

Součástky na bázi SiC

Ing. Tomáš Křeček

VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky,
17. listopadu 15, 708 33 OSTRAVA-PORUBA, tomas.krecek.fe.i@vsb.cz

Abstract:

Substrát karbid křemíku (SiC-Silicon carbid) je relativně dobře známý a byl poprvé komerčně použit pro realizaci prvních, modré světlo emitujících diod (LED). Nyní je používán jako substrát (základní materiál) pro vysoce výkonné LED. Tento materiál však umožňuje zlepšit elektrické vlastnosti diskretních výkonových součástek. Jako příklad lze uvést SiC diody (nejjednodušší polovodičový prvek), které už za pár let budou dostupné a běžné. Tento příspěvek by měl, ve velmi stručné formě, čtenáře seznámit s touto nastupující technologií a s obecnými vlastnostmi diod na bázi SiC.

Další součástky, které budou zmíněny a jejíž elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti se dají vylepšit pomocí SiC substrátu, jsou JFET, SIT a MOSFET transistory.

1. Úvod

Elektronická polovodičová součástka založená na SiC substrátu, byla (vývoj ještě zdaleka není u konce) vyvinuta pro použití do vysokých teplot, velkých výkonů, dynamických aplikací a pro zařízení s vysokou dávkou radiace. Jednoduše do podmínek, ve kterých by tradiční Si (křemíková) součástka nemohla fungovat. Karbid křemíku je velmi odolný proti působení těchto vlivů a tím se od něj očekává výrazné zlepšení různých aplikací a systémů. Toto zlepšení se hlavně týká vysokonapěťových spínačů (vyžadujeme hlavně úsporu energie), obecně v řízení elektrických pohonů, v mikrovlnných radioelektronických systémech, v oblasti komunikace a také senzorů až po vylepšené řízení spalování paliva v motorech letadel či automobilů. Ať tak nebo jinak, velmi důležité je vytvoření vhodného krystalu a s tím řešením souvisejících problémů, které musí být vyřešeny ještě před tím, než začleníme SiC součástku do nějakého systému. Tento příspěvek provede malý průzkum do nedávných pokroků v této oblasti.

Karbid křemíku je už dlouho znám jako perspektivní polovodičový substrát. Dokonce byl považován za slibnější než samotný křemík na počátku polovodičové technologie. Ale v šedesátých letech se našla metoda, která pomohla snížit hustotu defektů (poruch) ve struktuře křemíku. A to definitivně ukončilo možnost existence SiC jako materiálu pro průmyslové zařízení, protože obrovská množství výzkumů byla „odkloněna“ na substrát křemíku. Výroba velkých průměru monokrystalického SiC je dalším úskalím pro přijetí SiC součástek. Hlavním důvodem je finanční náročnost (technologie výroby je velmi složitá a tudíž drahá), a proto jsou momentálně ekonomicky pouze vhodné pro armádní, kosmický a letecký průmysl.

V poslední dekádě nastalo jakési „obrození“ zájmu o SiC technologii. Hlavně v oblasti řešení hustoty poruch v monokrystalickém SiC, přičemž se počet poruch zmenšuje. Nyní celá řada firem (viz níže) má vyvinuté metody pro výrobu monokrystalického SiC.

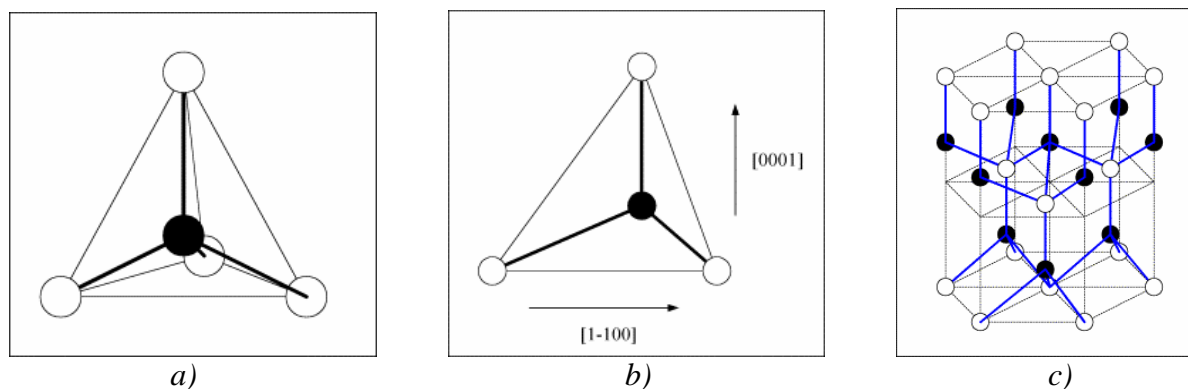
2. Krystalová struktura SiC

Všechny látky se skládají z tzv. elementárních částic (protonů, elektronů a neutronů). Počet a rozmístění těchto částic určuje kvalitativní různorodost atomů. Pevné látky můžeme rozdělit podle vnitřní struktury do dvou základních skupin: a) amorfní látky b) krystalické látky. Atomy nebo ionty krystalických látek se podle povahy atomů a vnějších činitelů (teploty, tlaku atd.) seskupují do větších souvislých celků s určitou pravidelností. Prostorový útvar rozložení atomů v krystalu se nazývá krystalická mřížka. Je možné konstatovat, že vlastnosti polovodiče jsou v podstatě určeny vlastnostmi atomů a tvarem krystalické mřížky. Mezi parametry, které určují povahu látky, patří zejména: počet valenčních elektronů,

hmotnost jader a rozměry základních buněk krystalové mřížky. K těmto veličinám dále náleží druh a počet defektů krystalové mřížky.

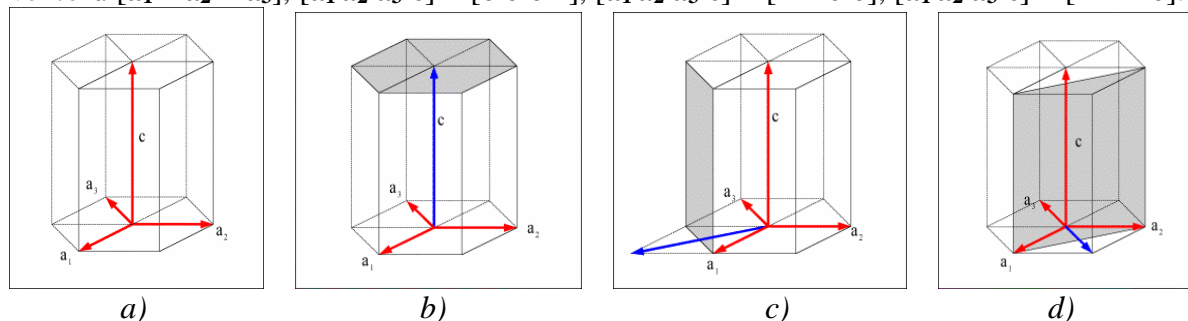
Karbid křemíku se sestává z mnoha různých krystalových struktur, nazývané polytypy viz. *obr.1c*. Polytypy vznikají různými způsoby uspořádání dvojrozměrných strukturních jednotek tj. vrstev. Jednotlivé polytypy téže látky se tak liší svou strukturou a často patří do různých krystalových soustav. Z důvodu odlišného uspořádání atomů křemíku a atomu uhlíku uvnitř krystalické mřížky má každý polytyp SiC jedinečné elektrické a optické vlastnosti. Zatímco existuje přes 170 známých polytypů SiC, jen několik jich je vhodných pro použití v oblasti polovodičů. Nejběžnější polytypy vyvinuté pro elektroniku jsou 3C-SiC, 4H-SiC, 15R-SiC a 6H-SiC. Pozn.: Ramsdelovy symboly (3C, 4H, ...) mají tvar nX . Číslo n udává počet vrstev (viz níže), které tvoří jednu opakující se sekvenci ve struktuře polytypu. Písmeno X označuje krystalovou soustavu, do níž polytyp náleží (C kubickou, H hexagonální, R trigonální s romboedrickou mřížkou).

3C-SiC také označovaný jako β -SiC, je jediná forma SiC s krychlovou krystalickou strukturou. SiC s jinou než krychlovou krystalickou strukturou jsou někdy nazývány α -SiC. 4H-SiC a 6H-SiC jsou dva polytypy s hexagonální krystalovou strukturou. Podobně 15R-SiC je nejběžnější (z mnoha možných) polytypů s klencovou krystalickou strukturou. U polytypů s jinou než kubickou strukturou nejsou elektrické vlastnosti izotropní, to znamená, že některé vlastnosti jsou závislé na směru toku proudu, nebo na směru aplikovaného elektrického pole!



Obr.1 a) Prostorové rozložení atomů v elementární buňce SiC. b) Plošné zobrazení téže buňky (projekce do směru $[1\ 1-2\ 0]$ -vysvětleno níže) c) Polytyp 2H-SiC.

Obr. 1a ukazuje prostorové uspořádání atomů v elementární buňce SiC. Jestliže propojíme všechny čtyři atomy křemíku, vznikne v prostoru čtyřstěn (atom uhlíku je uvnitř vzniklého čtyřstěnu). *Obr. 1b* ukazuje projekci elementární buňky SiC do směru $[1\ 1-2\ 0]$. Na *obr. 1c* vidíme rozložení atomů v polytypu 2H-SiC. Na *obr. 2* je názorně ukázána hexagonální krystalická mřížka spolu s vysvětlením určování směru a ploch. Směr a taktéž plochu udává modrá šipka (je výsledkem vektorového součtu). Zleva: Zobrazení směrových vektorů $[\mathbf{a}_1\ \mathbf{a}_2\ \mathbf{a}_3] = [0\ 0\ 0\ 1]$, $[\mathbf{a}_1\ \mathbf{a}_2\ \mathbf{a}_3\ \mathbf{c}] = [1-1\ 0\ 0]$, $[\mathbf{a}_1\ \mathbf{a}_2\ \mathbf{a}_3\ \mathbf{c}] = [1\ 1-2\ 0]$.

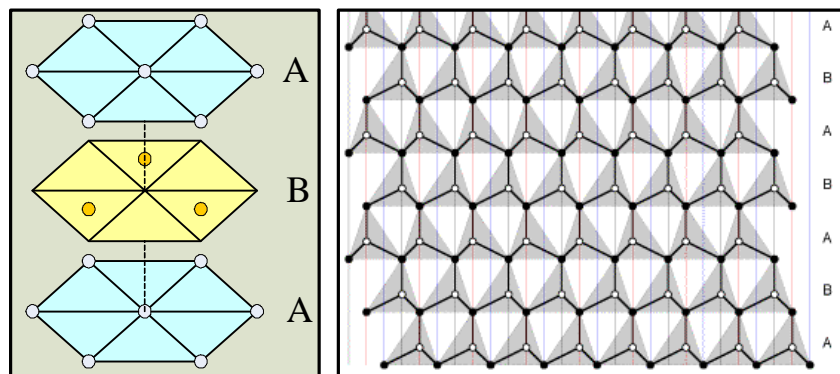


Obr.2 Hexagonální krystalová mřížka s definicí směru a ploch

Podíváme-li se znovu na *obr. 1c*, všimneme si, že tento polytyp lze rozdělit na tři (4, 6, 15 podle typu SiC) dvouvrstvé vrstvy (na dvojrstvy). Toto uspořádání je jedinečné pro každý SiC. Rozkreslení polytypu společně se sekvencí vrstvení monokrystalu SiC, lze vidět na *obr. 3*. Pozn.: pro charakteristiku polytypů se (vedle jiných způsobů) používají tzv. ABC symboly a Ramsdellovy symboly. ABC symbolika je vhodná zejména pro popis polytypů založených na nejtěsnějších smětnáních stejných atomů. Každá jednotlivá vrstva může zaujímat polohu A, B nebo C. Sekvence AA, BB, CC u nejtěsnějších smětnání stejných atomů nejsou možné!

- Atom křemíku Si
- Atom uhlíku C

- Označení různých prostorových rovin



Obr. 3 Rozdělení polytypu na tři dvojrstvy a sekvence vrstvení monokrystalického 2H-SiC

V první části *obr. 3* vidíme rozdělení na tři vrstvy (dvojrstvy). Ve struktuře se opakuje sekvence dvou různě uložených vrstev. Tyto dvojrstvy si lze představit jako plochu složenou z atomů křemíku spojeného s plochou atomů uhlíku. Samozřejmě pro 3C-SiC, 4H-SiC, 15R-SiC a 6H-SiC bude sekvence vrstvení jiná, ale stejně popsána.

Elektrické vlastnosti nejběžnějších polytypů SiC s porovnáním se dvěma dalšími hojně vyskytujícími se materiály ukazuje *tab. 1*. Jak lze vypořádat u materiálu SiC, je většina parametrů výrazně lepší (s výjimkou pohyblivosti elektronů) než u Si, což umožňuje značné zlepšení celkových vlastností substrátu použitého jako polovodič.

Jak už víme, 3C-SiC má jako jediný kubickou krystalovou strukturu (stejně jako Si) a tudíž jeho parametry nejsou závislé na směru mřížky viz *tab. 1*. Lze si, ale povšimnout zhoršené pohyblivosti elektronů v porovnání s Si. Snížením tohoto parametru, se zjednodušeně řečeno, zmenšuje vodivost materiálu. Ta je, ale vykompenzována vodivostí dotující příměsí! V konečném důsledku (jak si ukážeme) je pak materiál SiC, použitý jako polovodič, zatím nepřekonaný.

Parametr	Si	GaAs	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC
Šířka zakázaného pásma [eV]	1,1	1,42	3,2	3	2,3
Relativní dielektrická konstanta	11,9	13,1	9,7	9,7	9,7
Průrazné elektrické pole při $N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [MV·cm ⁻¹]	0,6	0,6	s c-osou: 3	s c-osou: 3,2 ⊥ s c-osou: >1	>1,5
Tepelná vodivost [W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹]	1,5	0,5	3-5	3-5	3-5
Intristická koncentrace nosičů n_i [cm ⁻³]	10 ¹⁰	1,8·10 ⁶	≈10 ⁻⁷	≈10 ⁻⁵	10
Pohyblivost elektronů při $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹]	1200	6500	s c-osou: 800 ⊥ s c-osou: 800	s c-osou: 60 ⊥ s c-osou: 400	780
Pohyblivost děr při $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹]	420	320	115	90	40
Nasyčená elektronová rychlost [10 ⁷ ·cm·s ⁻¹]	1	1,2	2	2	2,5
Přidávané typy donorů	P,As	Si	N,P	N,P	N
Přidávané typy akceptorů	B	Be, Mg, C	Al, B	Al, B	Al
Komerčně vyráběné (rok 2003) pláty [cm]	30	15	8	8	-

Tab.1 Porovnání základních elektrických vlastností Si, GaAs a SiC

3. Elektrické vlastnosti a výhody

Tři základní hlavní parametry, ve kterých převyšují SiC nad Si jsou: tepelná vodivost, velikost průrazného elektrického pole a velká šířka zakázaného pásma energií. Všechny veličiny ukázané v *tab. 1* jsou rozdílně teplotně závislé. Nízká anizotropní pohyblivost elektronů 6H-SiC je hlavním důvodem vyšší popularity 4H-SiC. Široké pásmo zakázaných energií a nízká intrinzická (vlastní) koncentrace nosičů dovoluje pracovat polovodiči ve velmi vysokých teplotách na rozdíl od křemíku. Intrinzická koncentrace nosičů je přímo úměrná N_c a N_v , což jsou hustoty stavů vyskytující se ve vodivostním a valenčním pásmu. Nicméně následkem tepelné roztažnosti mřížky a vazeb fononů (tzv. kvazičástice šířící vibrační kvantum v krystalové mřížce) má tato koncentrace exponenciální průběh na teplotě (stejně jako šířka pásma zakázaných energií). Tedy koncentrace intrinzických nosičů je důležitý parametr polovodiče, protože zbytkový proud v polovodičích je normálně úměrný n_i nebo dokonce n_i^2 . SiC má v daném rozsahu teplot jen zanedbatelné množství koncentrace intrinzických nosičů, takže vodivost je úmyslně ovládána prostřednictvím dotující příměsi.

Jak se teplota zvyšuje, intrinzická koncentrace nosičů se zvyšuje exponenciálně. Zbytkový proud se zvyšuje nepříjemně a až při vysokých teplotách se stane vodivost neovladatelná, protože vlastní nosiče převyšují dotovanou příměs. V závislosti na provedení konkrétní součástce intrinzická koncentrace nosičů křemíku omezuje práci polovodičového přechodu na méně než 300 °C. Mnohem menší intrinzická koncentrace nosičů SiC dovoluje součástce pracovat při extrémních teplotách přechodu (převyšující teoreticky 800 °C), přičemž byla experimentálně ověřena teplota 600°C.

Momentálně je těžké, si představit práci při takovýchto teplotách hlavně z důvodu omezení použitých pouzder. Polymerové pouzdra a nynější způsoby pájení jsou pouze pro „nízké“ teploty. Pouzdra LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) jsou považovány za slibné druhy uložení SiC čipů. Ale pouzdra LTCC mohou drasticky zhoršit manipulační schopnosti v porovnání s nynějšími součástkami. Proto aplikace pro velmi vysoké teploty budou muset vyčkat až do vyvinutí vyhovujících pouzder, které se přirozeně vyvíjí.

Vysoké průrazné elektrické pole a vysoká tepelná vodivost SiC spolu s vysokými pracovními teplotami dovolí polovodiči přenášet extrémně vysoké hustoty energie a výkonu.

Porovnáme-li vysoké průrazné napětí SiC s Si, pak při stejném závěrném napětí bude součástka SiC asi 10x tenčí a 10x více dotována, což je ve finále zhruba 100 násobné snížení rezistence blokující oblasti a s tím 100 násobné zmenšení délky čipu viz *obr. 9b*.

Vysoké průrazné napětí a široká oblast zakázaných energií SiC umožňuje vyrobit extrémně rychlé výkonové součástky. Proto výkonové měniče používající součástky na bázi SiC, mohou pracovat ve vyšších spínacích kmitočtech s vyšší účinností (menší spínací ztráty). Použití vysokých spínacích kmitočtů u měničů je velmi žádoucí, protože dovoluje použití menších kapacit, indukčností a transformátorů, které v konečném důsledku sníží celkovou velikost a hmotnost.

Menší odpor při sepnutém stavu a rychlejší spínací kmitočet SiC pomáhá minimalizovat energetické ztráty, a tím pádem nižší vytváření tepla. Vyšší tepelná vodivost umožňuje účinnější odvod tepla ze součástky. Důležité je si také uvědomit, že vyzařování tepla se značně zvyšuje s rostoucím teplotním rozdílem mezi součástkou a okolím. A tedy čím větší pracovní teplota součástky, tím je účinnější její chlazení. Schopnost součástky (na bázi SiC) pracovat ve vysokých teplotách, dovoluje mnohem účinnější chlazení a tedy menší chladicí systém nebo jeho úplnou eliminaci.

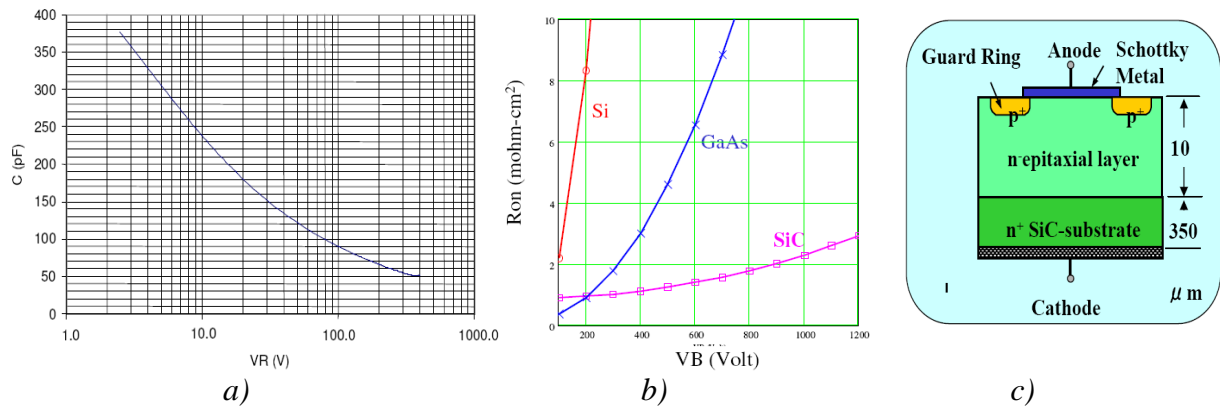
Dotování SiC polovodičů příměsí funguje na stejném principu jako u Si. Elektricky aktivní příměsí nahradí prázdná místa v krystalové mřížce. Dotující prvky jsou uvedeny v *tab. 1*. Kde hliník je nejběžnější pro typ P, protože má nejnižší aktivační hladinu akceptoru (asi 300meV).

4. Schottkyho SiC SBD diody

Tomuto typu diod je věnována větší pozornost z důvodu jejich perspektivy a asi největší dostupnosti (hlavně díky firmám CREE a INFINEON).

SBD na bázi SiC budeme porovnávat s Si PiN (struktura je na *obr. 7a*) diodami, protože SBD na bázi Si není výrobitelná do tak vysokého závěrného napětí!

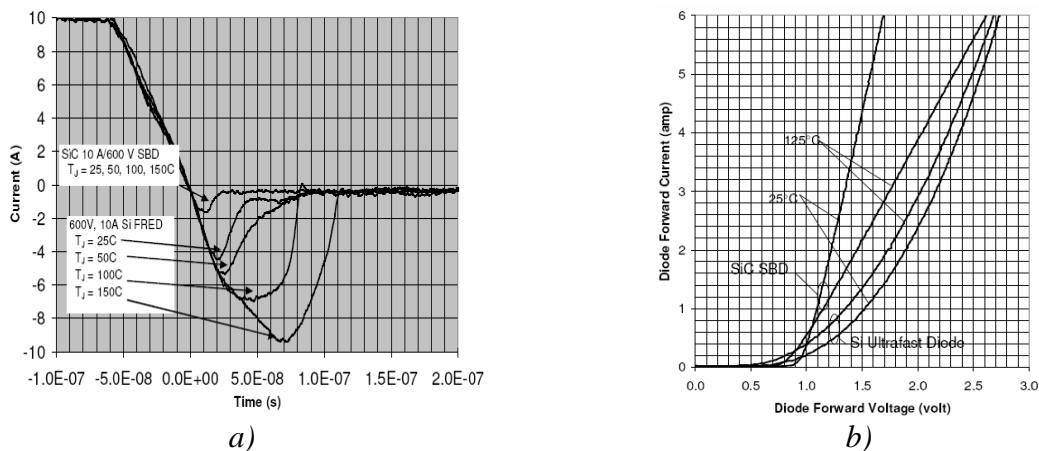
SiC SBD (Schottky barrier diode) jsou momentálně komerčně přístupné v rozsahu 600V-1200 V / 1-30 A. Strukturu řezu přechodu SBD vidíme na *obr. 4c*. Polovodič obsahuje navíc epitaxní vrstvu pro zvýšení závěrného napětí a doplňující ochranný PN přechod. Hlavní výhodou SBD jsou jejich dynamické vlastnosti (obecně dány přechodem kov-polovodič). Zotavovací náboj přechodu je < 20 nC a je následkem kapacity přechodu (*obr. 4a*) a ne následkem hromadění minoritních nosičů v oblasti PN přechodu, jak je běžné u Si PiN diod. Mimo to, na rozdíl od Si diod je tento náboj nezávislý na di_f/dt , I_f a teplotě čipu. Toho všeho lze dosáhnout při maximální pracovní teplotě přechodu SiC SBD 175 °C. Protože vyšší průrazné elektrické pole SiC nám dovolí více dotovat polovodič, má toto za následek větší vodivost v sepnutém stavu. Vodivosti v propustném směru SiC SBD, Si a GaAs diod v závislosti na jmenovitém závěrném napětí diod můžeme vidět na *obr. 4b*.



Obr. 4. a) Kapacita přechodu v závislosti na závěrném napětí. b) porovnání vodivostí v závislosti na jmenovitém závěrném napětí. c) Struktura řezu SBD.

Tyto průběhy dále taky vypovídají o ztrátách v propustném směru.

Jelikož polovodič SiC má širší pásmo zakázaných energií, je napětí potenciálové přehrady větší a to je důsledkem extrémně malého závěrného proudu i při vysokých teplotách. Kapacita přechodu v závislosti na závěrném napětí je vynesena na *obr. 4a*. Při 300 V je vstupní kapacita asi 50 pF, což je srovnatelná hodnota s nízkonapěťovou Si Schottkyho diodou.



Obr. 5. a) Komutace SiC SBD 10 A / 600 V v porovnání s Si FRED 10 A / 600 V. b) charakteristiky v propustném směru SiC SBD a Si FRED.

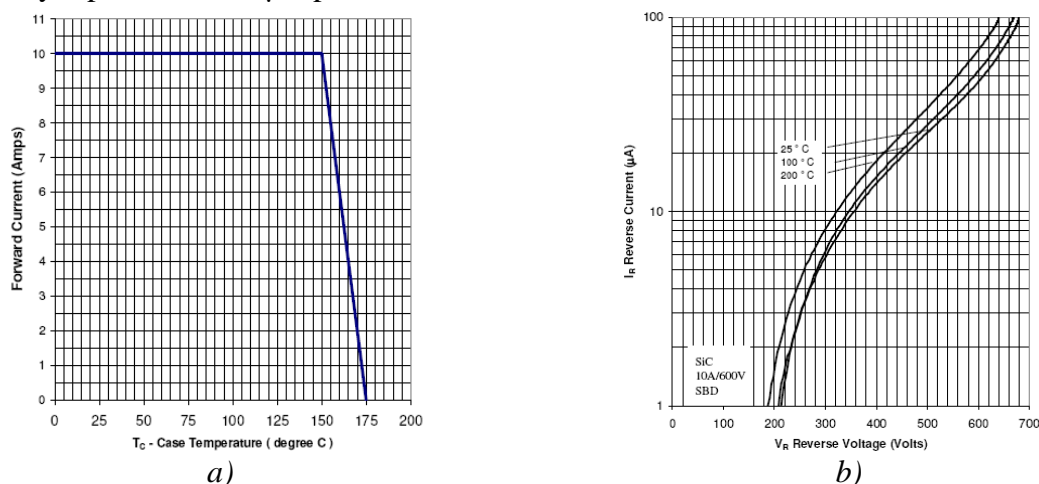
Obr. 5b ukazuje typickou teplotní závislost charakteristik v propustném směru 5 A / 1200 V 4H-SiC SBD a Si FRED (Fast REcovery diode). Odpor v sepnutém stavu se zvětšuje s teplotou z důvodu snížení pohyblivosti elektronů. $U_f \approx 1,6$ V je při jmenovitém proudu a teplotě přechodu 25 °C. Pro teplotu 125 °C pro stejné U_f je jmenovitý proud $\approx 2,4$ A. Tento záporný teplotní koeficient propustného proudu umožňuje paralelní spojení více SiC diod v pouzdře, což se běžně používá. Toto chování od Si diod nelze očekávat.

Obr. 5a názorně ukazuje komutaci SiC SBD 10 A / 600 V a Si FRED 10 A / 600 V při různých teplotách. U SiC SBD nedochází k akumulování náboje minoritních nosičů injektovaných do kvazineutrálních oblastí PN přechodu při změně napětí. U SiC SBD se vedení proudu účastní pouze majoritní nosiče a tedy difúzní kapacita přechodu je mnohem menší. Což má za následek malý akumulovaný náboj a jeho rychlé odvedení při komutaci. Avšak je potřeba, jakýsi vybíjecí proud pro vybití kapacity přechodu (z *obr. 5a* je < 2 A). U SiC SBD je tento vybíjecí proud nezávislý na teplotě, I_f a di/dt na rozdíl od Si diody, u které se tyto parametry s teplotou mění přímo drasticky. Například na *obr. 5a* je Q_{rr} Si FRED přibližně 160 nC při pokojové teplotě a asi 450 nC při 150 °C, zatímco u SiC SBD je tento náboj mnohem menší a nezávislý na okolních vlivech. Toto nadměrné množství Q_{rr} u Si FRED zvyšuje její spínací ztráty. V aplikacích jako jsou spínané zdroje a aplikacích řízení motorů jsou takové ztráty dominantní. Např. firma CREE uvádí, že se spínací ztráty SiC SBD diody zmenší až o 80 %. A v případě použití diody jako nulové, pak sníží také spínací ztráty použitého Si tranzistoru až o 50 %!

Obr. 6a nám v praxi ukazuje důsledek tepelných vlastností substrátu SiC. Při 150 °C by dioda na bázi Si materiálu byla na konci svých možností, kdežto materiál SiC a s ním i dioda má stále vlastnosti jako při 25 °C. Přičemž maximální dovolená teplota přechodu je 175 °C a maximální dovolená teplota pouzdra je 150 °C. SiC substrát je totiž uložen v klasickém pouzdru TO 220.

Obr. 6b je vynesena teplotní závislost závěrného proudu na teplotě 10 A / 600 V SiC SBD. Typická hodnota závěrného proudu je 50 μ A při 25 °C a 70 μ A při 200 °C, což jsou pro výkonové diody zanedbatelné hodnoty. Tyto hodnoty proudu se v literatuře uvádí jako nevýhoda SBD.

Kvalita SiC substrátu byla zlepšována (a stále je) posledních 5 let. Nyní je tedy možné elegantně pokrýt velkou výkonovou oblast čipů. Jako příklad lze uvést SiC SBD 30 A / 600 V. Jak bylo zmíněno výše, paralelním spojením tří čipů lze velmi jednoduše vytvořit (samozřejmě v jednom pouzdře, protože čipy musí mít stejnou teplotu) diodu 80 A / 600 V se závěrným proudem 125 μ A při 25 °C.



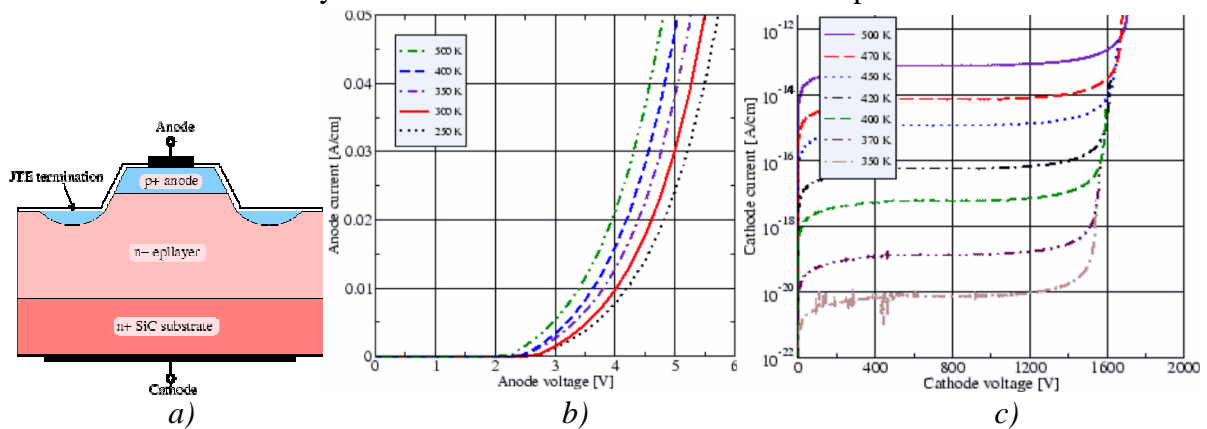
Obr. 6. a) Snížení proudového zatížení pro 10 A/600 V SiC SBD. b) Charakteristika závěrné oblast 10 A/600 V 4H-SiC SBD.

5. SiC diody s PiN (PN) přechodem

Jestliže vyžadujeme větší závěrné napětí, ochuzená vrstva musí být tlustší a méně dotovaná. To vede ke zvětšenému odporu v propustném stavu a snížení maximální hustoty proudu v propustném směru. V bipolárních součástkách jako PiN dioda, BJT, a GTO, injekce minoritních nosičů do ochuzené vrstvy je doprovázena zvýšením hustoty majoritních nosičů k tomu, aby byla udržena nábojová neutralita. Tyto další nosiče náboje zvýší vodivost a tedy odpor při sepnutí je menší. To představuje výhodu PiN SiC diod nad SBD.

Protože má substrát SiC větší šířku zakázaných energií než křemíkový substrát, musí se v závislosti na tomto zvětšit difúzní napětí PN přechodu. Typický úbytek napětí PiN SiC diody je okolo 3V viz *obr. 7b*. Tedy celkový ztrátový výkon diody je určen napětím přechodu a odporem v propustném směru ochuzené vrstvy. Dioda SiC PiN má tedy menší odpor v propustném směru, ale větší úbytek na diodě oproti SiC SBD.

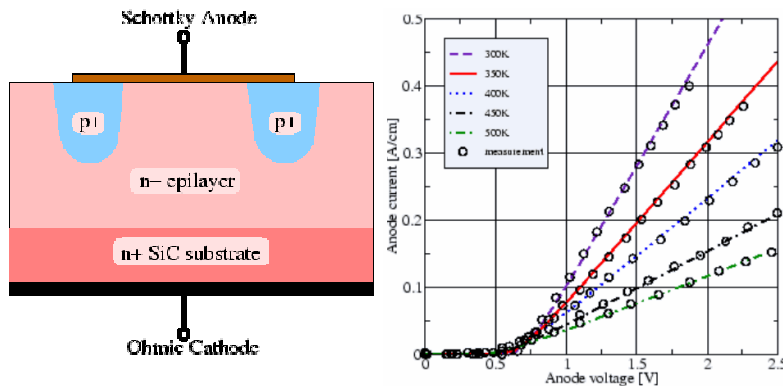
Výhoda menšího odporu v propustném směru je částečně kompenzována vyšším napětím v propustném směru PiN diody ve srovnání s SBD. Jak je závěrné napětí zvětšováno, odpor v tomto směru tvořený odporem ochuzené vrstvy se stává dominantním a dává diodě PiN výhodu nad SBD. *Obr. 7c* ukazuje charakteristické rysy závěrného napětí SiC PiN diody. Tato dioda blokuje 1600 V pro 4H- SiC a mírně vyšší napětí pro 6H- SiC kvůli jeho vyšší průrazné intenzitě elektrického pole. Kladný teplotní součinitel může být pozorovaný v závěrné charakteristice PiN diody. V závěrné oblasti má SiC PiN dioda lepší vlastnosti než SiC SBD.



Obr. 7. a) Struktura PiN diody. b) propustná oblast PiN 6H-SiC diody. c) závěrná oblast

6. MPS diody

MPS (Merged PiN Schottky) slučují výhody SBD a PiN diod. To jest, slučují vynikající dynamické vlastnosti SBD spolu s vyhovující propustnou charakteristikou a vynikajícími vlastnostmi PiN diod v závěrné oblasti. Jak vidíme na *obr. 8*, při přiložení závěrného napětí je aktivní PiN přechod a naopak



Obr.8. Struktura MPS diody a propustný směr MPS diody

při přiložení propustného napětí je aktivní přechod kov-polovodič. Toto je zjednodušený princip MPS diody. Propustná oblast je vidět na *obr. 7c*. Pozn.: tři poslední VA charakteristiky jsou vyneseny také s vlivem (A/cm) délky epitaxní vrstvy konkrétní diody, která je v našem případě rovna 10,5 μm .

7. Aktuální stav SiC součástek

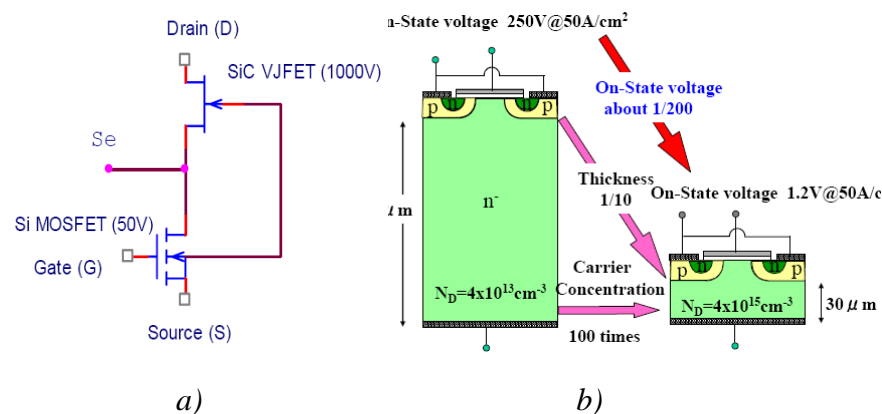
V posledních letech byly SiC součástky dostupné pouze jako prototypy. Jejich spolehlivost v počátku byla mizerná (což se více či méně očekávalo). Se zlepšením kvality monokrystalických plátů SiC nastala drastická změna a součástky začaly být spolehlivější.

Součástky, které jsou vyráběny jako prototypy jsou MOSFET, JFET, SIT, a v poslední době BJT tranzistory. Hlavními hráči v této oblasti jsou: NASA Glenn, Cree, SemiSouth, Northrop Grumman, Rockwell Scientific, GE, Purdue University a SiCED.

Nejčastěji dostupné JFET / SIT (jsou téměř stejné až na rozdíly ve vzdálenostech ve struktuře) jsou klasické součástky, které potřebují záporné napětí na svorce GATE, aby došlo k vypnutí. JFET (MESFET) / SIT byly vyvinuty především pro RF aplikace. S JFET tranzistory souvisí používání kaskádních struktur (schéma je na obr. 9a). Tyto získávají důležitost ve výkonovém polovodičovém průmyslu. Kaskádní spojení obsahuje SiC JFET i klasický Si MOSFET. Taková struktura se používá pro výkonové spínače a v ochranných obvodech. Součástka má 4 vývody. Pomocí pinu (Se) lze SiC JFET jakoby izolovat a charakterizovat odděleně. MOSFET je dimenzovaný na nízké napětí a nízkou teplotu. MOSFET ovládá vysokonapěťový a vysokoteplotní JFET. Pomocí MOSFETu je buzení takovéto součástky velmi snadné. Odpor v sepnutém stavu je nízký kvůli malému odporu driftové oblasti SiC JFET. Hlavní nevýhodou JFET je jejich normální stav, ve kterém jsou sepnuty. A tedy krátká změna napětí v budícím obvodu sepne všechny JFETy ve výkonovém obvodu a ty se mohou zničit nebo zničit své okolí.

MOSFETy na bázi SiC dělíme na: UMOSFET, DMOSFET a MESFET. Kde UMOSFET byl prvním realizovaným SiC MOSFETem. Tento typ trpí několika problémy související s vertikální strukturou tranzistoru. Výhodou je však velmi velké závěrné napětí (až 2000 V).

Obecně tranzistory MOSFET jsou na tom hůře než JFET, protože přestávají být spolehlivé při teplotě přechodu okolo 200 °C. Toto vylučuje MOSFETy z vysokoteplotních aplikací, tedy alespoň do té doby než dojde ke zkvalitnění izolačního oxidu. Dynamicky jsou na tom SiC tranzistory velmi dobře (byl vyroben MESFET s $f_{\max} = 25$ GHz). Další výkonové



součástky jako IGBT, GTO tyristory atd. jsou ve fázi výzkumu a nejsou očekávány na trhu v následujících letech. Většina dostupných součástek jsou ještě příliš drahé a nespolehlivé pro hromadnou výrobu.

Obr. 9. a) schéma kaskádní struktury. b) Srovnání 3000V Si a SiC MOSFETů. Přičemž spínací a vypínací časy SiC se pohybují v desítkách ns a R_{on} může být až $4 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Literatura

- [1] www.cree.com
- [2] www.nasa.gov
- [3] Ayalew, T.: SiC Semiconductor Device Technology, Modeling, and Simulation. In *Diploma thesis*. Wien, Januar 2004.
- [4] Avinash S. Kashyap, B. Tech.: Compact Modeling of Silicon Carbide Junction Field Effect Device. In *Diploma thesis*. Arkansas, May 2005.
- [5] Brandštetter, P.: Elektronika. In *skriptum VŠB-TU*. Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-966-2