné vlastnosti a aktuálne parametre nasledovných súčiastok: SiC Schottkyho dióda, SiC tranzistor JFET, SiC tranzistor MOSFET a SiC bipolárny tranzistor.

Príučové slová—dióda, karbid kremíka, tranzistor, výkonové polovodičové súčiastky

Abstract—The paper presents an overview in SiC semiconductor power devices. It is focused on commercially available devices and their properties. Basic features and current parameters of following devices are mentioned in the paper: SiC Schottky diode, SiC JFET, SiC MOSFET and SiC BJT.

Keywords—diode, silicon carbide, semiconductor power devices, transistor

I. ÚVOD

Prvé plnoriadené výkonové polovodičové súčiastky sa začali používať v polovici 70. rokov minulého storočia. Patrili medzi ne GTO tyristory, tranzistory MOSFET a približne o dekádu neskôr sa objavili aj tranzistory IGBT. Rozvoj polovodičových súčiastok bol spojený z rozvojom mikropočesov a polovodičovej techniky ako takej. Základným materiálom pre výrobu polovodičových súčiastok je od tej doby polokov kremík spracovaný do kryštalickej formy s veľmi vysokou čistotou. Samotné polovodičové čipy sa vyrábajú z tenkých plátov nazývaných vafre. Počas tridsiatich rokov vývoja v oblasti produkcie kryštalickeho kremíka sa priemer vafrov zväčšil približne 12-násobne [1]. Polovodičové častky sa v súčasnosti vyrábajú z vafrov s hrúbkou menšou ako 1 mm a priemerom 300 mm (11,8 palcov). Výroba vafrov z priemerom 300 mm, ktorá začala v roku 2001, umožnila výrazne znížiť ich cenu. Cena diskkrétnej polovodičovej kremíkovej súčiastky je dnes v priemere 0,05 €, pričom najrýchlejšie rastúcim odberateľom diskkrétnych polovodičových súčiastok (hlavne tranzistorov MOSFET a IGBT) je rozvíjajúci sa automobilový priemysel [2].

Od začiatku používania kremíka pre výrobu polovodičových súčiastok boli známe jeho obmedzenia. Kremík má malú šírku zakázaného pásma (1,12 eV) [4]. Z toho vyplýva obmedzenie jeho použitia pri teplotách vyšších ako 300 °C [3]. Toto je však len teoretická hodnota a bežne dostupné diskkrétne polovodičové súčiastky pracujú pri teplotách PN prechodu maximálne 150 °C. PN prechod v polovodiči na báze kremíka má zároveň nízku hodnotu kritickej intenzity elektrického poľa (300 kV/cm) [4]. To sťažuje použitie materiálu pre vysokonapäťové aplikácie pracujúce s napätiami nad 10 kV. Unipolárne

súčiastky majú zároveň vysoký odpor v zapnutom stave (pre MOSFET s napätím v ráde stoviek voltov sú to jednotky Ohmov) a bipolárne súčiastky neumožňujú činnosť pri vysokých spínacích frekvenciách (pre IGBT s napätím s ráde kV sú maximálne spínacie frekvencie na úrovni stoviek Herzov).

V súčasnosti sa pre vyššie uvedené obmedzenia v oblasti výkonovej elektroniky veľmi často skloňuje termín karbid kremíka (SiC), ako materiál umožňujúci odstránenie nedostatkov polovodičov na báze kremíka. Článok uvádza stručný prehľad trendov v oblasti polovodičov na báze SiC a ich súčasných parametrov a možností.

II. KARBID KREMÍKA

A. História

Aj keď sú súčiastky na báze SiC relatívne nové, samotný materiál vznikol v čase nástupu kremíka. Program vysoko-teplotnej elektroniky Národnej vesmírnej agentúry (NASA) vyvíjal polovodiče na báze SiC ešte pred masívnym nástupom kremíka. Motívom bola hlavne odolnosť voči vysokým teplotám, ktoré pri raketových motoroch často prekračujú 600 °C. V roku 1983 získala NASA cenu na vyvinutie procesu výroby tenkých vrstiev SiC pomocou naparovania na kryštály kremíka. Karbid kremíka nemá tekutú fázu (pri žiadnej známej teplote), a tak nie je možné vyrábať jeho kryštály pomocou tavenia. Proces naparovania však vtedy neumožňoval výrobu veľkých kryštálov s vysokou čistotou a preto bola väčšina výskumu v USA na začiatku 70. rokov 20. storočia zastavená. [5]

Komerčná výroba karbidu kremíka pre technické účely začala v roku 1890 vynájdením Achesonovho procesu, ktorý mal pôvodne vytvoriť umelý diamant. Tento spôsob výroby je používaný dodnes na výrobu základného materiálu technickej čistoty, ktorý je následne používaný pri výrobe čistých SiC kryštálov. SiC kryštály s čistotou potrebnou pre výrobu polovodičov sa získavajú pomocou sublimačného Lelyho procesu patentovaného v roku 1955. SiC sublimuje pri teplote 2300 °C a rýchlosť rastu kryštálu SiC je 1 mm/h (Czochralského metóda má rýchlosť niekoľko desiatok mm/h). Prvá LED bola vyrobená pripojením napätia 10 V na SiC kryštál v roku 1907. [6, 7, 8]

B. Vlastnosti SiC

Prírodný karbid kremíka sa dá nájsť len ako nečistoty v diamante a niekoľkých ďalších nerastoch alebo v meteoritoch. Všetok používaný SiC je preto syntetický. Získaný je buď ako materiál pre technické účely (brúsenie, rezanie) pomocou Achesonovho procesu alebo ako materiál s vysokou čistotou pre výrobu polovodičov pomocou Lelyho

procesu. Z mechanického hľadiska je to veľmi tvrdý materiál (9 na Moshovej stupnici) odolávajúci vysokým teplotám a využíva sa v nástrojoch na brúsenie, rezanie, ale aj v brzdových kotúčoch. Z elektrického hľadiska je jeho zaujímavou vlastnosťou šírka zakázaného pásma. Tá má hodnotu 2,96 eV pre SiC polymorfu 6H a až 3,28 eV pre SiC polymorfu 4H [2]. To je temer trikrát viac, ako u kremíka.

C. Výhody SiC vo výkonovej elektronike

Karbid kremíka sa vo výkonovej elektronike využíva v dvoch polymorfoch 4H a 6H. Z týchto polymorfov sa dajú vyrábať veľké kryštály vhodné pre produkciu diskretných súčiastok. SiC patrí spolu s nitridom gália (GaN) do skupiny materiálov s veľkou šírkou zakázaného pásma. Vďaka tomu majú súčiastky na báze SiC nasledovné vlastnosti [8,9]:

- **odolnosť voči vysokým teplotám:** vďaka veľkej šírke zakázaného pásma môžu SiC súčiastky pracovať s teplotou prechodu až 600 °C. To uľahčuje ich chladenie a umožňuje použitie na miestach, kde by Si súčiastky tepelne zlyhali. Napr. umožňujú prejsť od kvapalinového chladenia k chladeniu vzduchom. Teplota okolitého vzduchu môže dosiahnuť aj 100 °C,
- **vysoké prierazné napätie:** (10-krát vyššie ako v prípade kremíka) znamená, že v rovnakom puzdre bude mať SiC súčiastka 10-krát vyššie prierazné napätie alebo pri rovnakom napätí bude 10-krát menšia. To umožňuje výrazne zvýšiť miniaturizáciu súčiastok a zvýšiť dopovanie substrátu,
- **nízky odpor v zapnutom stave:** zmenšením oblasti priestorového náboja pri zachovaní prierazného napätia v porovnaní s kremíkom a vyšším dopovaním niekoľkonásobne klesne odpor v zapnutom stave,
- **vysoká tepelná vodivosť:** SiC má vyššiu tepelnú vodivosť ako Si (porovnateľnú s meďou). To umožňuje prevádzkovať SiC súčiastky s vysokým výkonom, pričom stále sa dá jednoducho zabezpečiť ich chladenie,
- **vysoká spínacia frekvencia:** vďaka vysokej saturenej driftovej rýchlosti a úzkej oblasti priestorového náboja je možné vytvárať polovodič s krátkou dobou životnosti minoritných nábojov, čo zlepšuje dynamické vlastnosti súčiastok pri vypínaní,
- **vysoká prúdová hustota:** prúdová hustota SiC súčiastok je až trojnásobná v porovnaní s Si súčiastkami. To umožňuje vyrábať menšie čipy a tým znížiť náklady.

Avšak SiC má aj nedostatky. Medzi tie hlavné patrí problém s dosiahnutím nízkeho počtu porúch v kryštalickej mriežke a malý priemer vafrov. Vysoký počet porúch v kryštalickej mriežke (hlavne čiarových) obmedzuje použitie súčiastok pre vysoké prúdy. Pre výrobu Schottkyho diód je postačujúce mať vafer s $10^4/\text{cm}^2$ čiarových porúch, avšak pre MOSFET je potrebné znížiť počet porúch na $200/\text{cm}^2$. Priemer vafra priamo ovplyvňuje cenu vyrobených diskretných súčiastok. Pre nevyhnutné zníženie ceny na konkurencie schopnú úroveň musí mať SiC vafer priemer aspoň 15,24 cm (6 palcov). S nárastom priemeru vafra však narastá aj počet porúch kryštalickej mriežky. [10] Detailná analýza výrobných nákladov SiC vafrov je uvedená v [11].

Kvôli týmto nedostatkom SiC súčiastky nikdy úplne nenahradia kremíkové súčiastky. Podobne ako elektronická

TABUĽKA I POROVNANIE CHARAKTERISTÍK SI A SIC

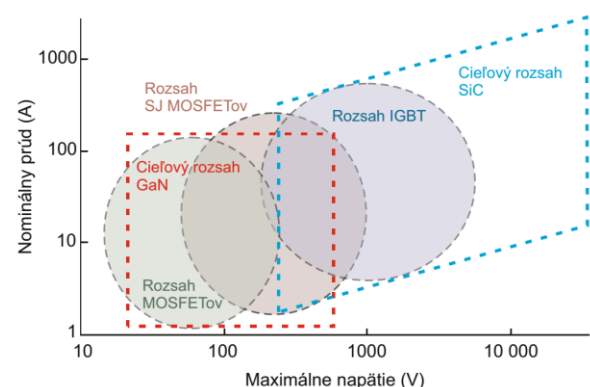
Parameter	Si	4H SiC	6H SiC
Šírka zakázaného pásma E_g (eV)	1,12	3,28	2,96
Kritická intenzita poľa E_c (kV/cm)	290	2500	3200
Pohyblivosť elektrónov μ_n (cm^2/Vs)	1200	800	370
Tepelná vodivosť λ (W/cmK)	1,5	3,8	3,8
Saturovaná driftová rýchlosť elektrónov v_{sat} (cm/s)	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Maximálna teplota prechodu θ (°C)	150	600	600

komunikácia nenahradila papier. SiC súčiastky budú len dopĺňať kremíkové súčiastky pre špecifické aplikácie, kde ich vyššia cena bude kompenzovaná ich značnými výhodami. Navyše z dôvodu vysokého počtu porúch kryštalickej mriežky pravdepodobne nikdy nebudú existovať SiC integrované obvody a mikroprocesory [8].

III. KOMERČNE DOSTUPNÉ DISKRÉTNÉ SIC SÚČIASTKY

Článok sa zameriava na prehľad v oblasti komerčne dostupných SiC súčiastok. V súčasnosti sa vyrábajú SiC Schottkyho diódy, tranzistory JFET (Junction Field Effect Transistor), BJT (Bipolar Junction Transistor) a MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistor) a výkonové integrované moduly vytvorené ich kombináciou. Medzi známymi výrobcami SiC súčiastok patria firmy Infineon[12], IXYS [13], Wolfspeed (CREE) [14], GeneSiC Semiconductor [15], ROHM Semiconductor [16], On Semiconductor [17], STMicroelectronics [18] a UnitedSiC [19].

Porovnanie pracovného rozsahu súčiastok na báze SiC a GaN je na Obr. 1. Zatiaľ čo súčiastky na báze GaN majú nahradiť Si tranzistory MOSFET a IGBT v náročných nízkonapäťových aplikáciách, tak súčiastky na báze SiC majú rozšíriť oblasť použitia diskretných polovodičových súčiastok do oblasti > 10 kV a > 1 kA. Dnes komerčne dostupné SiC súčiastky však majú parametre na úrovni 1 kV a desiatok A. Ani ich pracovná teplota nie je bežne vyššia ako 175 °C. Bežne dostupné SiC súčiastky sú dnes zaujímavé hlavne kvôli nízkemu odporu v zapnutom stave (pri napätí 1200 V má R_{ON} hodnotu desiatky m Ω), minimálnym spínacím stratám aj pri vysokom napätí (bežne existujú 1200 V SiC Schottkyho diódy) a možnosti pracovať na vysokých frekvenciách (spínacie časy 1200 V SiC tranzistora sú desiatky ns).



Obr. 1. Pracovný rozsah napätí a prúdov súčiastok na báze GaN a SiC [10]

A. SiC Schottkyho diódy

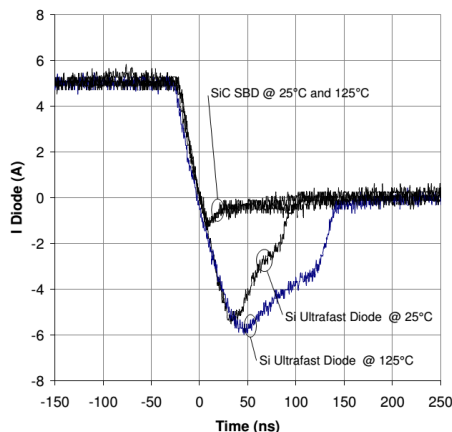
SiC Schottkyho diódy boli prvými diskretnými SiC súčiastkami, ktoré sa začali komerčne vyrábať [9,10]. Ich výrobu začal nemecký Infineon v roku 2001, krátko na to nasledovaný firmami STMicroelectronics a Cree [10]. V roku 2010 už vyrábal SiC Schottkyho diódy temer každý výrobca polovodičových súčiastok a ich parametre boli bežne 600 V a 10 A.

Schottkyho dióda je súčiastka pracujúca s majoritnými nosičmi náboja, ktorá má jeden Schottkyho a jeden ohmický kontakt. Pri vypínaní diódy tak nie je potrebné odstrániť minoritné nosiče náboja z n vrstvy PN prechodu, ako je tomu u Si diód. Vďaka tomu SiC dióda nemá záverné zotavenie. Jej vypínacie straty sú tvorené len prúdom nabíjajúcim kapacitu prechodu Q_C , ktorá je výrazne menšia ako náboj záverného zotavenia Q_{rr} u Si diód, čo je veľmi výhodná vlastnosť pre vysokonapäťové aplikácie. SiC technológia umožnila rozšíriť prierné napätie Schottkyho diód z hodnoty 200 V u Si verzie nad 1000 V u SiC verzie [9]. Nevýhodou SiC Schottkyho diódy je vysoké priepustné napätie, ktoré má hodnotu 1 – 2 V, čo je viac, ako v prípade Si diódy [9, 16]. Vo všeobecnosti má zníženie priepustného napätia diódy za následok zvýšenie prúdu v závernom smere [10]. Preto sú SiC diódy vhodné hlavne pre vysokonapäťové aplikácie.

Výhodou SiC diód je ich vysoká dynamika. Na Obr. 2 je znázornený priebeh prúdu Si a SiC diód pri ich vypínaní. Ako je vidieť, tak SiC dióda prakticky nemá záverné zotavenie. Navyše je čas záverného zotavenia t_{rr} u Si diód závislý od teploty a tak s rastúcou teplotou rastú aj vypínacie straty diódy, čo ju ešte viac zohrieva. SiC diódy majú výbornú tepelnú stabilitu a ich čas záverného zotavenia je prakticky nezávislý od teploty [16, 20]. Zároveň aj priepustná charakteristika SiC diódy je teplotne stabilnejšia ako v prípade Si diódy a má kladný teplotný súčiniteľ (na rozdiel od Si diódy). To umožňuje jednoduchšiu paralelnú spoluprácu SiC diód a odstránenie ich nedostatku v podobe nízkeho prúdového zaťaženia.

SiC Schottkyho diódy sa používajú buď ako diskretné usmerňovacie diódy alebo integrované do puzdra IGBT tranzistorov ako antiparalelné diódy.

Porovnanie parametrov Si a SiC diód je uvedené v tabuľke II. Kremíková dióda DSEP60-12AR je ultra-rýchla dióda s mäkkým zotavením typu HiPerFRED. SiC dióda je ultra-rýchla Schottkyho dióda DCG130X1200NA. Obe diódy sú od americkej firmy Ixys a majú parametre 1200 V/60 A. SiC dióda je dvojitá (2x60 A).



Obr. 2. Porovnanie záverného zotavenia ultrarýchlej Si diódy a SiC Schottkyho diódy [20]

TABUĽKA II POROVNANIE TYPICKÝCH HODNÔT SI A SiC DIÓD (1200 V/60 A)

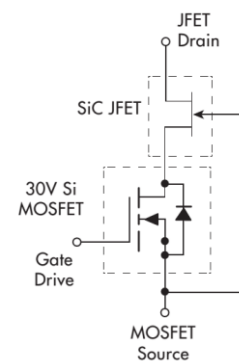
Parameter	DSEP60-12AR	DCG130X1200NA
Priepustné napätie U_F	1,75 V ($I_F = 60$ A, $T_J = 150$ °C)	2,3 V ($I_F = 60$ A, $T_J = 175$ °C)
Prúd v závernom smere I_R	2,5 mA (150 °C)	0,48 mA (175 °C)
Náboj spätného zotavenia Q_{rr}	5800 nC ($I_F = 60$ A, $T_J = 100$ °C, $U_R = 600$ V, $di_F/dt = 800$ A/ μ s)	300 nC* ($I_F = 60$ A, $T_J = 25$ °C, $U_R = 800$ V, $di_F/dt = 800$ A/ μ s)
Cena za kus	5 €	130 €

* SiC dióda má len kapacitný náboj prechodu Q_C

B. SiC tranzistor JFET

SiC JFET bol uvedený na trh skôr ako ostatné riadené SiC súčiastky. Dôvodom je jeho jednoduchšia výroba a nevyskytujúci sa problém s oxidovou vrstvou ako u tranzistora MOSFET. Jeho nevýhodou je to, že je to normálne zapnutá súčiastka. Pre jeho vypnutie je potrebné použiť záporné hradlové napätie približne -15 V. Naopak aplikovanie kladného napätia na hradlo znižujú jeho odpor v zapnutom stave. Existuje aj normálne vypnutý SiC tranzistor JFET, ale ten má väčší odpor v zapnutom stave [9].

Keďže je tranzistor JFET normálne zapnutý, dá sa využiť buď ako nadprúdová ochrana [21], alebo zapojený v kaskáde s nízkonapäťovým tranzistorom MOSFET [9]. Odpor kanálu $R_{DS(on)}$ nízkonapäťového MOSFETU je v ráde jednotiek m Ω a neovplyvňuje tak odpor kanálu tranzistora JFET. Nevýhodou tohto zapojenia je použitie dvoch diskretných súčiastok. Výhodou je jednoduché riadenie kaskády pomocou tranzistora MOSFET a bežného budiča pre IGBT a MOSFET tranzistory.



Obr. 3. Kaskádové zapojenie SiC tranzistora JFET a nízkonapäťového Si tranzistora MOSFET [9]

Nevýhodou kaskádového zapojenia odstránila firma United-SiC vytvorením SiC tranzistora JFET s integrovaným tranzistorom MOSFET v jednom púzdre. Toto riešenie umožňuje priamo nahradiť Si tranzistor MOSFET SiC JFET kaskádou bez potreby meniť budič. Firma uvádza, že je jediná, ktorá ponúka takéto riešenie. Tranzistor UJ3C120040K3S má parametre 1200 V/47 A pri 100 °C a odpor kanálu len 50 m Ω . [19]

C. SiC tranzistor MOSFET

Komerčná výroba SiC tranzistora MOSFET začala neskôr ako SiC tranzistora JFET z dôvodu problémov s nestabilitou prahového napätia tranzistora, ktoré bolo ovplyvnené nízkou kvalitou spojenia oxidovej a polovodičovej vrstvy [9]. Dnes už na trhu existuje tretia generácia SiC tranzistorov MOSFET. SiC MOSFET je normálne vypnutá súčiastka, ktorá nevyžaduje trvalý hradlový prúd pre zotrvanie v zapnutom stave. Dôvodom

relatívne malej ponuky SiC tranzistorov MOSFET je prudký rozvoj kremíkových tranzistorov MOSFET, ktoré na rozdiel od kremíkových diód ešte stále majú potenciál pre zlepšovanie. Napr. americký obchod Mouser Electronics Inc. má v ponuke vyše 13 000 kremíkových tranzistorov MOSFET s N kanálom, ale len 94 SiC tranzistorov MOSFET a 15 GaN tranzistorov MOSFET [22]. SiC tranzistory MOSFET sa objavili na trhu okolo rokov 2010 (ROHM) a 2011 (Cree) [10].

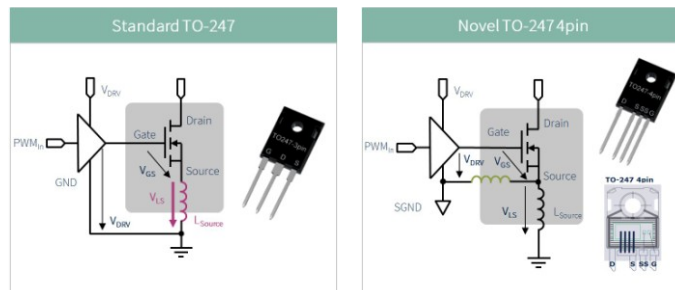
Nevýhodou SiC tranzistorov MOSFET sú iné požiadavky na budič, než v prípade Si tranzistorov MOSFET. Kremíkový tranzistor MOSFET je plne otvorený pri hradlovom napätí 10 – 12 V. Avšak SiC tranzistor MOSFET potrebuje pre plné otvorenie hradlove napätie až 20 V. Je to spôsobené tým, že SiC tranzistor nemá jasne definovaný prechod z lineárnej oblasti do oblasti saturácie. Správa sa skôr ako napätím riadený rezistor a má nízku transkonduktanciu. Pre bezpečné vypnutie SiC tranzistora je odporúčané použiť záporné hradlové napätie -5 V, pretože jeho prahové napätie má nižšiu hodnotu [9].

V tabuľke III sú porovnané parametre kremíkového Polar HiPerFET tranzistora MOSFET IXFN32N120P od firmy Ixys a SiC C2M tranzistora MOSFET od firmy Wolfspeed (Cree). Oba tranzistory majú maximálne napätie 1200 V.

TABUĽKA III POROVNANIE TYPICKÝCH HODNÔT SI A SiC MOSFETOV (1200 V) [13,14]

Parameter	IXFN32N120P	C2M0025120D
Trvalý prúd kanálu I_D	27 A ($T_C = 75^\circ\text{C}$)	75 A ($T_C = 70^\circ\text{C}$)
Odpor kanálu $R_{DS(on)}$	774 m Ω ($I_D = 40\text{ A}, T_J = 125^\circ\text{C}$)	47 m Ω ($I_D = 40\text{ A}, T_J = 150^\circ\text{C}$)
Celkový čas zapnutia t_{ON}	132 ns ($I_D = 16\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 600\text{ V}, U_{GS} = 10\text{ V}$)	46 ns ($I_D = 50\text{ A}, T_C = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 800\text{ V}, U_{GS} = -5/20\text{ V}$)
Celkový čas vypnutia t_{OFF}	146 ns ($I_D = 16\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 600\text{ V}, U_{GS} = 10\text{ V}$)	57 ns ($I_D = 50\text{ A}, T_C = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 800\text{ V}, U_{GS} = -5/20\text{ V}$)
Napätie spätnéj diódy v priepustnom smere U_{SD}	1,5 V ($U_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 25^\circ\text{C}$)	3,1 V ($U_{GS} = -5\text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$)
Čas spätného zotavenia spätnéj diódy t_{rr}	300 ns ($I_D = 20\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, 100\text{ V}, di_D/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$)	45 ns ($I_D = 50\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, 800\text{ V}, di_D/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}$)
Náboj spätného zotavenia spätnéj diódy Q_{rr}	1900 nC ($I_D = 20\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 100\text{ V}, di_D/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$)	406 nC ($I_D = 50\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 800\text{ V}, di_D/dt = 1000\text{ A}/\mu\text{s}$)
Celkový náboj hradla Q_g	360 nC ($I_D = 16\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 600\text{ V}, U_{GS} = 10\text{ V}$)	161 nC ($I_D = 50\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}, U_{DS} = 800\text{ V}, U_{GS} = -5/20\text{ V}$)
Figure of merit ($R_{DS(on)} * Q_g$)	278,6 ΩnC	7,6 ΩnC
Cena za kus	45 €	60 €

Z porovnania je zjavné, že Si a SiC tranzistor sa od seba líšia vo viacerých podstatných parametroch. SiC tranzistor má vyše 16-krát menší odpor kanálu $R_{DS(on)}$, čo výrazne znižuje vodivostné straty a uľahčuje chladenie tranzistora. SiC tranzistor má ja lepšie dynamické vlastnosti. Jeho spínacie časy sú 3-krát kratšie a má polovičný náboj hradla. Tieto vlastnosti sú zosumarizované parametrom „Figure of merit“, ktorý má 36-krát menšiu hodnotu v prípade SiC tranzistora.



a) puzdro TO-247 s 3 vývodmi

b) puzdro TO-247 so 4 vývodmi eliminujúce vplyv parazitnej indukčnosti v emitore tranzistora

Obr. 4. Porovnanie puzdier To-247 a TO-247-4 [23]

SiC tranzistor má však aj zrejme nevýhody. Má nízku transkonduktanciu a jeho hradlové napätie sa mení z hodnoty -5 V na hodnotu 20 V. Pre zabezpečenie rýchleho zopnutia tranzistora je potrebné použiť rýchly budič, inak sa stratí jeho výhoda krátkych spínacích časov. Táto nevýhoda je čiastočne kompenzovaná menším nábojom hradla a nižším prahovým napätím. Strmý pokles kolektorového prúdu spolu s nízkou transkonduktanciou môže cez parazitné indukčnosti ľahko ovplyvniť hradlové napätie SiC tranzistora. Budič tak musí byť umiestnený čo najbližšie k hradlu a s minimálnou parazitnou indukčnosťou. SiC tranzistory majú často puzdro so štyrmi vývodmi a emitor tranzistora je zdvojený. To umožňuje pripojenie izolovaného budiča cez Kelvinove pripojenie, čím sa minimalizuje vplyv parazitnej indukčnosti v emitore tranzistora. Druhou nevýhodou SiC tranzistora je jeho antiparalelná dióda. Tá je typu PN a má zanedbateľné spätné zotavenie aj pri veľkých strmostiach poklesu prúdu, ale má dvojnásobné priepustné napätie. Preto nie je vhodná pre použitie ako spätná dióda a k tranzistoru SiC sa musí pripojiť externá Schottkyho SiC dióda.

D. Bipolárny SiC tranzistor (SCJ)

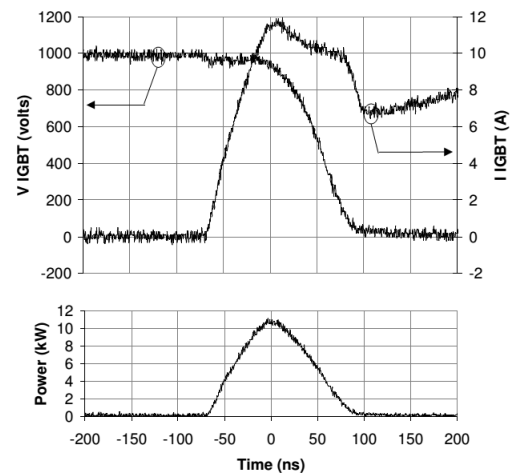
Kremíkové bipolárne tranzistory boli vo výkonovej elektronike nahradené pred vyše 30 rokmi tranzistorami typu MOSFET a IGBT. Rozvoj SiC im však ponúkol príležitosť vrátiť sa späť ako SCJ (Silicon Carbide Junction) tranzistory. SCJ tranzistory sú normálne vypnuté súčiastky riadené prúdom. Majú nízke saturačné napätie, zvládajú vysoké pracovné napätia a spínacie frekvencie. Ich výhodou v porovnaní s SiC tranzistorami MOSFET je absencia oxidovej vrstvy a možnosť použitia bežného budiča pre kremíkové tranzistory MOSFET a IGBT. SCJ tranzistory boli uvedené na trh firmou Fairchild Semiconductor. Prúdový zosilňovací činiteľ bežne dostupných tranzistorov sa pohybuje okolo 50 – 70 pri teplote 125 °C [9]. Laboratorne prototypy SCJ tranzistorov dosahujú zosilnenie 145 – 200 pri izbovej teplote [10].

Budiace napätie SCJ tranzistora je bežne 15 V bez potreby záporného napätia pre udržanie vypnutého stavu. Prahové napätie tranzistorov je bežne okolo 3 V. Dajú sa teda budiť bežne dostupnými budičmi, čo je ich veľká výhoda [24].

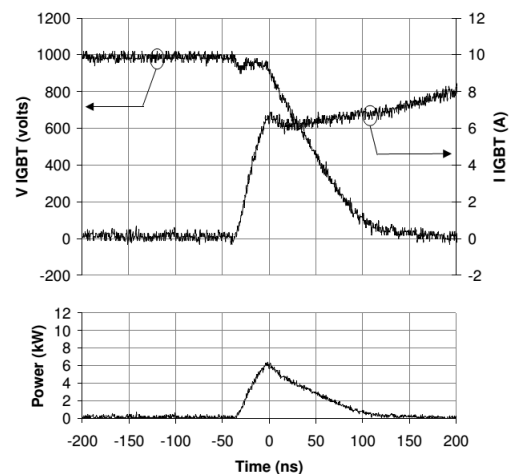
TABUĽKA IV ZÁKLADNÉ PARAMETRE SiC SCJ TRANZISTORA [25]

Parameter	GA50JT12-247
Trvalý prúd kanálu I_D	50 A ($T_C = 145^\circ\text{C}$)
Maximálne kolektorové napätie U_{DS}	1200 V

Parameter	GA50JT12-247
Trvalý prúd kanálu I_D	50 A ($T_C = 145\text{ }^\circ\text{C}$)
Maximálne kolektorové napätie U_{DS}	1200 V
Odpor kanálu $R_{DS(on)}$	35 m Ω ($I_D = 50\text{ A}$, $T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$)
Celkový čas zapnutia t_{ON}	50 ns ($I_D = 50\text{ A}$, $T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$, $U_{DS} = 800\text{ V}$)
Celkový čas vypnutia t_{OFF}	60 ns ($I_D = 50\text{ A}$, $T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$, $U_{DS} = 800\text{ V}$)
Prúdový zosilňovací činiteľ h_{FE}	51 ($I_D = 50\text{ A}$, $T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$)
Celkový náboj hradla Q_g	245 nC
Cena za kus	105 €



a) zapnutie 1200 V IGBT s Si PN diódou pri teplote 125 °C



a) zapnutie 1200 V IGBT s SiC Schottkyho diódou pri teplote 125 °C

Obr. 5. Porovnanie puzdiar To-247 a TO-247-4 [20]

zo súčasného objemu. Zníženie požiadaviek na chladenie meniča, zníženie jeho strát a zvýšenie jeho objemového výkonu sú veľmi zaujímavé parametre pre automobilový priemysel, ktorý sa pomaly posúva smerom k elektromobilom.

Integrovanie meniča do motoru pri možnosti prevádzkovania pri vysokých teplotách výrazne zjednoduší návrh. Použitie SiC súčiastok zároveň zníži ako vodivostné, tak aj spínacie straty a tým zníži produkciu tepla. Napr. firma Mitsubishi znížila po prechode na SiC súčiastky straty v meniči o polovicu [10].

B. Železničná doprava

Železničná napájacia sústava pracuje bežne s jednosmernými napätiami 1,5 kV alebo 3 kV. Podobne metro pracuje s jednosmerným napätím 600 – 750 V. Firmy Toshiba a Mitsubishi vyvinuli v roku 2011 moduly s SiC Schottkyho diódami pre napájacie napätia 600/750 V [10]. Takéto moduly sú vhodné pre železničnú dopravu, pretože znižujú celkové straty v porovnaní s Si modulmi o 30 %, generujú menej tepla a v dlhodobom horizonte predstavujú významnú úsporu energie [10]. Zvýšenie spínacej frekvencie umožňuje vyhladenie prúdov asynchrónnych motorov a tým zníženie ich strát.

Pre rýchly prechod medzi spínacími stavmi je potrebné rýchlo nabiť/vybiť vstupnú kapacitu tranzistora vysokým hradlovým prúdom. Avšak vysoká hodnota hradlového prúdu v zapnutom stave znamená vysoké budiace straty. Výhodné je preto použiť dvojúrovňový budič s vyšším napätím (napr. 25 V) pri zapínaní tranzistora a nižším napätím (napr. 5 V) pre udržanie zapnutého stavu [24, 25].

V tabuľke IV sú uvedené základné parametre SCJ tranzistora GA50JT12-247 od firmy GeneSiC. Tranzistor má veľmi dobré parametre, v niektorých smeroch ešte lepšie ako SiC tranzistory MOSFET. SCJ tranzistory však nie sú veľmi rozšírené, a preto má vyššiu cenu ako porovnateľný SiC tranzistor MOSFET.

IV. APLIKÁCIE SiC SÚČIASTOK

Prvou aplikáciou, kde boli použité SiC súčiastky bola klimatizácia firmy Mitsubishi rady MSZ-ZW z roku 2010. Dve jednotky (2,8 a 3,6 kW) boli osadené SiC Schottkyho diódami. To znížilo spotrebu striedača klimatizácie o 15 % a celej jednotky o 2 % bez zvýšenia ceny. Použitie SiC teda nemalo za cieľ výrazné zníženie spotreby, ale malo motivovať priemysel a podporiť súťaživosť, čo je potrebné pre rozvoj SiC segmentu [10].

Množstvo aplikácií je dnes napájaných z jednosmerného napätia (železnice, elektromobily). Pre pohon striedavých motorov s vysokou účinnosťou je tak potrebné použiť striedače. Striedač sa skladá z plnoradených spínačov (tranzistory) a antiparalelných diód zapojených nad sebou. Ak vedie prúd dióda, tak pri zapnutí tranzistora ním okrem prúdu záťaže tečie aj spätný zotavovací prúd diódy. Ten výrazne zvyšuje spínacie straty tranzistora. nahradenie kremíkových PN diód SiC Schottkyho diódami dokáže výrazne znížiť spínacie straty.

Firmy zaoberajúce sa výrobou SiC súčiastok dnes bežne ponúkajú SiC moduly. Tie sú buď plne SiC (napr. MOSFET a Schottkyho dióda) alebo sú kombináciou Si a SiC súčiastok (napr. IGBT a SiC Schottkyho dióda). Príklad spínania hybridného modulu s IGBT a SiC Schottkyho diódou je uvedený na Obr. 5. Pri použití SiC diódy sú zapínacie straty v podstate definované len použitým IGBT tranzistorom a nie spätným zotavením diódy.

A. Elektromobily

Osemnásobné zvýšenie spínacej frekvencie by umožnilo zmenšenie kapacitorov o 20 – 30 % a induktorov o 25 %

Zaujímavou vlastnosťou SiC modulov je umožnenie regeneratívneho brzdenia aj pri vyšších rýchlostiach. Prechod na SiC moduly umožnil zvýšiť maximálnu rýchlosť vlaku, pri ktorej je možné používať rekuperáciu, z 35 km/h na 70 km/h. Pôvodné Si moduly by sa pri tak vysokej rýchlosti tepelne zničili [10].

V. ZÁVER

Súčiastky na báze SiC sa v súčasnej dobe len rozvíjajú. Na trhu sú dostupné približne od roku 2001 (SiC Schottkyho diódy), resp. 2010 (SiC MOSFETy). Dnes rozširujú možnosti súčiastok na báze kremíka skôr v high-end aplikáciách. Ich značnou nevýhodou je vyššia cena, avšak ich lepšie parametre umožňujú úsporu v iných častiach meniča. Použitie vyššej spínacej frekvencie napr. znižuje hodnoty pasívnych prvkov a tým znižuje ich cenu. Aplikovanie SiC súčiastok na správnom mieste tak v konečnom dôsledku môže znamenať úsporu ako výrobných nákladov, tak aj spotrebovanej energie v podobe vyššej účinnosti. Aj keď majú potenciál na výrazné zvýšenie tepelného výkonového namáhania, v súčasnosti sú u komerčných SiC súčiastok bežné parametre napätia okolo 1 kV a prúdy okolo 50 A pri maximálnej teplote prechodu 175 °C. SiC súčiastky tak predstavujú zatiaľ skôr evolúciu ako revolúciu.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla s podporou grantu VEGA 1/0187/18. Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-16-0206. Práca vznikla s podporou grantu FEI-2017-40.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Does size matter? Understanding wafer size, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://anysilicon.com/does-size-matter-understanding-wafer-size/>
- [2] J. Carbone, Expect steady prices for discrete chip tags despite growing demand, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <http://www.electronics-sourcing.com/2017/06/02/steady-prices-for-discrete-chip-tags/>
- [3] Extreme Temperature Electronics, Tutorial – Part 3, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <http://www.extremetemperatureelectronics.com/tutorial3.html>
- [4] J. L. Hudgins, G. S. Simin, E. Santi, M. A. Khan, „An Assessment of Wide Bandgap Semiconductors for Power Devices“, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, 2003
- [5] G. T. Seng, „High-Temperature Electronics“, NASA Aeropropulsion '87, 1987. [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880006415.pdf>
- [6] Silicon Carbide, Wikipedia. [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_carbide
- [7] Z. Ch. Feng, *SiC Power Materials Devices and Applications*, Springer, 2013
- [8] C. M. Zetterling, „Process Technology for Silicon Carbide Devices“, Docent seminar, 2000, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://people.kth.se/~bellman/docs/ZetterlingDocentLecture.pdf>

- [9] H. Choi, „Overview of Silicon Carbide Power Devices“, Fairchild, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.fairchildsemi.co.jp/Assets/zSystem/documents-archive/collateral/technicalArticle/Overview-of-Silicon-Carbide-Power-Devices.pdf>
- [10] NE Handbook series: Power Device – ROHM Power Devices, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: http://www.symmetron.ru/suppliers/rohm/handbook_power_device-e.pdf
- [11] K. Horowitz, T. Remo, S. Reese, „A Manufacturing Cost and Supply Chain Analysis of SiC Power Electronics Applicable to Medium-Voltage Motor Drives“, CEMAC, 2017, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67694.pdf>
- [12] Infineon, Silicon Carbide (SiC), [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/wide-band-gap-semiconductors-sic-gan/silicon-carbide-sic/>
- [13] IXYS (Littelfuse), Silicon Carbide Products, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <http://www.ixyspower.com/>
- [14] Wolfspeed (CREE), Power Products, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.wolfspeed.com/power/products>
- [15] GeneSiC, Commercial Silicon Carbide, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <http://www.genesicsemi.com/commercial-sic/>
- [16] ROHM, SiC Power Devices, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.rohm.com/products/sic-power-devices>
- [17] ON Semiconductor, Power Solutions, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions>
- [18] ST, SiC Devices, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: https://www.st.com/content/st_com/en/products/sic-devices.html
- [19] UnitedSiC, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://unitedsic.com>
- [20] J. Richmond, „Hard-Switched Silicon IGBTs?“, CREE, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: http://www.richardsonrfd.com/resources/RelDocuments/SYS_31/Wif_Hard_Switched.pdf
- [21] J. H. Kim, B. D. Min, J. W. Baek, D. W. Yoo, „Protection Circuit of Normally-on SiC JFET Using an Inrush Current“, *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, Incheon, 2009
- [22] MOUSER, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: www.mouser.sk
- [23] Infineon, To-247 4pin package, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/500v-900v-coolmos-n-channel-power-mosfet/coolmos-latest-packages/to-247-4pin-package/>
- [24] S. Araujo, L. Menez, P. Zacharias, „Resurrecting the BJT“, Fairchild, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: <https://www.fairchildsemi.com/technical-articles/Resurrecting-the-BJT.pdf>
- [25] GeneSiC, GA50JT12-247, katalógový list, [online], [cit: 22.8.2018]. Dostupné na internete: http://www.genesicsemi.com/images/products_sic/sjt/GA05JT12-247.pdf



M. Pástor titul PhD. získal na Technickej univerzite v Košiciach v odbore silnoprúdová elektrotechnika v roku 2014. V súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky so zameraním na výkonovú elektroniku.