

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Moderní polovodičové součástky ve výkonové elektronice

**vedoucí práce: Ing. Pavel DRÁBEK, Ph.D.
autor: Dinh Hung TRUONG**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Dinh Hung TRUONG**
Osobní číslo: **E09N0057P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Moderní polovodičové součástky ve výkonové elektronice**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Provedte rešerši zahraniční literatury zabývající se problematikou SiC prvků.
2. Navrhněte polovodičový měnič (např. pulsní měnič, střídač) pro porovnání vlastností křemíkové a SiC diody.
3. Provedte experimentální měření
4. Diskutujte naměřené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. Určí vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Polovodičové součástky na bázi křemíku (Si) a arsenik galia (GaAs) nejsou vhodné pro použití ve vysokých teplotách, napětích a ve vysokofrekvenčních zařízeních. Velká mechanická pevnost, vysoká tepelná vodivost a široký zakázaný pás jsou vlastnosti, které z SiC dělá vhodného kandidáta pro použití v polovodičové technice.

Klíčová slova

SiC, Karbid křemíku, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiXC, polytypie, epitaxe, ohmický kontakt, Schottkyho kontakt, PN dioda s SiC, Schottkyho dioda s SiC, VJFET s SiC, pulsní měnič

Abstract

Semiconductor devices based on silicon (Si) and gallium arsenic (GaAs) are not suitable for use in high temperature, voltage and high frequency device. Great mechanical strength, high thermal conductivity and wide bandgap are properties of SiC, which makes a good candidate for use in semiconductor technology.

Key words

SiC, Silicon Carbide, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiXC, polytypie, epitaxe, ohmický kontakt, Schottkyho kontakt, PN dioda s SiC, Schottkyho dioda s SiC, VJFET s SiC, pulsní měnič

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2012

Dinh Hung TRUONG

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji všem kolegům Západočeské univerzity v Plzni za předání znalostí během celého studia a své rodině za podporu během mého studia na vysoké škole.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 KARBID KŘEMÍKU	11
1.1 VZNIK A HISTORIE	12
1.2 KRYSTALICKÁ STRUKTURA	14
1.2.1 Poruchy krystalické struktury	15
1.3 VLASTNOSTI	17
1.3.1 Mechanické a chemické vlastnosti	17
1.3.2 Tepelné vlastnosti	17
1.3.3 Elektrické vlastnosti	18
1.4 VÝROBA SiC	19
1.4.1 Růst krystalů	19
1.4.2 Chemical Vapor Deposition (CVD)	20
1.4.3 High Temperature Chemical Vapor Deposition (HTCVD)	21
1.5 KONTAKTY NA SiC SOUČÁSTKÁCH	22
1.5.1 Ohmický kontakt	22
1.5.2 Schottkyho kontakt	23
1.6 KOMERČNÍ POUŽITÍ	23
2 SiC FIELD-EFFECT TRANZISTORY	24
2.1 SiC MOSFET	25
3 MĚNIČE NAPĚTÍ	26
3.1 DC-DC MĚNIČ	26
3.2 NÁVRH „STEP DOWN“ MĚNIČE	29
3.3 ZTRÁTY NA TRANZISTORU A DIODĚ	30
3.3.1 Propustné ztráty	30
3.3.2 Spínací ztráty	31
3.3.3 Spínací energie a ztráty	34
3.3.4 Totální ztrátový výkon	34
3.4 HODNOTY PROUDU A NAPĚTÍ MĚNIČE	35
3.5 VÝPOČET ZTRÁT S POUŽITÍM SiC SOUČÁSTKAMI	36
3.6 VÝPOČET ZTRÁT S POUŽITÍM Si SOUČÁSTKAMI	37
4 ZÁVĚR	40
POUŽITÁ LITERATURA	1

Úvod

Polovodičové součástky na bázi křemíku (Si) a arsenik galia (GaAs) nejsou vhodné pro použití ve vysokých teplotách, napětích a ve vysokofrekvenčních zařízeních. Velká mechanická pevnost, vysoká tepelná vodivost a široký zakázaný pás jsou vlastnosti, které z SiC dělá vhodného kandidáta pro použití v polovodičové technice. I přes velmi úspěšné výzkumy prováděné v prvních letech objevu byl výzkum a rozvoj pro komerční použití z důvodu nízké kvality materiálů a technologických postupů pozastaven. V posledních letech s růstem kvality materiálů a technologií výroby přichází i zájem o polovodičové součástky na bázi SiC.

Potenciálního využití zařízení na bázi karbid křemíku je mnoho, jak ve vojenství tak i v civilní oblasti. U vojenských zařízení jako jsou radary nebo komunikační systémy je možné dosáhnout významného zvýšení spolehlivosti i trvalý vysoký výkon v pásmu X (8-10GHz). Senzory, které pracují při teplotách vyšších než 300 °C, jsou vhodné pro ropný nebo automobilový průmysl. SiC technologie je v dnešní době dostupná pro praktické použití.

Diplomová práce je zaměřena na vlastnosti a použití SiC prvků ve výkonové elektronice. Text je rozdělen do tří částí: první se zabývá vlastnostmi SiC materiálu, v druhé něco málo o FET tranzistorech a v poslední části je návrh polovodičového měniče (snižující pulsní měnič).

Seznam symbolů

P_C [W].....	Propustné ztráty
P_{sw} [W].....	Spínací ztráty
P_b [W].....	Ztráty v závěrném směru
U_{DS} [V].....	Napětí mezi drain a source
R_{DSon} [Ω].....	Rezistivita mezi drain a source
i_D [A].....	Proud tekoucím skrz drain
i_F [A].....	Propustný proud
I_G [A].....	Proud tekoucí skrz gate
E_M [J].....	Ztrátová energie
f_{sw} [Hz].....	Spínací kmitočet
U_o [V].....	Výstupní napětí
I_o [A].....	Výstupní proud
P_o [W].....	Výstupní výkon
D [-].....	Modulační poměr
U_{in} [V].....	Vstupní napětí

1 Karbid křemíku

Karbid křemíku (SiC) byl poprvé syntetizován v 19. století a dodnes je předmětem výzkumu pro polovodičové použití. V přírodě se vyskytuje velmi vzácně jako minerál moissanit. SiC je jediná známá sloučenina se čtyřnásobnou vazbou. V šedesátých letech byl karbid křemíku považován za slibný polovodičový substrát, možná slibnější než samotný křemík. Poté co se objevila metoda, která pomohla snížit počet defektu ve struktuře křemíku, ukončila existenci SiC jako materiálu pro průmyslové použití. Protože výroba byla finančně náročná, byla vhodná jen pro armádní, letecký a kosmický průmysl. V posledních letech je velký zájem o SiC technologii, zájem o vyřešení hustoty poruch, přičemž se počet poruch stále zmenšuje.



Obrázek 1 - minerál moissanite [5]

Součástky založené na SiC substrátu, jsou vyvinuty pro použití v dynamických aplikacích, ve vysokých teplotách, v prostředích s vysokou dávkou radiace, do podmínek, ve kterých by tradiční polovodičové součástky nemohly fungovat. Díky těmto vlastnostem se očekává zlepšení v různých aplikacích a systémech. Zlepšení se týká oblasti komunikace, v mikrovlnných rádio-elektronických systémech, v řízení elektrických pohonů a hlavně ve vysokonapěťových spínačích.

1.1 Vznik a historie

Jöns Jacob Berzelius je známý tím, že jako první identifikoval prvek křemík, ale s největší pravděpodobností to byl i on, kdo jako první syntetizoval SiC. V roce 1824 vydal článek, kde spekoval o spojení křemíku s uhlíkem. Berzelius se narodil na okraji města Linköping (Švédsko), kde se v dnešní době též nachází centrum pro výzkum SiC. [2]

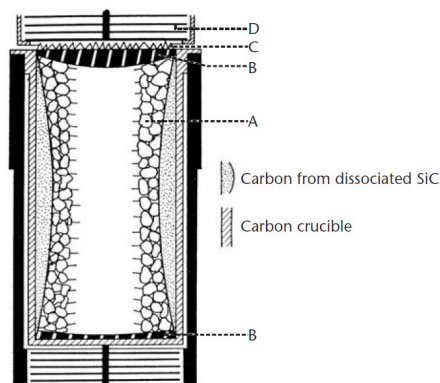
První postup pro výrobu syntetické SiC byl vyvinut ke konci 19. století Edwardem Goodrichem Achesonem. Na konci 19. století americký chemik zkoumal způsob, jak vytvořit umělý diamant pro brusné a řezací účely. Ke svému účelu využíval elektrickou tavicí pec od dvou vynálezců Eugena a Alfreda Cowlesových. Po vložení koksu (uhlík) a křemenného písku (oxid křemičitý) do pece a působením vysokých teplot (až 2500 °C) [1] objevil produkt s krystalickou strukturou ve tvaru 6ti-hranu, která je podobná struktuře diamantu. Po objevení poslal část materiálu profesorovi z Lehigh University B. W. Frazierovi, který prohlásil, že se jedná o polytyp SiC. Acheson dal výslednému produktu název „carborun-dum“ se vzorcem SiC. První vzorek pro brusné účely vyrobil Acheson v blízkosti města Pittsburgh, kde se v dnešní době také nachází další centrum pro výzkum SiC materiálů.



Obrázek 2 - Jöns Jacob Berzelius [6] a Edward Goodrich Acheson [7]

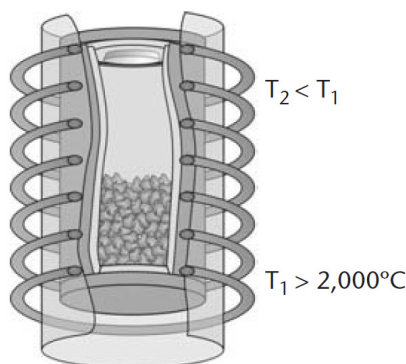
Elektrické vlastnosti byly zkoumány krátce po objevu materiálu a v roce 1907 byla vyrobena i první SiC LED dioda. I přes tento úspěch byla výroba krystalu stále obtížná, vyžadující trpělivost, a čistota výsledného krystalu nebyla stále uspokojivá a kontrolovatelná. V důsledku toho byla v roce 1955 vynalezena jiná významná metoda zvaná Lelyho metoda

růstu, pojmenovaná po J. A. Lelym. Pomocí ní bylo možné postup výroby do jisté míry kontrolovat a ovlivnit tak vlastnosti a kvalitu krystalu. Díky této metodě byl o SiC větší zájem, v té době větší než o klasický křemík.



Obrázek 3 – Popis prostředí podle Lelyho [2]

I přes všechny pokroky ve výrobě substrátu se po konferenci o SiC, která se konala v Bostonu, zájem o tuto sloučeninu rychle klesal. V rozmezí roků 1960 a 1970 se výzkum prováděl jen na některých místech v Americe a v bývalém Sovětském svazu. Po roce 1970 se díky způsobu výroby, který vynalezli pánové M. Tairov a V. F. Tsvetkov, zájem o SiC zvýšil. Další zlom nastal v roce 1987, kdy bylo možné vyrobit kvalitní substrát i při nižších teplotách. Díky tomuto zlomu byla o dva roky později vyrobena i první modrá LED SiC dioda pro komerční použití firmou Cree a.s.



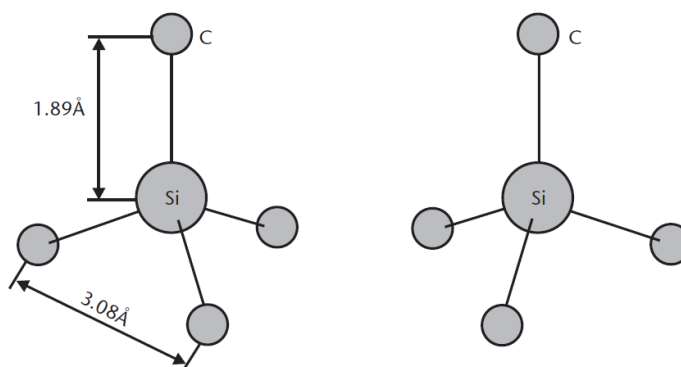
Obrázek 4 – Prostředí pro růst pomocí metody M. Tairova a V. F. Tsvetkova [a]

Od konce 19. století byl materiál komerčně vyráběn ve firmě Cree Research, Inc. Tato firma vytvořila příležitost pro další pokrok ve výzkumu zařízení na bázi SiC. Během této doby docházelo také ke zlepšení metody epitaxe při nízkých teplotách. Ve stejné době vyrobila společnost i prototyp výkonového a vysokofrekvenčního zařízení na bázi SiC.

Epitaxe z kapalné fáze (LPE – Liquid Phase Epitaxy) byla nahrazena vyspělejšími technologiemi, jako jsou metody chemického napařování (CVD – Chemical Vapor Deposition) nebo metodou epitaxe molekulárních svazků s plynným zdrojem (GSMBE – Gas Source Molecular Beam epitaxy). Tyto výrobní technologie umožnily výzkum a výrobu vysoce kvalitních zařízení, které mají velmi nadějnou budoucnost.

1.2 Krystalická struktura

Krystal karbidu křemíku se skládá z atomu křemíku a uhlíku s tvarem pravidelného čtyřstěnu (obrázek 4), kde jsou čtyři atomy uhlíku s atomem křemíku uprostřed. Existuje i další typ, který je pootočen o 180° vůči prvnímu typu. Vzdálenost mezi atomem křemíku a uhlíku je pouhých 1,89 am (diamant 1,54 am) a vzdálenost mezi atomy uhlíku je 3,08 am. Krystaly SiC mají podobnou krystalickou strukturu jako diamant, a proto ve stupnici tvrdosti dosahují úrovně 9-10.

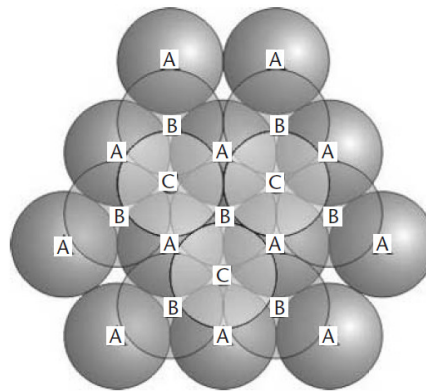


Obrázek 5 - Prostorové rozložení atomů SiC, druhý prvek je otočen o 180° [2]

SiC je sloučenina s krystalickou strukturou nazývané polytypy. Je to speciální případ polymorfie a vznikají různými způsoby uspořádání jednotlivých vrstev. Toto rozdílné uspořádání má poté za následek i rozdílné vlastnosti polovodiče. I přestože je známo téměř 200 druhů polytypie SiC, jen některé typy jsou přijatelné pro použití jako elektronické polovodiče. V současné době jsou nejvíce používané typy 3C-SiC, 4H-SiC a 6H-SiC. Značeno pomocí tvaru nX, kde písmeno X značí krystalickou soustavu (C – kubická, H – hexagonální) a číslo n udává počet vrstev, které tvoří jednu opakující se sekvenci ve struktuře. Nejjednodušší šestiúhelníkovou strukturu, kterou můžeme vytvořit, je struktura 2H, která má sekvence ABAB (pro charakteristiku polytypů se nejčastěji používá tzv. ABC symboly). Dva

nejdůležitější polytypy SiC 4H-SiC a 6H-SiC mají sekvenci ABCBABC B a ABCACBABCACB.

Na obrázku 5 je zobrazena struktura 3C-SiC, někdy označovaná jako β -SiC. Je to jediná forma SiC s krychlovou krystalickou strukturou. Krystalické struktury SiC, které mají jiné tvary než krychlové, jsou někdy nazývány α -SiC (např. 4H-SiC a 6H-SiC s hexagonální krystalickou strukturou). α -SiC struktury mají elektrické vlastnosti izotropní, znamená to, že jejich vlastnosti jsou závislé na směru toku proudu nebo aplikovaného elektrického pole.

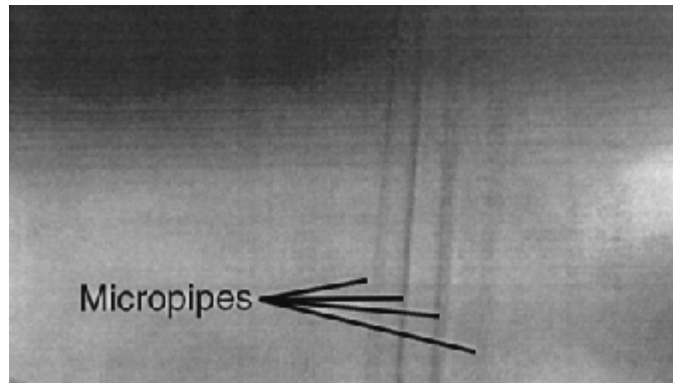


Obrázek 6 - 3C-SiC struktura [2]

1.2.1 Poruchy krystalické struktury

V krystalu může dojít různými způsoby k poruchám krystalové mřížky. Tyto poruchy vedou k odchylkám od ideální krystalové mřížky. V tomto místě dochází k termodynamické nerovnováze. Mezi základní poruchy patří: bodové poruchy, dislokace, plošné a prostorové poruchy.

Jedním z nejvýznamnějších problémů při výrobě SiC jsou prostorové mikropóry (obrázek 7). Tyto mikropóry vznikají různými způsoby. Prvním způsobem je vznik větším množstvím šroubovacích dislokací, které jsou zformovány do tzv. obří-šroubovice s dutým jádrem. Další mikropóry mohou vznikat jednoduše tak, že se na určitých místech shlukují nečistoty. Mikropóry jsou v podstatě dutým jádrem, který proniká monokrystalem podél svislé osy. Umístěním jakéhokoli zařízení přímo na vrchol mikropór by došlo k poruše. Tento typ poruchy je obzvlášť nežádoucí u vysokonapěťových velkoplošných zařízení. Existuje mnoho zajímavých výzkumů, které se snaží o minimalizaci vzniku mikropór. V jednom z nich se vědci snaží o růstu krystalu v letadle, aby se mikropóry šířily šikmo a zabránilo se jim dosáhnout vrcholu monokrystalu.



Obrázek 7 - Mikropóry při 400x zvětšení [10]

Další vážnou poruchou, která si zaslouží pozornost, je hranová dislokace. Jedná se o poruchu, při níž chybí souvislá část atomů v mřížce. Tato porucha nemá tak dlouhou historii jako předchozí, protože se stala populární teprve nedávno. Hranová dislokace způsobuje rychlejší degradaci (stárnutí) bipolárních součástek. Existují zprávy [2], které popisují rychlejší degradaci určité PiN diody i při normálních podmínkách. Je-li PiN dioda v provozu fungují oblasti s touto poruchou jako rekombinační centra, jejichž energetické hladiny jsou v blízkosti zakázaného pásu. Tyto hladiny mohou sloužit jako stupně pro převádění elektronů do valenčního pásu, čímž dochází ke změně doby života (lifetime). Hranová dislokace u SiC materiálů je velmi vážným problémem, který musí být vyřešen před realizací pro komerční účely.



Obrázek 8 – Šipka ukazuje na hranovou dislokaci u SiC struktury [11]

1.3 Vlastnosti

Karbid křemíku je polovodičový materiál s velmi vhodnými vlastnostmi pro použití ve výkonových, vysokofrekvenčních a vysokoteplotních zařízeních. Hlavní a nejdůležitější vlastností SiC materiálu je velká šířka pásma, vysoká hodnota průrazného napětí a vysoká tepelná vodivost. Kombinace těchto vlastností dělá z SiC ideální materiál pro použití ve výkonové elektronice.

1.3.1 Mechanické a chemické vlastnosti

Karbid křemíku je velmi tvrdá sloučenina s modulem pružnosti v tahu 424 GPa. [2] Sloučenina je také chemicky stabilní a při pokojové teplotě reaguje velmi špatně se všemi známými látkami. Jediná známá reakce je reakce s roztavenou sloučeninou KOH (hydroxid draselný) při teplotě 400-600 °C [2]. Z tohoto důvodu je prakticky nemožné cokoli šířit do SiC. Přimíšení prvků se provádí přímo při epitaxi prvků. U sloučeniny neexistuje kapalné skupenství, látka sublimuje při 1800 °C [2] přímo do plynného skupenství. Během sublimace se uvolňují hlavně páry Si, Si₂C a SiC₂ ve specifických poměrech v závislosti na teplotě.

1.3.2 Tepelné vlastnosti

Důležitým parametrem vysokofrekvenčních zařízení je tepelná vodivost a roztažnost. Zvýšení teploty vede obecně ke změnám fyzikálních vlastností látek a dochází k negativním chováním zařízení. Rychlost pohybu nosičů nábojů v polovodičích klesá s rostoucí se teplotou. Tepelná vodivost SiC je za pokojové teploty vyšší než u mědi. Tvrdí se i to, že při pokojové teplotě má SiC lepší i vodivost než jakýkoliv kov. Hodnoty jsou ovšem závislé na čistotě substrátu a na směr měření. Nejvyšší naměřená hodnota u substrátu SiC byla 4,9 W/cm*K (pro představu, teplotní součinitel mědi 4 W/cm*K, stříbra je 4,18 W/cm*K). [2]

Tepelná vodivost závisí na čistotě substrátu a směru měření. Větší tepelná vodivost znamená i efektivnější odvod odpadního tepla, díky tomu může zařízení pracovat rychleji a účinněji. Vezmeme-li v úvahu, že efektivita chlazení závisí na teplotním rozdílu součástky a chladicí jednotky, schopnosti SiC pracovat při vysokých teplotách, tak dostaneme to, že součástka může být chlazená menším chladičem anebo vůbec. Nechlazený provoz by umožnil zlepšení v mnoha oborech, třeba v leteckém průmyslu. Výměna hydraulických ovládacích prvků za chytré elektromechanické, které jsou schopné pracovat v drsném okolním prostředí,

by významně zredukovala hmotnost tryskového letadla, došlo by ke zvýšení účinnosti spalování paliva a zjednodušila by se i údržba.

1.3.3 Elektrické vlastnosti

Z důvodu rozdílného uspořádání atomů křemíku a uhlíku v krystalové mřížce vykazuje každý SiC polytypie odlišné elektrické vlastnosti. U SiC stejně jako u ostatních polovodičů rozeznáváme dva typy příměsových (nevlastních) vodivostí, typ p a typ n. Vodivosti typu N se dosáhne přidáním dusíku nebo fosforu. V případě vodivosti typu P se používá bór, hliník nebo galium. Tyto příměsi se do krystalu dodávají pomocí metody iontové implementace nebo přímo při růstu krystalu.

Šířka zakázaného pásma závisí na typu polytypie, pohybuje se od 2,39 eV pro strukturu 3C-SiC do 3,33 eV pro 2H-SiC. [2] Nejčastěji používané polytypie 4H-SiC má zakázané pásmo 3,265 eV. [2] Tak široké pásmo umožňuje součástce na bázi SiC pracovat ve velmi vysokých teplotách na rozdíl od křemíku.

Tabulka 1 - Vlastnosti vybraných polovodičů [8]

Parametr	Si	GaAs	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC
Šířka zakázaného pásma [eV]	1,1	1,42	3,2	3,0	2,3
Průrazné elektrické pole [MVcm^{-1}]	0,6	0,6	3,0	3,2	1,8
Tepelná vodivost [W/cm-K]	1,5	0,5	3-5	3-5	3-5
Nasyčená elektronová rychlost [10^7cms^{-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
Relativní dielektrická konstanta	11,9	13,1	9,7	9,7	9,7

Pro použití v napájecích zdrojích je asi nejdůležitější dielektrická pevnost E_{max} . Je to odolnost materiálu vůči elektrickému poli. Tato odolnost určuje největší intenzity elektrického pole, při které dochází k průrazu a materiál se stává vodivým. Průrazné napětí u SiC je teoreticky 10x vyšší než je hodnota u křemíku (tabulka 1). Stejně jako u Si je toto napětí závislé na čistotě substrátu. Podle studie je průrazné napětí 2.49 MV/cm pro hodnotu příměsí $10^{16}/\text{cm}^3$. Pro stejnou hodnotu příměsí je průrazné napětí u křemíku pouze 0,401 MV/cm [2]. U vysokofrekvenčních zařízení není dielektrická pevnost až tak důležitá veličina jako je nasyčená elektronová rychlost. Tato rychlost je u substrátu SiC $2 \cdot 10^7 \text{ cm/sek}$, což je 2x vyšší než u Si. Tato vysoká rychlost je vhodná pro zařízení pracující s mikrovlnami. [1]

Elektrické pulzní měniče na bázi SiC mohou pracovat na mnohem vyšší frekvenci s mnohem větší účinností (s menšími spínacími ztrátami) než s využitím klasických součástek. Vysoká spínací frekvence u měničů je velmi žádoucí. S vyššími frekvencemi klesá potřebná kapacita kondenzátorů a indukčnosti a tedy i jejich rozměr bude menší, což může výrazně snížit celkovou hmotnost, rozměry i náklady. Výkonné polovodičové součástky na bázi SiC by umožňovaly i značné zvýšení efektivnosti řízení a kontroly elektrické energie ve veřejných sítích. Menší ztráty by znamenaly i snížení ceny za energii a tím i nárůst poptávky elektřiny, zlepšení kvality i provozní spolehlivosti. Elektromotor řízené pomocí SiC systému by přinesl prospěch nejen do průmyslového ale i do dopravního odvětví. Z výše uvedených výhod je zřejmé, že polovodičové součástky na bázi SiC slibují obrovské výhody, které by mohly významně zlepšit a ovlivnit způsob života v globálním měřítku.

1.4 Výroba SiC

Z důvodu vzácnosti přirozeného moissanitu, je karbid křemíku většinou syntetickým produktem. SiC se vyrábí pomocí epitaxových technologií. Epitaxe je proces, při kterém na povrchu substrátu roste tenká krystalická vrstva. Tato vrstva navazuje bezprostředně na krystalickou mřížku substrátu. Tyto vrstvy mohou růst z plyných, tekutých nebo pevných prekuzorů (látky, ze kterých vznikají nové vrstvy). Jestliže je tato látka stejného složení jako substrát, jedná se o homoepitaxi, v opačném případě o heteroepitaxi.

Homoepitaxe se využívá v případě, že chceme čistější vrstvu než je substrát nebo pokud má být nová vrstva jinak dopovaná. Heteroepitaxe se často používá k výrobě integrovaných krystalických vrstev různých materiálů nebo při růstu vrstev materiálů, u kterých nelze monokrystal získat jiným způsobem. Existuje mnoho metod pro růst SiC krystalu, ale zaměříme se pouze na metody CVD (Chemical vapor deposition), HTCVD (High temperature CVD).

1.4.1 Růst krystalů

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1, základní principy výroby byly stanoveny v roce 1970 pánem Tairovem a Tzvetkovem. Tato metoda, také známá jako upravená Lelyho metoda, jako první nabídla možnost, jak vyrobit monokrystal v přijatelné velikosti, který by mohl být později vybroušen a leštěn do SiC destiček. Tato metoda se prakticky používá až dodnes.

Principem výroby je jednoduchý proces. Uhlíkový kelímek se částečně naplnění SiC práškem, na víku je přichycen substrát. Kelímek se poté zahřeje až na teplotu přibližně 2400 °C. [2] Při této teplotě prášek začne znatelně sublimovat. Teplota se poté udržuje v takovém rozmezí, aby prášek měl vyšší teplotu než substrát na vrchu. Prášek SiC sublimuje a kondenzuje se na chladnější substrát na horní části kelímku. Teplotní rozdíl je velmi důležitý pro růst krystalu. Rychlost růstu exponenciálně stoupá s rostoucí teplotou. Tlak v peci se udržuje pod 50 mbar. [2] Nízký tlak zaručuje optimální přenos materiálu na substrát. Hlavní složky při sublimaci jsou Si, Si₂C a SiC₂, poměr mezi nimi závisí na teplotě.

Při výrobě SiC je důležité, aby se vyrobil co největší v průměru a nejkvalitnější krystal. V dnešní době není problém vyrobit monokrystal o průměru až 10cm. Není pochyb o tom, že v brzké době bude možné vyrobit monokrystal v takové velikosti, v jaké je možné vyrobit křemíkový monokrystal.



Obrázek 9 - Monokrystal SiC [9]

1.4.2 Chemical Vapor Deposition (CVD)

CVD je nejpoužívanější metodou výroby silikon-karbidových krystalů a patří mezi epitaxe z plynné fáze. Existují různé reaktory pro výrobu SiC pomocí této metody, z nichž jsou nejpoužívanější 2 typy, a to: cold-wall a hot-wall reaktor.

Tato metoda využívá jako prekuzory Silan (SiH₄) a Hydrovodík. Tyto plyny proudí přes vyhřívaný uhlíkový susceptor, který je potažen karbidem křemíku nebo karbidem tantalu (TaC) vysokou rychlostí. Rychlost plynu postupně klesá s délkou susceptru, občas až na nulovou hodnotu. Působením tepla se plyny sublimují na složky a začnou šířit směrem ke stěnám s karbidem křemíku, kde poté zkondenzují do podoby SiC. Koncentrace prekuzových plynů se ve směru proudění snižuje spotřebováním, což má za následek zúžení tloušťky výsledného materiálu. Pro kompenzaci této příčiny se běžně využívá susceptor ve tvaru

kužele, to má za následek zvýšení rychlosti ve směru proudění. Výsledkem je, že tloušťka výsledného materiálu bude shodná. Někdy toto řešení není dostačující k dosažení stejné tloušťky materiálu a uplatňují se i složitější řešení jako je otáčení podkladu nebo susceptoru.

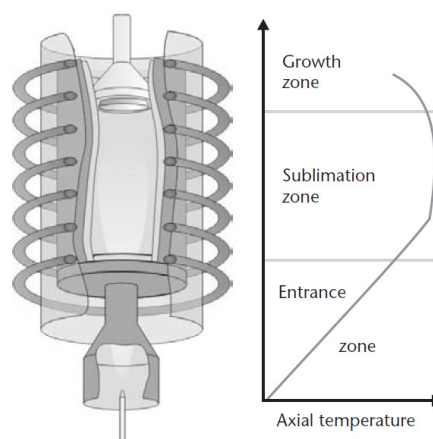
Z důvodu rozdílné tloušťky výsledného produktu se využívá reaktor zvaný hot-wall. S tímto reaktorem je možné vyprodukovat materiál se stejnou tloušťkou na obou stranách bez nutnosti otáčení. Hot-wall reaktoru je stále populárnější díky kvalitě výsledného produktu.

Pro dosažení příměsových (nevlasných) vodivostí se využívá dusík (N) pro typ N nebo Trimethylaluminium (Al_2Me_6 nebo TMA) pro typ P.

1.4.3 High Temperature Chemical Vapor Deposition (HTCVD)

Tato metoda výroby SiC byla objevena v roce 1995. HTCVD umožňuje lepší kontrolu nad výrobou a vyšší rychlosti růstu. Růst krystalu probíhá narozdíl od metody CVD ve vertikálních reaktorech.

Na obrázku č. 5 je znázorněn systém pro výrobu monokrystalu pomocí této metody. Systém je složen ze tří částí: vstupní, sublimační a kondenzační. Jako zdrojový materiál se využívá hlavně Silan (SiH_4) a ethen (C_2H_4), které jsou vázány s héliem. Rychlost průtoku systémem je velmi malá.



Obrázek 10 - Systém HTCVD [2]

Jako hlavní prvky procesu se zde využívají silan (SiH_4) a ethen (C_2H_4), které jsou přítomny ve velmi vysokých koncentracích. Po vstupu do systému se Silan sublimuje a v závislosti na teplotě vytvoří křemíkové kapky nebo krystaly. Ethen se rovněž podílí na reakci a tvorbu mikročástic křemíku a uhlíku. Bylo prokázáno, že s menším množstvím uhlovodíku se zlepší vazby Si_xC_y [2]. Tyto mikročástice poté vstoupí do sublimační zóny

systemu pomocí nosného plynu helia. Z mikročastic se v této části vytvoří složky Si, Si₂C a SiC₂ jako v předchozí metodě. Tyto plyny poté kondenzují v poslední části systému. Na obrázku jsou také znázorněny teploty, které jsou v jednotlivých částech.

Pro správnou funkci sublimační části je důležité, aby byl ohřev v této části efektivní. V opačném případě se vytvoří částice zvané „smoke“ (kouř), které se poté vypaří vrchem kelímku. Tento jev má velký vliv na rychlost růstu a kvalitu monokrystalu. Koncentrace prekuzorů má též vliv na rychlost růstu. Avšak s příliš vysokou koncentrací se vytvoří i větší krystaly, které se špatně sublimují. Nové vrstvy přibývají rychlostí 0,8mm až 1mm za hodinu. [2].

Jednou z hlavních výhod metody HTCVD je kvalita a rychlost růstu hotového monokrystalu. Tato metoda též redukuje (až 80%) [2] výskytu mikropór, jedno z nejzávažnějších problémů týkající se výroby SiC.

1.5 Kontakty na SiC součástkách

Všechny součástky (včetně polovodičových) v elektrotechnice vyžadují vodivé cesty pro přívod a odvod signálů. Zajišťují komunikaci jak mezi součástkami uvnitř čipu tak i komunikaci s obvodovými prvky, které jsou umístěny mimo čip. Součástky na bázi SiC mohou pracovat v extrémních podmínkách, ale bez kontaktu a propojení, které by byly schopny pracovat ve stejných podmínkách, by byly nepoužitelné. Jedním z hlavních faktorů, které omezují provozní limity SiC zařízení je trvanlivost a spolehlivost těchto kontaktů a propojení. Podobně jako součástky musí tyto kontakty a spoje odolávat v prostředí o velmi vysokých teplotách a s vysokou hustotou proudu.

1.5.1 Ohmický kontakt

Ohmické kontakty jsou důležitou součástí všech polovodičových struktur, protože zajišťují přívod proudu do těchto struktur a dále vstup a výstup signálů. Odpor ohmického kontaktu u SiC je při pokojové teplotě vyšší než u klasického křemíkového polovodiče. Jsou nicméně tak malé, že jsou pro většinu aplikací zanedbatelné. Nižší hodnotu odporu lze získat spíše u polovodiče typu N. Provoz v drsném prostředí bude vyžadovat takové ohmické kontakty, které budou spolehlivé a trvanlivé. Standardní používané kontakty pro SiC zařízení jsou schopné dlouhodobě pracovat v prostředí o teplotě až 300 °C. Kontakty typu N, které jsou ve vakuu nebo obklopeny inertním plynem, jsou schopny pracovat až tisíce hodin a při

teplotách až 600 °C a to bez zkreslení. Oxidace a elektrochemické reakce při vysokých teplotách pravděpodobně určují spolehlivost a trvanlivost SiC součástek. Trvanlivost a spolehlivost SiC kontaktů je jedním z kritických faktorů, které omezují praktické použití těchto zařízení ve vysokých teplotách.

1.5.2 Schottkyho kontakt

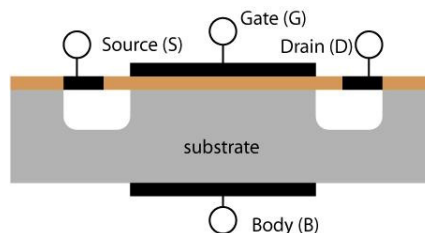
Spojení polovodič-kov může mít usměrňovací účinek stejně jako PN přechod. Toto spojení se nazývá Schottkyho kontakt. K vytvoření dobrého Schottkyho kontaktu je nutné, aby koncentrace příměsí v polovodiči byla nízká a povrch byl co nejméně mechanicky poškozen. Kontakt vzniká přitlačením nebo vakuovým napařením kovu (titanu, platiny, paladia, hliníku atd.) na povrch polovodičové destičky a následným tepelným zpracováním. Nejcennější vlastností Schottkyho kontaktu je vysoká rychlost, se kterou kov „odsává“ volné vodiče náboje z místa přechodu. Součástky, které tohoto kontaktu využívají, jsou vhodné jako rychlé spínací součástky pro použití při velmi vysokých frekvencích, které jsou řádu desítek až stovek gigahertzů.

1.6 Komerční použití

Karbid křemíku měl do dnešní doby jasné uplatnění jako materiál, respektive jako substrát pro LED aplikace. Není to nejlepší postavení, ale představuje to významný výchozí bod SiC pro komerční použití. Armáda používala SiC pro své účely už po mnoho let. Radary, radarové obrazovky, součástky do letadel, lodí, bojových vozů a zbraně vyžadují vysokou kvalitu použitých materiálů. Díky těmto požadavkům na vysokou kvalitu se komerční sektor pro SiC probudil a začal vyvíjet produkty, aby uspokojily tyto potřeby.

2 SiC Field-Effect tranzistory

Všechny tranzistory, které jsou řízené elektrostatickým polem, mají mnoho společného. Tato zařízení fungují podle návrhu, které realizoval v padesátých letech 20. století americký fyzik a vynálezce William Bradford Shockley. Základní struktura FET tranzistoru je zobrazena na obrázku č. 11.

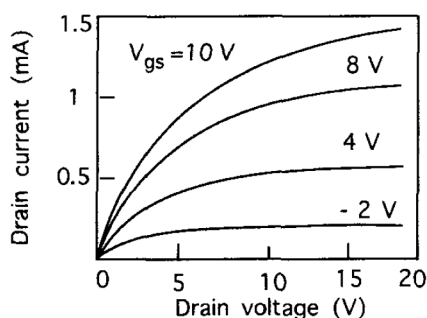


Obrázek 11 - Struktura FET tranzistorů [12]

Velikost náboje Q_s protékající mezi „source“ a „drain“ je řízen pomocí napětí, který je mezi „gate“ a „channel“ a je dána vztahem:

$$Q_s = c_i \times [V_{GS} - V(x) - V_T]$$

Kde V_T je prahové napětí, V_{GS} je napětí mezi „gate“ a „source“, $V(x)$ napětí kanálu (měřeno proti „source“) a c_i je kapacita mezi „gate“ a podkladem. Čím větší je protékající proud I_D (mezi S a D), tím větší je Q_s . Na obrázku č. 12 je znázorněna volt-ampérová charakteristika tranzistoru MOSFET 6H-SiC s prahovým napětím -4V.



Obrázek 12 - VA charakteristika 6H-SiC [1]

Typickým zapojením FET tranzistoru je, že kanály „gate“ a „source“ slouží jako vstup (vstupní napětí) a svorky „drain“ a „source“ jsou pak jako výstupní. Vzhledem k tomu, že svorka „gate“ je oddělena od „source“ izolační vrstvou, je vstupní impedance velmi vysoká,

což je velká výhoda oproti bipolárním tranzistorům. Velká vstupní impedance má nevýhodu v možnosti snadného poškození statickým nábojem, zvláště při manipulaci před zapojením do obvodů.

Jedním z nejdůležitějších parametrů FET tranzistorů je jeho prahové napětí V_T , což je napětí, které je třeba přiložit, aby došlo k otevření tranzistoru. Je-li přiložené napětí menší než hodnota V_T , je tranzistor v uzavřeném stavu.

2.1 SiC MOSFET

Tranzistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) je polem řízený tranzistor s vodivým nebo indukovaným kanálem. Tyto tranzistory využívají jako podklad (substrát) různé polovodičové materiály. I použitý oxid se velmi liší, ale nejčastěji tvoří SiO_2 z důvodu snadné přípravy na substrátu.

Tranzistory mohou mít kanály s vodivostí typu N (NMOS) nebo typu P (PMOS). U NMOS tranzistoru je kanál vytvořen pomocí napětí na „gate“, který produkuje volné elektrony. Tyto elektrony vychází ze „source N+“ a přechází do „drain N+“. Kontakty D a S jsou vytvořeny pomocí difúzí do substrátu s vodivostí typu P. Tyto kontakty a vodivý kanál je oddělen od substrátu pomocí depletiční (vyprázdněné) oblasti.

Narozdíl od NMOS má PMOS vrstvy s opačným typem vodivosti. Vzhledem k tomu, že elektronové díry (majoritní nosiče náboje u PMOS) mají mnohem menší pohyblivost než elektrony, je i výkon těchto tranzistorů horší. Nicméně PMOS tranzistor je často používán v kombinaci s tranzistorem NMOS jako CMOS tranzistor (Complementary MOS). Tento typ je vytvořen spojením dvou MOSFETů (N kanál a P kanál) na stejném substrátu. Pro správnou funkci musí být tyto kanály od sebe izolovány.

Design MOSFET tranzistorů má velký význam na vlastnosti zařízení, zejména geometrie vodivého kanálu a kontakt „drain“. Tvar tranzistoru a vývodu se proto navrhuje podle aplikací a použitého podkladu.

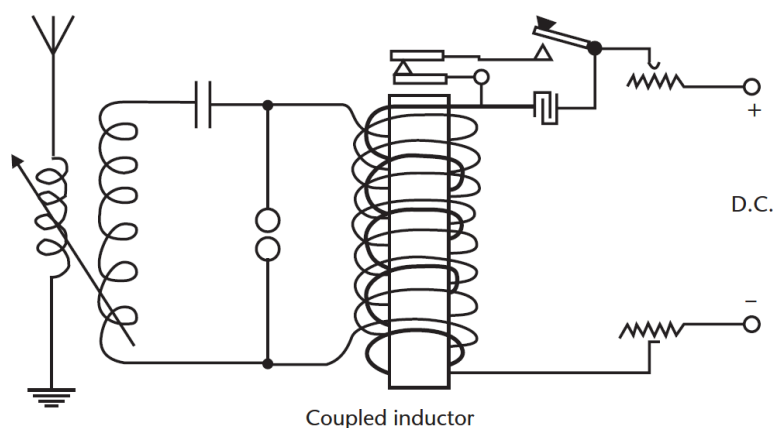
3 Měníče napětí

Měníč napětí je zařízení, které slouží ke změně napětí napájecí soustavy. Měníč může u střídavého napětí měnit velikost (amplitudu - transformátorem) nebo ho usměrňovat na stejnosměrné (SS) napětí (usměrňovačem). U SS napětí je možné měnit pouze jeho velikost nebo ho také rozkmitat (střídačem). Z hlediska funkce je možné měniče dělit na: usměrňovač, střídač, měnič frekvence, transformátor a dc-dc měnič. V praxi se často používá kombinace různých druhů měničů. Z hlediska technologie je možné měniče rozdělit na dvě skupiny. Na klasické měniče pracující na elektromagnetickém nebo elektromechanickém principu a elektronické měniče, které pracují na principu polovodičů. Klasické měniče prakticky vždy používají magnetické komponenty (transformátory). I přesto, že tyto měniče jsou nemoderní, jsou v některých aplikacích nenahraditelné. Ve většině polovodičových měničích hrají nezastupitelnou roli vysokofrekvenční transformátory a jiné magnetické komponenty, bez kterých nelze zajistit galvanické oddělení obvodů.

Základní principy pro měnič napětí pracujících ve spínacím režimu jsou známy již více než 100 let. Jedním z nejstarších obvodů je Hertzův oscilátor, který je znázorněn na obrázku 13. Z obrázku je zřejmé, že technologie se mění každým dnem, ale základní princip je stále stejný.

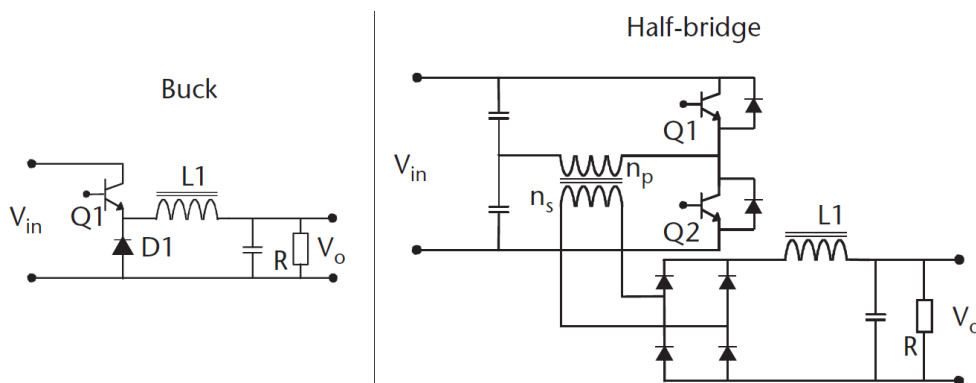
3.1 DC-DC měnič

Cílem spínacích měničů DC-DC je transformovat vstupní stejnosměrné napětí na požadované výstupní stejnosměrné napětí. Tyto převodníky obvykle provádějí transformaci pomocí tzv. step-up (zvyšovač napětí) nebo step-down (snižovač napětí) vstupního napětí. Nicméně je možné tyto obvody použít pro galvanické oddělení dvou obvodů. V tomto případě je vstupní a výstupní napětí měniče totožné. Vzhledem k vysoké účinnosti našly tyto měniče široké využití jak ve spotřební elektronice tak i v průmyslových systémech. Tyto obvody obsahují indukční a kapacitní prvky, které slouží k uchování energií, polovodičové spínače a diody. Ačkoliv existuje řada topologií spínacích měničů, zaměříme se na nejpoužívanější obvody zvané „buck“ a „full-bridge“, které byly použity se SiC technologií.



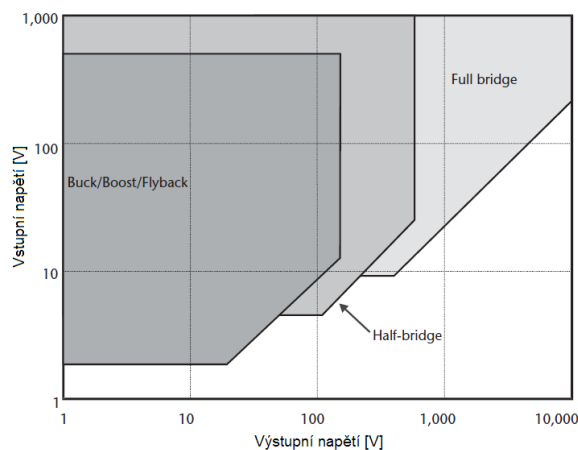
Obrázek 13 - Hertzův oscilátor ze začátku 20. století [2]

Obrázek 14 ukazuje schéma zapojení spínacího DC-DC měniče s topologií Buck (step-down) a Half-bridge. Oba tyto měniče mají podobné pracovní vlastnosti. Diody D1 slouží jako blokovací prvek při záporné půlplně. Cyklus D je u těchto obvodů definován následovně: $D = \tau / T$, kde τ je čas, po které je tranzistor Q otevřen a T je celkový čas jedné periody. V aplikacích vyžadujících galvanické oddělení mezi vstupem a výstupem se využívá topologie bridge s oddělovacím transformátorem. Half-bridge topologie využívá dva spínače, které se n rozdíl od obvodu Buck přepínají i při záporné půlplně. Kondenzátory zde slouží jako děliče napětí, které dělí vstupní napětí V_{in} na polovinu, takže napětí, které se objeví na oddělovacím transformátoru je jen polovina V_{in} . Nicméně, maximální napětí na obou spínačích zůstává stále V_{in} . Pro velmi výkonné aplikace se využívá topologie zvané Full-bridge. Zapojení je totožné s předchozím případem jen s rozdílem, že kondenzátory jsou nahrazeny dvěma spínači. Toto nahrazení umožňuje, aby se na primární straně transformátoru objevilo celé vstupní napětí. Nevýhodou tohoto zapojení jsou větší ztráty a je potřeba použít i větší kapacitu.



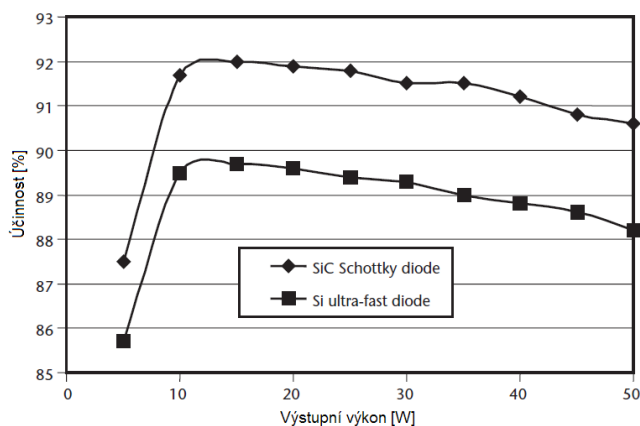
Obrázek 14 - Topologie Buck a Half-bridge [2]

Následující obrázek (obr. 15) znázorňuje pracovní rozsah jednotlivých topologií. Pracovní hranice je určena nejslabším článkem v obvodu, respektive spínačem Q. Tyto hodnoty jsou určeny pomocí maximální hodnoty protékajícího proudu přes spínač. Špičkový proud je v tomto konkrétním případě 60A, které jsou typické pro diskrétní bipolární tranzistory a tranzistory MOSFET.



Obrázek 15 - Porovnání jednotlivých topologií [2]

Na základě předchozího odstavce je zřejmé, že změna jedné součástky má velký vliv na výkon celého zařízení. Křemíková technologie má bohužel své fyzikální limity. Příkladem je doba zotavení klasických křemíkových součástek. Tato doba může u Si výkonové diody klesnout až na 25nS [2], přesto pro určité aplikace je tato doba nepoužitelná. Většina současných výzkumů v elektronice je zaměřena na možnost, jak obejít tyto limity. Použití SiC součástek se zlepšuje celkový výkon zařízení, snižuje se i složitost řešení celého systému. Graf na obrázku 16 porovnává účinnost mezi Si a SiC diodami. S použitím Si diody dosahoval měnič účinnosti kolem 88% (v závislosti na výstupní výkon). SiC dosahoval narozdíl od křemíkové diody účinnosti až 92%. Tyto hodnoty byly naměřeny na DC-DC měniči (500V na 100V při frekvenci 100kHz a 186kHz) s použitím 600V ultra rychlou Si a PIN SiC diodou. [3]



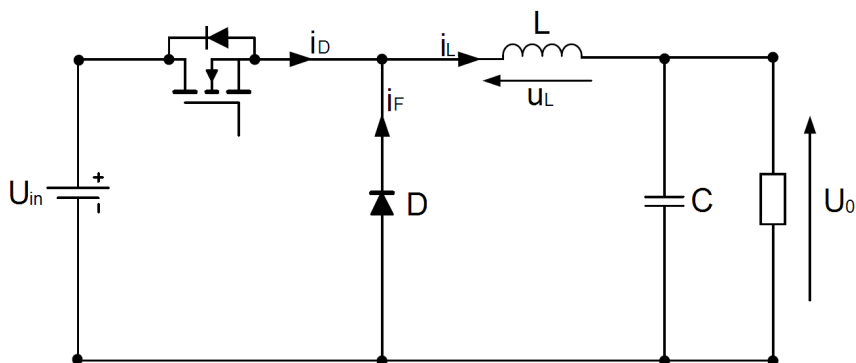
Obrázek 16 - Účinnost vybraných součástek [3]

V aplikacích, kde konvenční křemíkové prvky nestačí z důvodu vysokých teplot a výkonů, se používají součástky na bázi SiC.

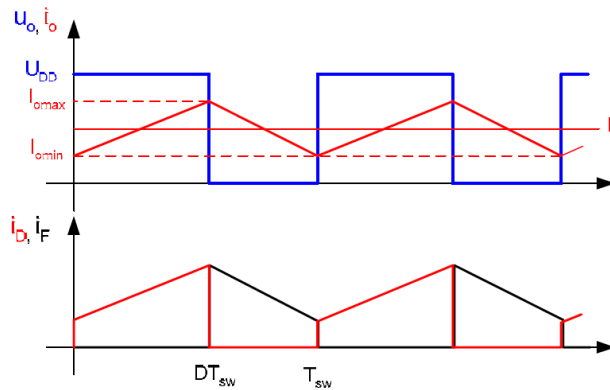
3.2 Návrh „step down“ měniče

Tato kapitola se zabývá návrhem měniče pro porovnání výkonových ztrát mezi SiC a klasickými křemíkovými součástkami. Jedná se o snižující pulzní měnič (step down – buck) v základním zapojení, který je uveden na obrázku 17. Mezi největšími výhodami tohoto zapojení jsou jednoduchost a nízká pořizovací cena. Na druhou stranu se jedná o stejnosměrné zapojení vstupu a výstupu (galvanické spojení), v případě zkratu na výstupu by došlo ke zničení spínacího tranzistoru.

Pro porovnávání jsou zvoleny MOSFET tranzistory CMF20120D (SiC – Cree) a IPW90R1203C (Si – Infineon). Jako diody byly použity C2D20120D (SiC – Cree) a IDB30E120 (Si – Infineon).



Obrázek 17 - Schéma zapojení měniče pro porovnávání tepelných ztrát



Obrázek 18 - Průběhy proudu a napětí na [X]

3.3 Ztráty na tranzistoru a diodě

Každá součástka, která pracuje ve spínaném režimu má následující ztráty:

- a.) Propustné ztráty P_c (conduction losses)
- b.) Spínací ztráty P_{sw} (switching losses)
- c.) Ztráty v závěrném směru P_b (blocking losses)

Z důvodu zanedbatelnosti P_b můžeme poté vypočítat celkové ztráty P_l (power losses) jako:

$$P_l = P_c + P_{sw} + P_b \cong P_c + P_{sw}$$

3.3.1 Propustné ztráty

Propustné ztráty u tranzistoru MOSFET mohou být spočítány pomocí rezistivity (R_{DSon}) mezi kolektorem (drain) a emitore (source) v sepnutém režimu:

$$U_{DS}(i_D) = R_{DSon}(i_D) \times i_D$$

kde U_{DS} je napětí kolektor emitor a i_D proud protékající kolektorem. Po zjištění hodnoty R_{DSon} , které je možné najít v datasheetu od výrobce, můžeme vypočítat propustné ztráty MOSFET tranzistoru (P_{CM}) jako:

$$P_{CM}(t) = u_{DS}(t) \times i_D(t) = R_{DSon} \times i_D^2(t)$$

Po integraci předchozího vzorce dostaneme průměrnou hodnotu propustné ztráty:

$$P_{CM} = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} P_{CM}(t) dt = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} (R_{DSon} \times i_D^2(t)) dt = R_{DSon} \times I_{Drms}^2$$

kde I_{Drms} je efektivní hodnota I_D .

Propustné ztráty pro zpětnou diodu je možné vypočítat pomocí součtu napětí U_{D0} , které je na diodě při nulovém proudu a U_D při proudu i_F :

$$U_D(i_D) = U_{D0} + R_D \times i_F$$

poté platí:

$$P_{CD}(t) = u_D(t) \times i_F(t) = u_{D0} \times i_F(t) + R_D \times i_F^2(t)$$

po integraci:

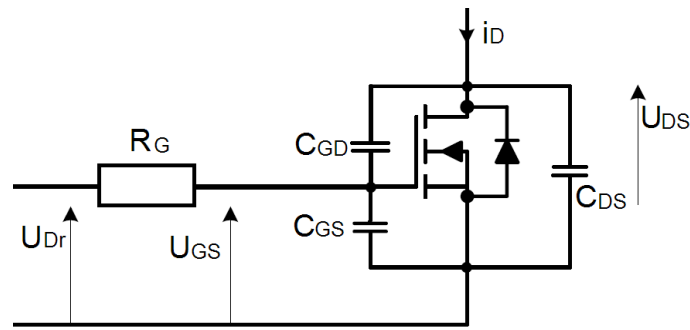
$$P_{CD} = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} P_{CD}(t) dt = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} (u_{D0} \times i_F(t) + R_D \times i_F^2(t)) dt = u_{D0} \times I_{Fav} + R_D \times I_{Frms}^2$$

kde I_{Fav} je průměrný proud protékající diodou a I_{Frms} jsou průměrné propustné ztráty při jedné spínací periodě.

3.3.2 Spínací ztráty

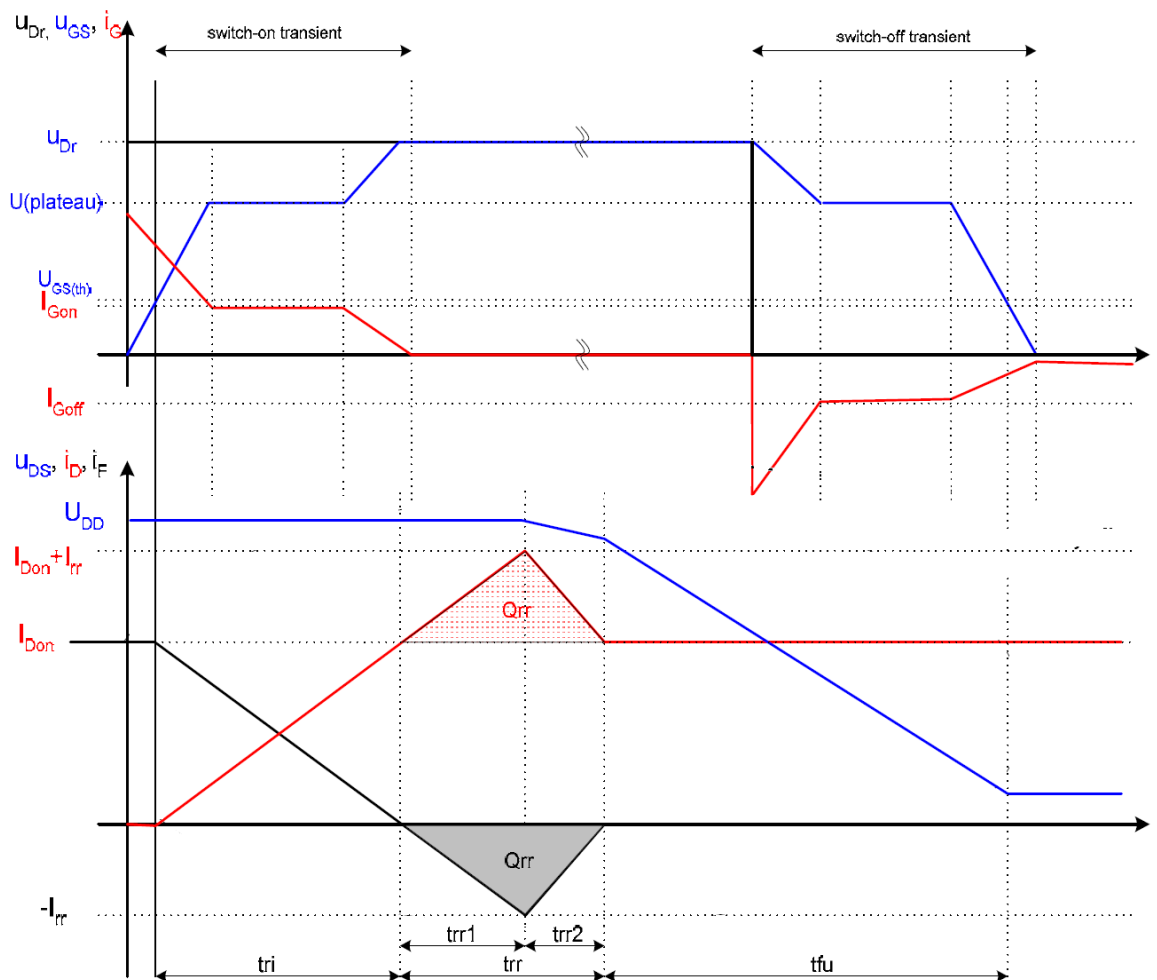
Přivedeme-li napětí mezi gate a source, toto napětí začne stoupat dokud nedosáhne hodnoty $U_{GS(th)}$ (threshold – prahové napětí). Tato doba je závislá na řídicím odporu R_G a vstupní kapacitou MOSFET tranzistoru. Do této doby je na výstupu nulový proud.

Po tom co se dosáhne prahového napětí ($U_{GS(th)}$), proud I_D začne stoupat až na hodnotu I_{Don} . Tato hodnota se liší podle použitých aplikací a je čitelná z dokumentačního listu (datasheet). Během této doby je vnitřní dioda MOSFETu stále vodivá a je na něm napětí U_{DD} . Aby se tato dioda vypnula musí být všechny minoritní nosiče, které jsou nashromážděny, odstraněny.



Obrázek 19 - Vnitřní struktura MOSFET tranzistoru [13]

Po vypnutí diody klesne napětí drain-source z $U_{DS}=U_{DD}$ na hodnotu $U_{DS}=R_{DSon} \times I_{on}$. Toto napětí klesne až na hodnotu $U_{(plateau)}$ a to díky Millerovu efektu. Sklon napětí drain-source je dán proudem tekoucím kapacitou ($C_{GD}=C_{rss}$). Pro výpočet doby poklesu t_{fu} (fall-time) musíme brát v úvahu, že závislost kapacity na napětí u C_{GD} je nelineární. Tato nelinearita je zavedena do výpočtu pomocí dvouhodnotový aproximaci.



Obrázek 20 - Dynamické parametry MOSFET tranzistoru [3]

Proud protékajícím gatem po dobu poklesu t_{fu} se vypočítá podle:

$$I_{Gon} = \frac{U_{Dr} - U_{(plateau)}}{R_G}$$

Poté doba poklesu t_{fu} je možné spočítat jako medián doby poklesu proudu přes gate, který je závislý na kapacitu C_{GD} :

$$t_{fu} = \frac{t_{fu1} + t_{fu2}}{2}$$

kde t_{fu1} se rovná:

$$t_{fu1} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD1}}{I_{Gon}} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times R_G \times \frac{C_{GD1}}{(U_{Dr} - U_{(plateau)})}$$

a t_{fu2} se rovná:

$$t_{fu2} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD2}}{I_{Gon}} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times R_G \times \frac{C_{GD2}}{(U_{Dr} - U_{(plateau)})}$$

Toto celé se děje při jednom cyklu do doby vypnutí MOSFET tranzistoru.

Vypínací proces probíhá podobně jako proces zapnutí v obráceném pořadí s některým rozdílem že:

- 1.) Neexistuje vliv zpětné diody, tzn. i žádné ztráty kvůli zotavovacím náboji.
- 2.) Rozdíl v I_{Goff} , který se spočte jako:

$$I_{Goff} = -\frac{U_{plateau}}{R_G}$$

a doba poklesu napětí U_{DS} jako:

$$t_{ru1} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD1}}{I_{Gon}} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times R_G \times \frac{C_{GD1}}{U_{(plateau)}}$$

$$t_{ru2} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD2}}{I_{Gon}} = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times R_G \times \frac{C_{GD2}}{U_{(plateau)}}$$

$$tru = \frac{tru1 + tru2}{2}$$

3.3.3 Spínací energie a ztráty

Podle předchozích úvah se dá říci, že při nejhorším případě jsou ztráty při zapnutí MOSFET tranzistoru (E_{onM}) součtem energií způsobené vnitřní strukturou MOSFETu bez vlivu zotavení (E_{onMi}) a energii způsobené zotavovacím nábojem zpětné diody (E_{onMr}):

$$E_{onM} = \int_0^{tri+tfu} U_{DS}(t) \times i_D(t) dt = E_{onMi} + E_{onMrr} = U_{DD} \times I_{Don} \times \frac{tri + tfu}{2} + Q_{rr} \times U_{DD}$$

Ztrátová energie diody obsahuje z větší části energii E_{onD} ze zotavovacího procesu:

$$E_{onD} = \int_0^{tri+tfu} U_D(t) \times i_F(t) dt \cong E_{onDrr} = \frac{1}{4} \times Q_{rr} \times U_{Drr}$$

kde U_{Drr} je napětí na diodě během doby zotavení. V nejhorším případě se může toto napětí rovnat vstupnímu napětí ($U_{Drr}=U_{DD}$).

Ztráty při přechodu MOSFET tranzistoru do vypnutého stavu lze vypočítat stejným způsobem. Vypínací ztráty diody můžeme zanedbat ($E_{offD=0}$) poté platí:

$$E_{offM} = \int_0^{tru+tfi} U_{DS}(t) \times i_D(t) dt = U_{DD} \times I_{Doff} \times \frac{tru + tfi}{2}$$

Spínací ztráty v tranzistoru a diodě jsou součtem spínacích energií a spínacích frekvencí (f_{sw}):

$$P_{swM} = (E_{onM} + E_{offM}) \times f_{sw}$$

$$P_{swD} = (E_{onD} + E_{offD}) \times f_{sw} \cong E_{onD} \times f_{sw}$$

3.3.4 Totální ztrátový výkon

Ztrátový výkon v MOSFETu a zpětné diodě lze vyjádřit součtem propustných a spínacích ztrát:

$$P_M = P_{CM} + P_{swM} = R_{DSon} \times I_{Drms}^2 + (E_{onM} + E_{offM}) \times f_{sw}$$

$$P_D = P_{CD} + P_{swD} = u_{D0} \times I_{Fav} + R_D \times I_{Frms}^2 + E_{onD} \times f_{sw}$$

$$P_{tot} = P_M + P_D$$

3.4 Hodnoty proudu a napětí měniče

Pro výpočet měniče musíme nejdříve stanovit vstupní parametry. Pro jednoduchost výpočtu zvolíme:

Vstupní napětí	$U_{in}=500V$
Výstupní napětí	$U_o=230V$
Požadovaný výkon	$P_o=10kW$
Indukčnost	$L=60mH$
Spínací frekvenci	$f_{sw}=20kHz$

Poté se výstupní proud I_o se rovná:

$$I_o = \frac{P_o}{U_o} = \frac{10000}{230} = 43,479A$$

Modulační poměr je poměrem výstupnímu ku vstupnímu napětí:

$$D = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{230}{500} = 0,46$$

Zvlnění výstupního proudu se rovná:

$$\Delta I_o = \frac{(1-D) \times U_o}{L \times f_{sw}} = \frac{(1-0,46) \times 230}{60 \cdot 10^{-3} \times 20 \cdot 10^3} = 0,1035A$$

Parametry potřebné pro výpočet ztrát mohou být stanoveny pomocí hodnoty výše spočtené:

$$I_{Don} = I_o - \frac{\Delta I_o}{2} = 43,479 - \frac{0,1035}{2} = 43,427A$$

$$I_{Doff} = I_o + \frac{\Delta I_o}{2} = 43,479 + \frac{0,1035}{2} = 43,530A$$

$$I_{Drms} = \sqrt{D} \times I_o = \sqrt{0,46} \times 43,479 = 29,479A$$

$$I_{Fav} = (1 - D) \times I_o = (1 - 0,46) \times 43,479 = 23,479A$$

$$I_{Frms} = \sqrt{1 - D} \times I_o = \sqrt{1 - 0,46} \times 43,479 = 31,950A$$

3.5 Výpočet ztrát s použitím SiC součástkami

Propustné ztráty MOSFET tranzistoru:

V katalogu není k dispozici graf odporu R_{DSon} , proto vezmeme katalogovou hodnotu $0,13\Omega$, který byl naměřen při teplotě 125° :

$$P_{CM} = R_{DSon} \times I_{Drms}^2 = 0,13 \times 29,479^2 = 112,971W$$

Propustné ztráty diody

Pro výpočet propustných ztrát diody je nutné znát hodnoty U_{D0} a R_D . Tyto hodnoty zjistíme

z charakteristiky $I_F=f(V_F)$, kde: $R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,8}{6,5}$ a U_{D0} je $0,8V$ při nulovém proudu I_F :

$$P_{CD} = u_{D0} \times I_{Fav} + R_D \times I_{Frms}^2 = 0,8 \times 23,479 + 0,123 \times 31,950^2 = 144,342W$$

Spínací ztráty

Pro výpočet spínacích ztrát chybí v katalogu hodnoty t_{fu} a t_{rv} , místo nich použijeme hodnoty ztracených energií při zapnutí a vypnutí. Pro MOSFET platí: $E_{onMi}=422\mu J$, $E_{offMi}=329\mu J$ a pro diodu: $Q_{rr}=61nC$. K energii E_{onM} musíme přičíst ještě ztracenou energii ($Q_{rr} \times U_{in}$) způsobenou přítomností diody:

$$E_{onM} = E_{onMi} + Q_{rr} \times U_{in} = 422 \cdot 10^{-6} + 61 \cdot 10^{-9} \times 500 = 452 \cdot 10^{-6} J$$

$$E_{offM} = E_{offMi} = 329 \cdot 10^{-6} J$$

$$E_{onD} = \frac{1}{4} \times Q_{rr} \times U_{in} = \frac{1}{4} \times 61 \cdot 10^{-9} \times 500 = 7,625 \cdot 10^{-6} J$$

Poté výpočet ztrát při spínání se rovnají:

$$P_{swM} = (E_{onM} + E_{offM}) \times f_{sw} = (452 \cdot 10^{-6} + 329 \cdot 10^{-6}) \times 20000 = 15,62W$$

$$P_{swD} = (E_{onD} + E_{offD}) \times f_{sw} \cong E_{onD} \times f_{sw} = 7,625 \cdot 10^{-6} \times 20000 = 0,1525W$$

Totální ztrátový výkon:

$$P_M = P_{CM} + P_{swM} = 112,97 + 15,62 = 128,59W$$

$$P_D = P_{CD} + P_{swD} = 144,342 + 0,1525 = 144,49W$$

$$P_{tot} = P_M + P_D = 128,59 + 144,49 = 273,08W$$

3.6 Výpočet ztrát s použitím Si součástkami

Propustné ztráty MOSFET tranzistoru

Odpor $R_{DS(on)}$ zvolíme podle grafu $R_{DS(on)}=f(I_D)$ v katalogu součástek. Je to odpor, který je závislý na proudu pro určité hodnoty řídicího napětí. Pro řídicí napětí U_{GS} o hodnotě 10V vychází $R_{DS(on)} 0,375\Omega$:

$$P_{CM} = R_{DS(on)} \times I_{Drms}^2 = 0,375 \times 29,479^2 = 325,780W$$

Propustné ztráty diody

Pro výpočet propustných ztrát diody je nutné znát hodnoty U_{D0} a R_D . Tyto hodnoty zjistíme

z charakteristiky $I_F=f(V_F)$, kde: $R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{2}{70}$ a U_{D0} je 0,6V při nulovém proudu I_F :

$$P_{CD} = u_{D0} \times I_{Fav} + R_D \times I_{Frms}^2 = 0,6 \times 23,479 + 0,029 \times 31,950^2 = 43,690W$$

Spínací ztráty

Hodnoty z katalogu pro MOSFET: $t_{ri}=20nS$ $R_G=7,3\Omega$

$t_{fi}=25nS$ $U_{(plateau)}=4,7V$

Hodnoty z katalogu pro diodu: $Q_{rr}=30\mu C$

Proud tekoucí kapacitou při zapínání:

$$I_{Gon} = \frac{U_{Dr} - U_{(plateau)}}{R_G} = \frac{10 - 4,7}{7,3} = 0,726A$$

Pro další výpočet potřebujeme hodnoty CGD1 a CGD2. Tyto hodnoty zjistíme z grafu $C=f(V_{DS})$ pomocí čtyřhodnotové aproximaci:

$$tfu1 = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD1}}{I_{Gon}} = (500 - 0,375 \times 43,427) \times \frac{7 \cdot 10^{-12}}{0,726} = 4,66 \cdot 10^{-9} S$$

$$tfu2 = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Don}) \times \frac{C_{GD2}}{I_{Gon}} = (500 - 0,375 \times 43,427) \times \frac{2 \cdot 10^{-9}}{0,726} = 1,33 \cdot 10^{-6} S$$

Z důvodu nelinearity kapacity CGD budeme počítat průměr těchto dvou hodnot, tak že hodnoty tfu a tru budou mít 2x větší váhu. V opačném případě by vyšla nesmyslně dlouhá doba:

$$tfu = \frac{2 \times tfu1 + tfu2}{3} = \frac{2 \times 4,66 \cdot 10^{-9} + 1,33 \cdot 10^{-6}}{3} = 446,44 \cdot 10^{-9} S$$

Pro napěťový pokles při vypínání platí obdobné vzorce:

$$I_{Goff} = -\frac{U_{plateau}}{R_G} = -\frac{4,7}{7,3} = 0,644A$$

$$tru1 = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Doff}) \times \frac{C_{GD1}}{I_{Goff}} = (500 - 0,375 \times 43,530) \times \frac{7 \cdot 10^{-12}}{0,644} = 5,26 \cdot 10^{-9} S$$

$$tru2 = (U_{DD} - R_{DSon} \times I_{Doff}) \times \frac{C_{GD2}}{I_{Goff}} = (500 - 0,375 \times 43,530) \times \frac{2 \cdot 10^{-9}}{0,644} = 1,50 \cdot 10^{-6} S$$

$$tru = \frac{2 \times tru1 + tru2}{3} = \frac{2 \times 5,26 \cdot 10^{-9} + 1,50 \cdot 10^{-6}}{3} = 503,51 \cdot 10^{-9} S$$

Tyto hodnoty nyní použijeme pro výpočet ztracených energií při spínání MOSFET tranzistoru a diody:

$$E_{onM} = U_{DD} \times I_{Don} \times \frac{tri + tfu}{2} + Q_{rr} \times U_{DD} =$$

$$= 500 \times 43,427 \times \frac{20 \cdot 10^{-9} + 446,44 \cdot 10^{-9}}{2} + 30 \cdot 10^{-6} \times 500 = 20,06 \cdot 10^{-3} J$$

$$E_{offM} = U_{DD} \times I_{Doff} \times \frac{tru + tfi}{2} =$$

$$= 500 \times 43,530 \times \frac{25 \cdot 10^{-9} + 503,51 \cdot 10^{-9}}{2} = 5,75 \cdot 10^{-3} J$$

$$E_{onD} = \frac{1}{4} \times Q_{rr} \times U_{in} = \frac{1}{4} \times 30 \cdot 10^{-6} \times 500 = 3,75 \cdot 10^{-3} J$$

$$P_{swM} = (E_{onM} + E_{offM}) \times f_{sw} = (20,06 \cdot 10^{-3} + 5,75 \cdot 10^{-3}) \times 20000 = 516,2W$$

$$P_{swD} = (E_{onD} + E_{offD}) \times f_{sw} \cong E_{onD} \times f_{sw} = 3,75 \cdot 10^{-3} \times 20000 = 75W$$

Totální ztrátový výkon

Na závěr spočteme totální ztrátový výkon podle těchto vzorců:

$$P_M = P_{CM} + P_{swM} = 325,780 + 516,2 = 841,98W$$

$$P_D = P_{CD} + P_{swD} = 43,690 + 75 = 118,69W$$

$$P_{tot} = P_M + P_D = 841,98 + 118,69 = 960,67W$$

4 Závěr

Práce obsahuje základní přehled o problematice prvků na bázi SiC. Zabývá se výrobou krystalu, krystalickou strukturou, elektrickými, chemickými vlastnostmi polovodičů. V další části se popisuje výjimečnost a možné využití materiálů.

SiC materiál má unikátní vlastnosti, se kterými může převzít úlohu klasických křemíkových součástek. Největší problémy spojené s výrobou již byly vyřešeny. Aby se začaly součástky na bázi SiC významně uplatňovat, musí si vývojáři ještě poradit s cenou výrobních nákladů. Většina součástek je vyrobena ve výzkumných laboratořích a náklady na výrobu jsou tak vysoké, že špatně konkurují součástkám s horšími parametry a nižší cenou. Dalším důvodem vysoké ceny součástek je také to, že je na trhu momentálně malý počet firem, které se zabývají vývojem a výrobou. Mezi největšími výrobci současnosti patří firmy CREE inc. a NASA Glenn. Aby se začaly SiC součástky významně uplatňovat, je nutné aby se o tuto problematiku zajímali i další velcí výrobci zařízení. V dnešní době lze najít moderní křemíkové součástky (IGBT), které dokážou pracovat při teplotě až 180°C. Toto je možná odpověď na vzrůstající konkurenceschopnost SiC.

Z výpočtu je vidět, že díky nízkým spínacím ztrátám může SiC měnič pracovat i při 20kHz, aby dosáhl vyššího totálního ztrátového výkonu. Při stejné spínací frekvenci má měnič s klasickými křemíkovými součástky přibližně 4x větší ztráty. Z výpočtu je vidět, že propustné ztráty má SiC větší než klasická křemíková součástka.

I přesto, že se nepodařilo experimentálně potvrdit kvality SiC, je z výpočtu zřejmé, že tento materiál je velmi perspektivní. Z výpočtu je vidět, že díky nízkým spínacím ztrátám může SiC měnič pracovat i při 20kHz, aby dosáhl vyššího ztrátového výkonu. Při stejné spínací frekvenci má měnič s klasickými křemíkovými součástkami přibližně 4x větší ztráty. Experimentální měření nemohlo být provedeno kvůli problémům s dodáním součástek z USA.

Použitá literatura

- [1] Yoon Soo Park: *SiC Materials and Devices*, Academic Press, London 1998
- [2] Sadow S. E.; Agarwal A.: *Advances in Silicon Carbide Processing and Applications*, Artech House, Norwood 2004
- [3] Zhe Chuan Feng; Jian H. Zhao: *Silicon Carbide: materials, processing and device*, Taylor & Francis, New York 2004
- [4] Rebeca Cheung: *Silicon Carbide Micro Electrochemical System for Harsh Environments*, Imperial College Press, London 2006
- [5] *wikipedia.org*: [online]. [cit. 14.04.2012]
URL: <http://it.wikipedia.org/wiki/Moissanite>
- [6] *wikipedia.org*: [online]. [cit. 14.04.2012]
URL: http://it.wikipedia.org/wiki/J%C3%B6ns_Jacob_Berzelius
- [7] *wikipedia.org*: [online]. [cit. 14.04.2012]
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Goodrich_Acheson
- [8] Philip G. Neudeck: *Silicon Carbide Technology [PDF]*, NASA Glenn Research Center, NASA 2006
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/publications/CRCChapter2ndEd.pdf>
- [9] *wikipedia.org*: [online]. [cit. 23.04.2012]
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_carbide
- [10] *nasa.gov*: [online]. [cit. 23.04.2012]
URL: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/SiC/RT1994mpipe.html>
- [11] *sciencedirect.com*: [online]. [cit. 23.04.2012]
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884299000115>
- [12] *cnx.org*: [online]. [cit. 24.04.2012]
URL: <http://cnx.org/content/m15758/latest/>
- [13] Graovac, D.; Purchel, M.: *MOSFET power losses calculation using the datasheet parameters – automotive power*, Infineon 2006
- [14] Carl-Mikael Zetterling: *Process technology for silicon carbide devices*, United Kingdom 2002
- [15] Gary L. Harris: *Properties of Silicon Carbide*, United Kingdom 1995
- [16] Choyke W. J.; Matsunami H.; Pensl G.: *Silicon Carbide – Recent Major Advances*, Pittsburgh 2004
- [17] Alexandr Krejčířík: *DC/DC měniče*, New York 2010
- [18] Dhanaraj, Byrappa, Prasad, Dudley: *Crystal Growth*, BEN, Praha 2001
- [19] Vondrášek F.; Langhammer J.; Peroutka A.: *Projektování výkonových polovodičových měničů – vybrané stati*, ZČU, Plzeň 2008