



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PRŮZKUM TRHU VÝKONOVÝCH POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

MARKET SURVEY OF HIGH POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Richard Gama

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Richard Gama

ID: 137367

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Průzkum trhu výkonových polovodičových součástek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Sestavte přehled trhu moderních výkonových polovodičových součástek včetně jejich řídicích jednotek a systémů chlazení. Zaměřte se na elektrické parametry a možnosti aplikace.

Na základě získaných informací porovnejte standardní součástky vyrobené na bázi křemíku se součástkami vyrobeným na bázi SiC a GaN.

Uveďte typické příklady, kde tyto nové materiály umožňují dosažení lepších parametrů zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V tejto práci rozoberiem niekoľko diskretných súčiastok a ich odlišnosti v štruktúre, statických a spínacích vlastnostiach ako aj odlišnosti v ich konštrukčných riešeniach a pri výrobnom procese. Po nich priblížim problematiku ich integrácie vo výkonový moduloch, kde sa zameriam na konštrukčné riešenia a trend. Tieto výkonové moduly sú ďalej riešené ako „systém“ resp. „zostava“, kde sa pre optimalizáciu a čo najvyššiu efektivitu celku pridáva integrácia prvkov ochrán, chladenie a riadenie. Chladenie a riadenie vybraných súčiastok je predmetom samostatnej kapitoly. Priblížim niektoré materiály, ktoré by v budúcnosti mohli nahradiť kremík, ktorý je v súčasnosti ešte stále dominantný. Tieto nové materiály majú potenciál výrazne zlepšiť elektrické a tepelné vlastnosti výkonových polovodičových súčiastok.

KLÚČOVÉ SLOVA

Výkonová elektronika, polovodič, materiál, PN prechod, tyristor, tranzistor

ABSTRACT

In this thesis I will evaluate few discrete devices and their differences in structure, static and switching characteristics and also some structural and manufacturing principles. After that I will follow up with their integration into power modules, where I will also aim on construction solutions and trends. These power modules are today delivered as „stack“ or „system“, where for optimization and highest achievable efficiency of the whole unit the integration of protection, drive and cooling stage is incorporated. Cooling and drive of some devices will be subject of a separate chapter. Also some of novel materials, which are very promising, will be introduced. They show improvement in electrical and thermal properties. They have potential to replace the currently dominant Silicon in the near future.

KEYWORDS

Power electronics, semiconductor, material, PN junction, thyristor, transistor

GAMA, R. *Průzkum trhu výkonových polovodičových součástek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2017. 61 s., 9 s. příloh. Diplomová práce. Vedúci práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na téma „*Průzkum trhu výkonových polovodičových součástek*“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zoznamu literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorská práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., tiež možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 25. Mája 2016

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Ďakujem za výbornú spoluprácu, hodnotné rady, účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc môjmu vedúcemu diplomovej práce prof. Ing. Jaroslavovi Bouškovi, CSc. Ďalej sa chcem poďakovať svojmu zamestnávateľovi firme SEMIKRON s.r.o. vo Vrbovom za podporu, pomoc a ústretovosť. V neposlednom rade svojmu okoliu za psychickú podporu. A špeciálne Šimonovi Ševčíkovi.

OBSAH

Zoznam obrázkov **iiiv**

Zoznam tabuliek **x**

1. Úvod	1
1.1 Aplikácie	1
1.1.1 Priemyselné aplikácie.....	1
1.1.2 Spotrebiteľské aplikácie	1
1.1.3 Aplikácie v doprave	1
1.1.4 Aplikácie v leteckom priemysle	2
1.2 Požiadavky	2
1.3 História	3
1.4 Rozdelenie	4
2. Súčiastky	6
2.1 Tyristor (SCR štruktúra).....	7
2.1.1 Princíp činnosti.....	7
2.1.2 Použitie.....	8
2.1.3 Modifikácie tyristora (SCR).....	8
2.2 GTO.....	8
2.2.1 Konštrukcia a princíp činnosti.....	8
2.2.2 Vypínanie	10
2.2.3 Použitie.....	11
2.3 IGCT.....	11
2.3.1 Princíp činnosti a konštrukcia	11
2.3.2 Vypínanie	12
2.3.3 Použitie.....	13
2.4 ETO	13
2.4.1 Princíp činnosti.....	13
2.4.2 Vlastnosti a zhrnutie.....	15
2.5 BJT	16
2.5.1 Konštrukcia	16
2.5.2 Spínanie.....	17
2.5.3 Použitie.....	17
2.6 Výkonový MOSFET	18
2.6.1 Konštrukcia	18
2.6.2 Výrobné technológie	19
2.6.3 Trench-Gate MOSFET	20
2.6.4 Superjunction MOSFET	20
2.6.5 Použitie.....	21
2.7 IGBT.....	22
2.7.1 Konštrukcia a vlastnosti	22
2.7.2 Princíp činnosti.....	23

2.7.3	Použitie a trend.....	24
2.8	Výkonový JFET (SIT).....	24
2.8.1	Konštrukcia	24
2.8.2	Spínanie a modulácia kanálu.....	25
2.8.3	Použitie a trend.....	27
2.9	SITh.....	27
3.	Integrácia	29
3.1	Výkonový modul.....	29
3.2	Inteligentné výkonové moduly (PIM)	31
3.2.1	Moduly s integrovaným meraním prúdu	31
3.2.2	Bočníky na meranie prúdu (current shunts)	31
3.2.3	Snímače prúdu (current sensors)	32
3.2.4	Sense IGBT moduly	33
3.2.5	Integrované meranie teploty.....	33
3.3	IPM (Intelligent Power Module)	34
3.4	PEBB	34
3.5	SMART POWER IC	35
4.	Budič (driver).....	36
4.1	Topológia	36
4.2	Budič tyristora	37
4.3	Koncový stupeň budenia BJT	38
4.4	Budenie MOS a IGBT.....	39
4.4.1	Zopnutie	39
4.4.2	Vypnutie	41
5.	Materiály, HEMT štruktúra a tranzistor	42
5.1	Súčasnosť	42
5.2	GaAs.....	42
5.3	SiC.....	43
5.4	GaN	43
5.5	Zhrnutie a trend	43
5.6	Štruktúra HEMT.....	45
5.7	Tranzistor HEMT	47
5.8	Situácia na trhu.....	48
6.	Chladenie.....	50
6.1	Chladenie vzduchom	51
6.2	Chladenie kvapalinou	51
6.3	Termosifónové chladenie	53
6.4	Chladenie prechodovou fázou média	53
7.	Záver.....	55
	Literatúra	56
	Zoznam skratiek	59

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.2	Protichodné požiadavky trhu
Obrázok 1.4.1	Časová os uvedenia na trh jednotlivých diskretných súčiastok
Obrázok 1.4.2	Grafické zobrazenie vybraných prvkov v závislosti na výkone a spínacej frekvencii
Obrázok 2.0.1	Základná SCR štruktúra.....
Obrázok 2.0.2	Tranzistorové zapojenie SCR štruktúry
Obrázok 2.1.1	Pracovné režimy tyristora.....
Obrázok 2.2.0	Konštrukčné usporiadanie gate a katódy GTO
Obrázok 2.2.1	Kapsulové balenie GTO
Obrázok 2.2.2	Zvyškový prúd GTO.....
Obrázok 2.3.1	IGCT v prevedení „kapsula“
Obrázok 2.4.0	Tranzistorové zapojenie ETO štruktúry
Obrázok 2.4.1	Spôsoby dosiahnutia tvrdej komutácie u ETO a IGCT
Obrázok 2.5.1	Rez štruktúrou výkonového BJT
Obrázok 2.5.2	Spínacia charakteristika BJT
Obrázok 2.6.1	Výkonový MOSFET v reze
Obrázok 2.6.3	a) Trench MOSFET
	b) Planárny MOSFET
Obrázok 2.6.4	Superjunction MOSFET
Obrázok 2.7.1	Štruktúra, tranzistorové zapojenie a schematická značka IGBT
Obrázok 2.7.2	Tok prúdu v IGBT
Obrázok 2.8.1	Rez štruktúrou JFET a shematická značka
Obrázok 2.8.2	Spínanie JFET pri a) $V_{GS} = 0V$ b) $V_{GS} < 0V$ c) $V_{DS} = V_{DS(sat)}$
Obrázok 2.8.3	Kaskódové zapojenie JFET
Obrázok 2.9.1	Štruktúra SITH

Obrázok 3.1.1	Výkonový modul SEMIPACK
Obrázok 3.1.2	Štruktúra substrátu
Obrázok 3.1.3	Pressfit kontakt
Obrázok 3.2.2	Bočníky na meranie prúdu
Obrázok 3.2.3	Snímač prúdu
Obrázok 3.2.4	Sense výstup
Obrázok 3.3.1	Aplikácia IPM.....
Obrázok 3.4	PEBB
Obrázok 3.5	Smart power IC.....
Obrázok 4.1.1	Bloková schéma budiča
Obrázok 4.1.2	Riadiaca elektróda napät'ovo riadených prvkov
Obrázok 4.1.3	Riadiaca elektróda prúdovo riadených prvkov
Obrázok 4.2	Jednoduchý budič tyristora a jeho riadiace prúdové impulzy.....
Obrázok 4.3	a) koncový stupeň BJT s kladným napätím prechodu báza – emitor
Obrázok 4.3	b) koncový stupeň BJT so záporným napätím prechodu báza – emitor
Obrázok 4.4.1	Spínanie a vypínanie IGBT
Obrázok 4.4.2	Spínacie straty IGBT
Obrázok 5.3	Časová os vývoja jednotlivých komponentov z SiC a ich výrobcov
Obrázok 5.5.1	Radarový graf vybraných materiálov
Obrázok 5.6.1	“Modulation doping“
Obrázok 5.6.2	Princíp vytvorenia 2DEG
Obrázok 5.7.1	GaN HEMT s kovovým kontaktom.....
Obrázok 5.7.2	MOSHMT
Obrázok 6.2	„Sendvičové“ chladenie kvapalinou
Obrázok 6.4.1	Princíp chladenia tepelnými trubičkami
Obrázok 6.4.2	Sprejové a tryskové chladenie

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1.4	Prehľad a porovnanie vybraných diskretných súčiastok
Tabuľka 4.4.1	Vypínacie a zapínacie napätové hladiny pre MOSFET a IGBT
Tabuľka 5.5	Porovnanie vlastností polovodičových materiálov
Tabuľka 6	Porovnanie typov chladenia.....

1. ÚVOD

Nie je pochýb o tom že polovodiče a ich aplikácia do bežného života zasiahli fungovanie spoločnosti ako čokoľvek iné pred nimi a významne sa zaslúžili o technologický rozvoj ľudstva. Ľudia vždy potrebovali medzi sebou komunikovať a spracovávať informácie. Táto činnosť sa vďaka aplikáciám polovodičov stala jednoduchšia a rýchlejšia ako v predchádzajúcej ére elektróniek.

1.1 Aplikácie

Musíme si uvedomiť že aplikácie výkonovej elektroniky nás obklopujú v našom živote denno-denne. Stretávame sa s nimi v dome, kancelárii, aute, nemocnici, divadle, atď..

Ako príklad typických aplikácií uvediem:

- Osvetlenie v divadle alebo v domácnosti
- Spracovateľské procesy v chemickom, papierenskom a kovospracujúcom priemysle
- Riadenia pohonu motorov od mixérov, pračiek až po výťahy a pohony lokomotív
- Napájacie zdroje pre laboratória a záložné zdroje pre zariadenia zabezpečujúce funkčnosť životne dôležitých funkcií

Základné rozdelenie aplikácie je nasledovné:

1.1.1 Priemyselné aplikácie

Pozostávajú z dvoch oblastí, riadenie pohonov a napájacích zdrojov. Riadenie pohonov motorov sa pohybuje v závislosti na ich výkone v širokom rozpätí od výkonov veľmi veľkých (napr. pohon v oceliarniach na valcovanie plechov) po výkony menšieho rozsahu (riadenie sústruhu alebo polohovanie hlavy CNC stroja). Typické priemyselné použitie spínaných zdrojov je nabíjanie batérií, indukčný ohrev, galvanické pokovovanie a zváranie.

1.1.2 Spotrebiteľské aplikácie

Pokrývajú široký rozsah aplikácií nachádzajúcich sa v domácnostiach ako audio zosilňovače, regulácia tepelného hospodárstva, ovládanie intenzity svetla, bezpečnostné systémy, riadenie motora kuchynského robota alebo príručného elektrického náradia (vrtáčka).

1.1.3 Aplikácie v doprave

Prepravné aplikácie, ako riadenie pohonov elektrických a hybridných vozidiel ako aj lokomotív. Okrem pohonov sú to aplikácie ako riadenie dopravnej prevádzky (semafory, inteligentné križovatky,..), elektronické zapalovanie a regulácia napätia vo vozidlách.

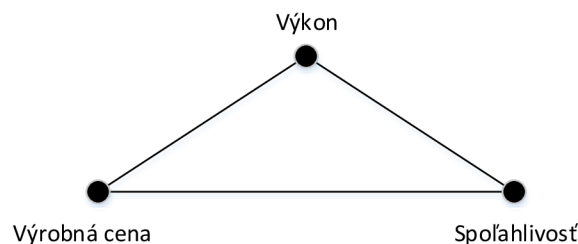
1.1.4 Aplikácie v leteckom priemysle

Letecké a obranné aplikácie zahŕňajúce nízkofrekvenčné vysielacie, napájanie pre vesmírne lety (rakety, raketoplány,..), komerčné lietadlá ako aj spínanie polovodičových relé a stýkačov.^{[2][14]}

1.2 Požiadavky

Výkonové polovodiče prechádzajú v posledných rokoch stálou evolúciou a v poslednom čase bolo objavených veľa zaujímavých súčiastok. Avšak žiadna z nich zatiaľ nedokázala splniť všetky náročné požiadavky trhu, obrázok 1.2, ktoré sú stanovené pre ideálny výkonový polovodičový prvok. Je možné ich zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- 1) Vysoká napäťová zaťažiteľnosť v blokujúcom resp. v závernom smere.
- 2) Malý zvyškový prúd vo vypnutom stave (ideálne nulový).
- 3) Veľká prúdová zaťažiteľnosť vo vodivom stave.
- 4) Malý úbytok napätia vo vodivom stave (ideálne nulový).
- 5) Krátke zapínacie a vypínacie časy (ideálne nulové).
- 6) Malý výkon na spínanie (ideálne nulový) – nevýkonové riadenie zapínania a vypínania.
- 7) Kladný teplotný koeficient odporu súčiastky vo vodivom stave.
- 8) Schopnosť znášať menovitý prúd a menovité napätie súčasne pri spínaní.
- 9) Vysoké dovolené du/dt a di/dt (ideálne nekonečné).
- 10) Odolnosť voči vysokej teplote a radiácii.
- 11) Dlhý čas medzi poruchami (ideálne nekonečný).
- 12) Prijateľná cena.^[1]



Obrázok 1.2 Protichodné požiadavky trhu

1.3 História

Na porovnanie súčasného stavu, potrebujeme aj krátky pohľad do minulosti. História výkonovej elektroniky sa datuje od použitia prvkov na báze vákua (elektróniek). Oficiálne sa zrod výkonovej elektroniky datuje do roku 1901 a to vynálezom ortuťového usmerňovača Petrom Cooperom Hewittom. Ich zástupcami sú napríklad tyratrón, čiže plynom plnená elektrónka, poznáme ju aj pod názvom plynová výbojka a bola uvedená na trh v roku 1926. V roku 1933 to bolo uvedenie ignitrónu, výbojky s ortuťovou katódou. Obe patria do skupiny regulovateľných výbojok spolu s ortuťovými výbojkami s mriežkou, excitrónmi a senditrónmi. V rokoch štyridsiatych to boli magnetické zesilňovače s nasýteným jadrom v rokoch štyridsiatych.

Čo sa týka rozvoja aplikácií výkonovej elektroniky v tomto období, v roku 1930 metro v New Yorku použilo ortuťové výbojky s mriežkou na usmernenie pre riadenie jednosmerných pohonov (3 MW). Nemecké železnice v 1931 použili na riadenie pohonov cyklokonverter s ortuťovými výbojkami. V roku 1934 Loganova elektráreň v USA ako prvá použila tyratrónový cyklokonverter na riadenie jednosmerného pohonu pomocou zmeny frekvencie.

Éra súčasnej modernej výkonovej elektroniky sa začala písať vynálezom tyristora. V angličtine známeho ako SCR- silicon controlled rectifier, čo v slovenčine môžeme preložiť ako riadený kremíkový usmerňovač.

Predchádzalo jej vynájdenie bipolárneho tranzistora v Bellových laboratóriách (BTL Bell Telephone Laboratory) v roku 1948. To slúžilo ako základ a stalo sa významným podnetom pre ďalší výskum v oblasti polovodičových súčiastok, aby prišlo k nahradeniu objemných elektróniek (vákuové, ortuťové,...) oveľa menšími a efektívnejšími zariadeniami na báze polovodičov.

SCR bol prvý krát teoreticky navrhnutý Wiliamom Shockleym v roku 1950. Teória jeho popisu bola publikovaná a zdokonalená v niekoľkých prácach. Tie najznámejšie, ale nie jediné sú od J.J. Ebersa a špeciálne od J.L. Molla. V roku 1956 prišlo k jeho praktickej realizácii inžiniermi v GE (General Electric). Stojí za ním tím vedený Gordonom Hallom. Jeho komerčný úspech v roku 1957 je pripisovaný Frankovi W. "Billovi" Gutzwillerovi. Dá sa povedať že od tohto roku sa datuje éra modernej výkonovej elektroniky. Odvtedy výkonová elektronika kontinuálne rastie, hlavne s ohľadom na použitie v aplikáciách meničoch a striedačoch ktoré sú pre ňu kľúčové.

V niektorej literatúre sa SCR a tyristor rozlišujú ako dve rôzne súčiastky. V tejto práci ich budeme považovať ako jednu a tú istú súčiastku. ^[28]

1.4 Rozdelenie

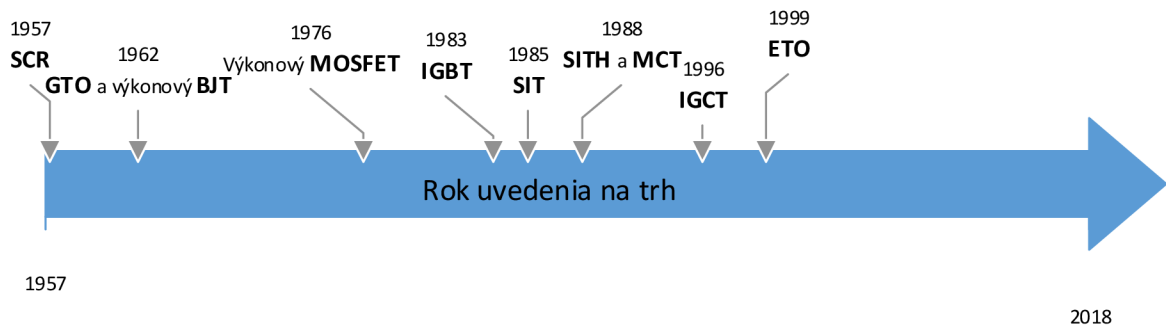
Pre lepšie pochopenie si éru modernej výkonovej elektroniky rozdelíme do štyroch generácií:

- *Prvá generácia* - trvajúca približne 17 rokov, kedy prevládali hlavne zariadenia na báze tyristora, je definovaná ako éra tyristora.
- *Druhá generácia* - trvajúca približne 10 rokov bola tvorená samoregulovateľnými výkonovými súčiastkami ako výkonový bipolárny tranzistor, výkonový MOSFET a GTO, ktoré sa objavovali spolu s integrovanými obvodmi, mikroprocesormi a ASIC čipmi.
- *Tretia generácia* - a jej najdominantnejšia súčiastka IGBT tranzistor, ktorý sa po uvedení na trh stal významnou súčasťou histórie výkonovej elektroniky. Navyše prvky ako SIT, inteligentné výkonové moduly (IPM) a výkonné signálové procesory DSP boli na vzostupe.
- *Štvrtá generácia* - predstavuje súčiastky ako IGCT, ETO, cool MOS a meniče v integrovanej forme ako PEBB (power electronics building block).^{[2][7][26]}

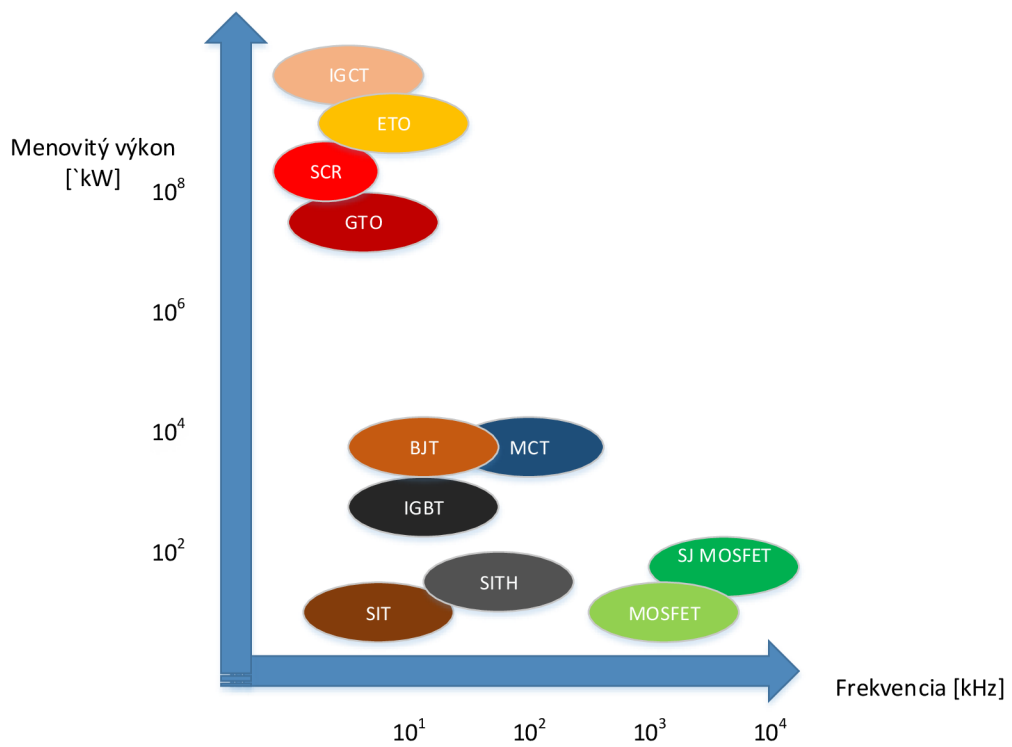
Ich prehľadné znázornenie vidíme v tabuľke 1.4 a na časovej osi obrázku 1.4.1.

Tabuľka 1.4 Prehľad a porovnanie vybraných diskretných súčiastok

Súčiastka	Rok uvedenia	Menovité napätie [V]	Menovitý prúd [A]	Spínacia frekvencia [kHz]	Menovitý výkon [kW]	Úbytok napätia [V]
Tyristor (SCR)	1957	7 000	3 500	0,5	100 000's	1.5-2.5
Triak	1958	1 000	100	0,5	100's	1.5-2
GTO	1962	4 500	3 000	2	10 000's	3-4
BJT (Darlington)	1962	1 200	800	10	1 000	1.5-3
MOSFET	1976	500	50	1000	100	3-4
IGBT	1983	1 200	400	20	100's	3-4
SIT	1985	1 200	300	100	10's	10-20
SITH	1988	1 500	300	10	10's	2-4
MCT	1988	3 000	2 000	20-100	10 000's	1-2
IGCT	1996	6 000	4 000	1	100 000's	1.5-3
ETO	1998	6 000	5 000	2	100 000's	1-2.5



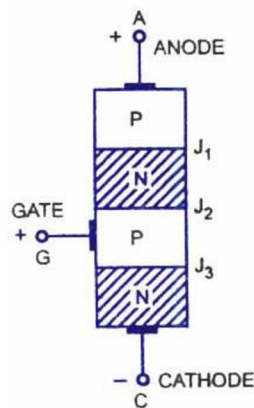
Obrázok 1.4.1 Časová os uvedenia na trh jednotlivých diskretných súčiastok



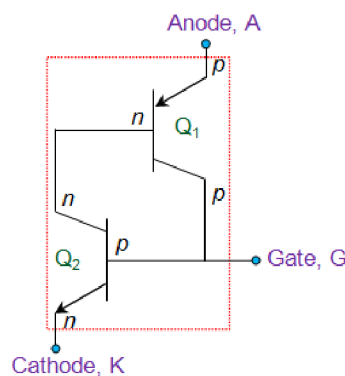
Obrázok 1.4.2 Grafické zobrazenie vybraných prvkov v závislosti na výkone a spínacej frekvencii

2. SÚČIASTKY

V tejto kapitole predstavím jednotlivé prvky zo štyroch generácií. Poradie je dané technologickým základom. Začnem tyristorom a prejdem k jeho plne riadeným nasledovníkom ako GTO, IGCT, ETO a MCT ktorých základom je práve tyristorová štruktúra (SCR) na obrázku 2.0.1. Ako bipolárne súčiastky (k vodivosti prispievajú obe polarities náboja) majú zapínacie mechanizmy ako aj pomery v zapnutom stave sú v základných princípoch rovnaké, Preto ich definujem pre SCR a ďalej sa budem zaoberať rozdielmi ktoré sú dominantné pri vypínaní. Tie vysvetlím na ekvivalentnom tranzistorovom zapojení SCR štruktúry z obrázku 2.0.2. Pokračovať budem tranzistorami BJT, MOSFET, SIT, SITH. V niektorých pasážach sa teda vzhľadom na podobnosť budú jednotlivé informácie o týchto súčiastkach prelínať.



Obrázok 2.0.1 Základná SCR štruktúra^[26]



Obrázok 2.0.2 Tranzistorové zapojenie SCR štruktúry^[26]

2.1 Tyristor (SCR štruktúra)

2.1.1 Princíp činnosti

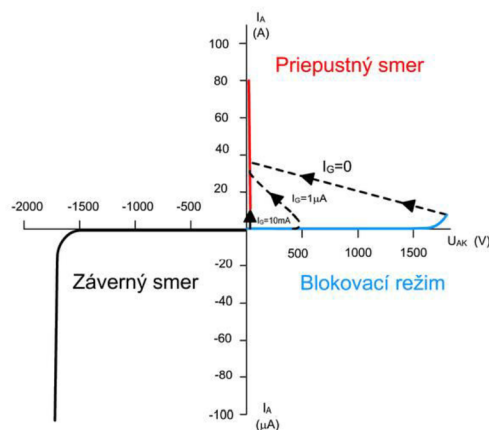
Patrí medzi čiastočne riadené súčiastky, tj. je zapnutý riadiacim signálom a jeho vypnutie je určené elektrickým obvodom, čiže zostáva zapnutý pokiaľ prúd v priepustnom smere neklesne pod určitú hodnotu, definovanú tzv. pridrzným prúdom (holding current). Pozostáva zo štyroch polovodičových vrstiev, teda troch PN prechodov (J1, J2, J3). Má tri terminály nazývané anóda, katóda a gate.

Prechod J1 plní funkciu záverného prechodu a prechod J2 funkciu blokovacieho prechodu. Blokovacia schopnosť súčiastky (parameter V_{DRM}) je preto určená prechodom J2. Operuje v troch režimoch ako ukazuje obrázok 2.1.1:

Blokovací režim v priepustnom smere (stav vypnutia)

Vodivý režim v priepustnom smere (stav zapnutia)

Blokovací režim v závernom smere (stav vypnutia)



Obrázok 2.1.1 Pracovné režimy tyristora^[33]

Ak je anóda (vrstva P) polarizovaná kladne voči katóde (vrstva N), a tečie kladný prúd I_{FG} (forward gate current) na riadiace hradlo gate, dochádza k injekcii dier z gate-u, čo kladne polarizuje P-vrstvu katódového prechodu J3. Dôsledok toho je emisia elektrónov z katódy smerom k anódovému terminálu, nastáva šírenie plazmy a do vodivého stavu sa dostáva aj okolie. Toto vynúti injekciu dier z anódy do bázy. Táto injekcia dier a elektrónov pokračuje až kým štruktúra nepriđe do vodivého stavu.

Z ekvivalentného zapojenia tranzistorov je to jednoducho prúd na gate tranzistora Q2 ktorý ho zapne, to spôsobí zopnutie tranzistora Q1 a tým sa medzi nimi vytvorí kladná spätná väzba. Pre tyristorovú štruktúru to znamená prechod do stabilného zapnutého stavu. Z praktického hľadiska je dôležité že tyristorová štruktúra v zapnutom stave vykazuje úbytok napätia v priepustnom smere ktorý zodpovedá len jednému PN prechodu.^{[2] [26]}

2.1.2 Použitie

Tyristor (SCR) sa používa len v meničoch veľkých výkonov (vyše 1MW) so sieťovou komutáciou - usmerňovačoch, cyklokonvertoroch, statických kompenzátoroch účinníka, meničoch pre jednosmerné vedenia atď. Maximálne dosiahnuteľné prúdové a napäťové parametre tyristorov sú 5kA, 6,5 kV (prípadne až do 10kV).^[1]

2.1.3 Modifikácie SCR tyristora

Z tyristora (SCR) sa rôznymi konštrukčnými zmenami vyvinuli viaceré súčiastky, uvediem pár z nich:

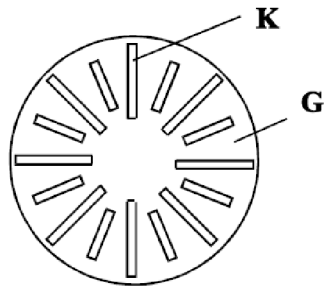
- *RCT* - **Spätne priepustný tyristor** (z anglického Reverse Conducting Thyristor). Navonok sa prejavuje ako antiparalelná kombinácia tyristora a diódy. Dióda sa pritom nachádza na tom istom polovodičovom kryštáli ako tyristor a je od neho oddelená len medzivrstvou PNP. Má dobré dynamické parametre.
- *ASCR* - **Asymetrický tyristor** (z anglického Asymmetrical SCR). Dizajn tohto tyristora zahŕňa kompromisy medzi rôznymi parametrami, ako napríklad blokovacie napätie v priepustnom alebo závernom smere, zapínací a vypínací čas a úbytok napätia v smere priepustnom.
- *LASCR* - **Svetlom aktivovaný SCR** (z anglického Light Activated SCR, resp. poznáme ho aj pod názvom LTT Light Triggered Thyristor).
- *Triak* - **Triódový spínač striedavého prúdu** (z anglického Triode Alternating Current Switch). Vlastnosťami približne zodpovedá dvom antiparalelne zapojeným tyristorom, ktorých riadiace elektródy sú prepojené do jednej.^{[5][7]}

2.2 GTO

2.2.1 Konštrukcia a princíp činnosti

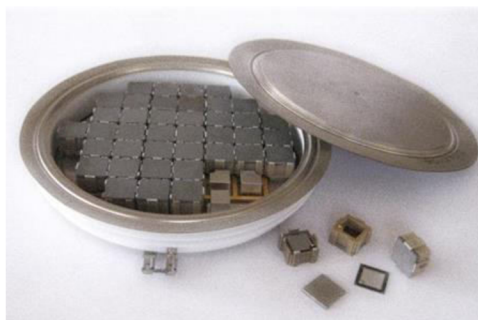
GTO tyristor (Gate Turn-Off Thyristor) pozostáva zo štyroch polovodičových vrstiev typu P a N, a má tri PN prechody (podobne ako SCR). Základnou odlišnosťou od SCR je možnosť jeho riadeného vypnutia privedením negatívneho pulzu na hradlo „gate“. Vypnutie je najkomplikovanejší proces tyristorovej štruktúry.

Na rozdiel od tyristora, konštrukčné usporiadanie GTO aj IGCT má rozčlenenú katódu (N vrstva), pozostáva z úzkych katódových (emitorových) prvkov tzv. „prstov“, z ktorých je každý obklopený hradlom gate, ako je znázornené na obrázku 2.2.0.



Obrázok 2.2.0 Konštrukčné usporiadanie gate a katódy GTO^[1]

Obrázok 2.2.1 ukazuje jeho prevedenie v tvare kapsule. Tento typ púzdra je najlepšie riešenie z hľadiska veľkej prúdovej zaťažiteľnosti, kedy je čip, resp. matica čipov kontaktovaná zvrchu aj zospodu veľkou kovovou plochou (veko), pre minimálny odpor puzdra sa používa Ag alebo Au vrstva. Jeho výhodou je taktiež nízky koeficient tepelnej rozťažnosti a vysoká účinnosť chladenia. Obojstranný tlakový kontakt cez pružinu je taktiež spoľahlivejší ako priskrutkovanie v prípade výkonového modulu.



Obrázok 2.2.1 Kapsulové balenie GTO^[7]

Na dnešnom trhu existuje (tak ako pri SCR) niekoľko druhov GTO, či už so symetrickými alebo asymetrickými vlastnosťami, ktoré sa prispôbujú konkrétnej aplikácii. Symetrické GTO s identickými priepustnými a blokovacími schopnosťami majú o poznanie nižšie záverné blokovacie napätie (typicky od 20 do 25 V). Sú použité buď v aplikáciách kde táto hodnota nie je dosiahnutá alebo prekročená, respektívne je k nemu antiparalelne pripojená dióda, ako napríklad v meničoch prúdu, ale ich vypínacie časy sú pomalšie. Väčšmi používané asymetrické GTO, majú nižší úbytok napätia v priepustnom smere a stabilnú teplotnú charakteristiku.^{[1][7][13]}

Ďalej sa zaoberáme iba štruktúrou asymetrických GTO.

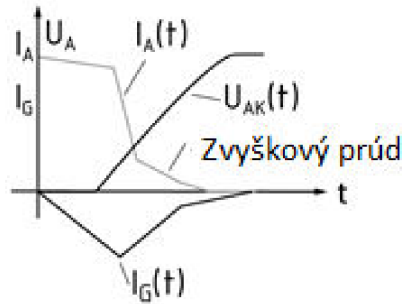
2.2.2 Proces vypínania

Na vypnutie GTO, je potrebné záverne polarizovať gate voči katóde. Tým dosiahneme vytvorenie kladnej spätnej väzby medzi Q2 a Q1. V dôsledku toho sú diery v P vrstve hradla gate, aj diery injektované z anódy odvedené záverným prúdom hradla gate I_{RG} (reverse gate current) a prechod J3 prechádza do vypnutého stavu. Zaniká katódový prúd. Nedeje sa tak však skokovo, tento dej trvá niekoľko mikrosekúnd. Potrebný prúd pre vypnutie GTO je relatívne veľký. Napríklad GTO pre menovité hodnoty napätia a prúdu 4000V a 3000A potrebuje záporný vypínací prúd o veľkosti 750A. Čiže vypínací zisk (zosilnenie) GTO je relatívne malé a pohybuje sa v rozmedzí medzi 3 a 5. Pre vysokú hodnotu vypínacieho prúdu sú GTO používané hlavne pre nízko výkonové aplikácie. Na druhej strane, počas vodivého stavu sa GTO vykazujú nízky úbytok napätia v priepustnom smere. GTO má vyššiu spínaciu rýchlosť ako tyristor a vyššie menovité hodnoty napätia a prúdov ako výkonové tranzistory.

Pri vypínaní nastávajú nežiaduce javy, ktoré spôsobuje konštrukčné usporiadanie GTO, kedy „prsty“, teda jednotlivé časti prechodu J3 nevypínajú presne súčasne. Toto postupné vypínanie má za následok koncentráciu katódového prúdu do stále užších kanálov, resp. až prúdových vlákien. Je to nežiaduci jav, nazývaný **filamentácia** alebo „priškrcovanie“ prúdových dráh. Dochádza pri ňom k lokálnemu prehrievaniu, ktoré môže zapríčiniť tepelné zničenie tyristorovej štruktúry. Iba ich úplné uzavretie vedie k definitívnemu zániku katódového prúdu. Súčasne vzrastá záverne blokovacie napätie na prechode J2.

Na obmedzenie filamentácie sa paralelne k súčiastke pripájajú tzv. odľahčovacie obvody (anglicky turn-off snubber). Jeho základom je nenabitý kondenzátor, ktorý odvedie časť vypínacieho prúdu mimo súčiastku a teda nám obmedzí strmosť (dV/dt) nárastu blokovacieho napätia na prechode J2. V niektorých prípadoch sa používa aj odľahčovací obvod pre zapínanie (turn-on snubber). To je vlastne sériovo predradená tlmivka na spomalenie strmosti nárastu prúdu (di/dt) a týmto sa dosiahne väčších hodnôt prúdu až v čase, keď napätie medzi anódou a katódou klesne. Jej zaradenie zníži straty prvku pri zapínaní a pri vypínaní tlmivka veľkosť strát neovplyvní.

Po zániku katódového prúdu je však GTO štruktúra ohrozená ešte jedným nežiaducim javom. Je ním tzv. „**zvyškový prúd**“ (anglicky tail current), jeho priebeh je na obrázku 2.2.2. Je spôsobený nosičmi náboja ktoré z anódovej N vrstvy difundovali do ochudobnenej oblasti prechodu J2. Tento prúd preteká z anódy do riadiacej elektródy gate a odtiaľ (zdrojom riadiacich impulzov) do katódy. Prítomnosť voľných nosičov v ochudobnenej oblasti prechodu J2 v dobe prietoku zvyškového prúdu môže spôsobiť že gradient elektrického poľa v tejto oblasti vzrastie natoľko, až vyvolá nárazovú ionizáciu vedúcu k zničeniu prechodu J2 a tým aj celej súčiastky. Tento jav poznáme ako lavínový prieraz (angl. dynamic avalanche alebo avalanche breakdown). Riešenie spočíva v technologických úpravách zameraných na zmenšenie počtu voľných elektrónov v anódovej N vrstve, resp. ich urýchlenom odvedení k anóde. Zvyškový prúd preteká v dobe kedy (anódové) blokovacie napätie dosiahlo pomerne významnej hodnoty. Výkonová strata týmto spôsobená nám ohrieva súčiastku a degraduje jej vypínaciu schopnosť. ^{[1][5][13][26]}



Obrázok 2.2.2 Zvyškový prúd GTO

2.2.3 Použitie

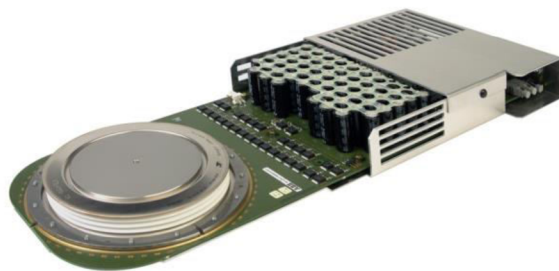
Ich použitie je výhodné iba v meničoch s výkonmi nad 100kW, kde je potrebné vypínať nenulový prúd. Parametre GTO v súčasnosti už len málo zaostávajú za obyčajnými tyristormi a dosahujú hodnoty 6kA, 6kV. Hlavná oblasť ich použitia je v meničoch pre striedavé pohony, zdrojoch nepretržitého napájania, statických kompenzátoroch jalového výkonu, meničoch pre pohon ventilátorov, kompresorov, čerpadiel atď.^[1]

2.3 IGCT

2.3.1 Princíp činnosti a konštrukcia

IGCT (z anglického Integrated Gate Commutated Thyristor) čiže tyristor komutovaný integrovaným hradlom je štvorvrstvová polovodičová súčiastka s rovnakým zoradením polovodičových vrstiev ako u klasického tyristoru a GTO. IGCT sa vyvinul z GTO. Za jeho vývojom stojí firma ABB SEMICONDUCTORS, AG (sídlo Lenzburg, Švajčiarsko) v roku 1993. Od tej doby je neustále zdokonaľovaný. Súčiastka IGCT v sebe kombinuje hlavné výhody tyristoru (malý úbytok v priepustnom smere, malé straty spôsobené priepustným prúdom) s výhodami tranzistoru, resp. súčiastky IGBT ako výhodný spôsob spínania bez nutnosti použitia odľahčovacích obvodov.

Logicky ho môžeme rozdeliť na GCT (tyristorová štruktúra) a integrované hradlo (budiaci stupeň ktorý je súčasťou výkonovej časti). Tak isto ako u GTO aj u IGCT je preferované kapsulové balenie. Čiže navonok vyzerá presne ako GTO, ale s integrovanými obvodmi riadiacej elektródy, vzdialenosť ktorej od výkonového prvku by nemala byť väčšia ako 15 cm, ako je zrejme z obrázku 2.3.1.



Obrázok 2.3.1 IGCT v prevedení „kapsula“^[32]

Hlavná odlišnosť je rýchlosť vypínacieho procesu. Riadiaca elektróda je integrovaná z dôvodu „tvrdej komutácie“ (tj. extrémne rýchleho vypínania). Je to z dôvodu potreby extrémnej strmosti nárastu riadiaceho vypínacieho prúdu hradla gate I_{RG} (reverse gate current) a z toho vyplývajúcej požiadavky na extrémne nízku hodnotu rozptylovej (vlastnej) indukčnosti dráhy prúdu I_{RG} (tj. obvod riadiacej elektródy zahŕňajúci zdroj riadiacich vypínacích impulzov a jeho prívody). Hodnoty parazitných indukčností sa pohybujú rádovo v oblasti jednotiek nanohenry (nH). Celú situáciu komplikuje malá hodnota napätia riadiacej elektródy pri vypínaní, ktorá dosahuje hodnotu iba 20V (aj keď ide o zvýšenie oproti GTO z 15 na 20 V a korešponduje s hodnotou napájacieho napätia budiča) a je daná požiadavkou na malé napäťové namáhanie prechodu báza - emitor tranzistoru Q2. Výstupné napätie budiča pre zapínanie súčiastky dosahuje 5 V. Veľkosť napätia na výstupe budiča zásadným spôsobom ovplyvňuje dosiahnuteľnú strmosť prúdu a v súčasnosti sa pracuje na vývoji prvku s napätím riadiacej elektródy až 70 V. Zvýšenie tohto napätia má zásadný význam najmä u súčiastok pre najväčšie prúdy.

2.3.2 Vypínanie

Vypínanie sa deje tzv. „tvrdou komutáciou“. Strmosť riadiaceho prúdu pri tvrdej komutácii je veľká (dosahujúca hodnôt viac ako 3 000 A/ μ s), čo spôsobí že skôr ako sa výrazne zmení rozloženie nábojov na jednotlivých prechodoch GCT štruktúry, je celý anódový prúd skokovo prevedený do riadiacej elektródy gate (teda je „komutovaný hradlom gate“ odtiaľto je odvodený aj anglický názov súčiastky). Tým je spodný tranzistor Q2 v podstate skokovo vyradený a vypínanie je závislé iba na tranzistore Q1. Toto je principiálny rozdiel oproti GTO. Pri vypínaní IGCT sa teda tyristorová štruktúra správa ako tranzistorová štruktúra, definovaná PNP štruktúrou tranzistora Q1 a to prináša značné výhody.

Pri vypínaní tvrdou komutáciou nedochádza vo vnútri štruktúry k filamentácií. Prierez kremíkovej doštičky je zaťažovaný rovnomerne, takže maximálny dovolený prúd súčiastkou vzrastá bez toho aby pri vypínaní boli niektoré oblasti prierezu tepelne preťažované. To znamená že tvrdá komutácia zväčšuje plochu tzv. bezpečnej pracovnej oblasti pri vypínaní. (Reverse Bias Safe Operating Area – RBSOA).

Tvrdou komutáciou sa pri vypínaní skracuje doba oneskorenia (tj. doba presahu), doba poklesu prúdu (fall time) aj doba doznievania zvyškového prúdu (tail time). Tým narastá rýchlosť, čo znamená že súčiastka môže pracovať s vyššou spínacou frekvenciou. Tak isto sa

zvyšuje jej odolnosť k parametru dV/dt (nie je obmedzená strmouš nárastu blokovacieho napätia na prechode J2). Súhrn týchto benefitov vedie k možnosti pracovať bez odľahčovacích obvodov (turn-off snubber), ktorý sa pri GTO vyžaduje. Nakoľko vypínacie doby sú u IGCT 1 až 3 μs , čo je zhruba pätina vypínacieho času GTO. Doba zapnutia IGCT je približne 1 až 1,5 μs . Preto je niekedy pri zapínaní potrebné použiť predradnú tlmivku (turn-on snubber) ako pri GTO na obmedzenie di/dt na menej ako 1 000 A/ μs .

2.3.3 Použitie

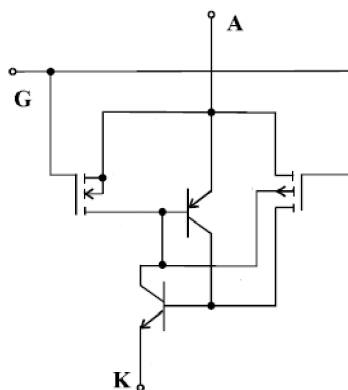
Robustnosť prvku IGCT je z hľadiska prúdového namáhania daná najmä veľkou hodnotou I_2t (Množstvo energie prepustené poistkou pri poruche) a veľkou hodnotou neopakovateľného špičkového prúdu. Vďaka tomu je možné menič IGCT chrániť bežnou rýchlou poistkou. Vlastnosti spínacieho prvku IGCT dovoľujú ich použitie pri frekvenciách do 2 kHz, čo je výrazný posun oproti GTO. Veľkosť spínacej frekvencie je u IGCT obmedzená iba schopnosťou odvodu stratového tepla. V krátkych časových intervaloch je IGCT schopný pracovať frekvenciou až 20 kHz, ale iba dotedy, pokiaľ sa nezvyší teplota štruktúry na kritickú hranicu, tj. asi 140 °C. Vďaka tejto spínacej frekvencii nemôže IGCT konkurovať IGBT v meničoch pre nižšie výkony, kde je frekvencia spínania často vyššia ako 10 kHz. V oblasti meničov pre stredné a vyššie výkony je však frekvencia IGCT meničov porovnateľná s hodnotami, ktoré sa používajú u meničov IGBT. Z hľadiska princípu činnosti IGBT a IGCT je jasné že príkon budiča IGCT bude oproti príkonu budiča IGBT vyšší. Príkony budičov IGBT sú približne 10 W, zatiaľ čo príkony budičov IGCT dosahujú hodnoty 100 W. Aj napriek tomu sa však vďaka zrýchleniu procesu vypínania znížil príkon budiča IGCT asi na 50% hodnoty príkonu budiča GTO. Riadiace jednotky pre IGCT môžu byť napäťové alebo optické.

Parametre IGCT sú približne 5kV a 3.5kA. Je možnosť ich sériového zapojenia. Z tohto je zrejmé že je vhodný pre oblasť vysokonapäťových meničov pre najväčšie výkony. Hlavná oblasť ich použitia je v meničoch pre striedavé pohony, zdrojoch nepretržitého napájania, statických kompenzátoroch jalového výkonu, meničoch pre pohon ventilátorov, kompresorov, čerpadiel atď. V súčasnej dobe je vyvíjaný IGCT pre napätie 10 kV. Nakoľko sa tento prvok uplatní v praxi, závisí najmä na záujme zákazníkov. ^{[1] [2] [13][14]}

2.4 ETO

2.4.1 Princíp činnosti

ETO tyristor (z anglického Emitter Turn Off Thyristor), je ďalšou zo zaujímavých perspektívnych výkonových súčiastok. Jedná sa o druh tyristora, ktorý využíva k svojmu zapnutiu a vypnutiu MOSFET a teda kombinuje výhody MOSFETu a GTO. Vývoj súčiastky ETO je predovšetkým spätý so špičkovými pracoviskami polytechnického ústavu a univerzity Virginia Polytechnic Institute and State University v Blackburgu, v západnej časti štátu Virgínia (USA). Prvá generácia vyvinutá v roku 1999 však mala obmedzenia zabraňujúce použitiu pre veľké výkony. Na obrázku 2.4.0 vidíme jeho tranzistorové zapojenie.

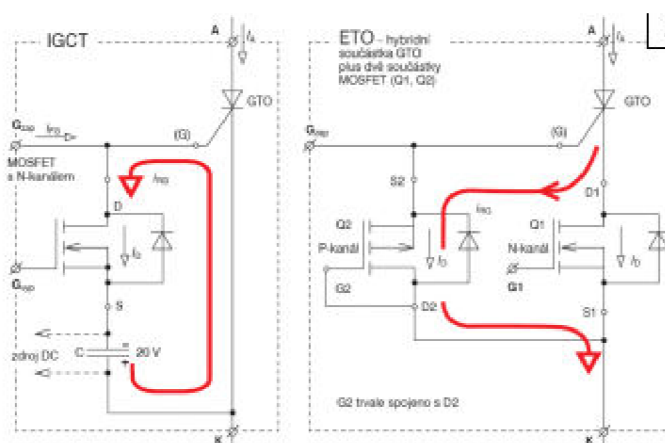


Obrázok 2.4.0 Tranzistorové zapojenie ETO štruktúry^[1]

ETO sa od IGCT líši iba spôsobom vypínania, ktorý vysvetlím porovnaním s IGCT z obr. 2.4.1. U ETO, ako aj pri IGCT je vypnutie dosiahnuté tvrdou komutáciou, kedy celý anódový prúd neprechádza prechodom J3 ale hradlom gate a mení sa na riadiaci vypínací prúd I_{RG} . Nazýva sa aj vypínanie s jednotkovým prúdovým zosilnením (unity-gain turn-off), ktoré je určené vzťahom 2.4.1:

$$\frac{I_A}{I_{RG}} = 1 \quad [6] \quad (2.4.1)$$

U klasických GTO tento pomer dosahuje čísla 3 až 5.



Obrázok 2.4.1 Spôsoby dosiahnutia tvrdej komutácie u ETO a IGCT^[6]

Pri IGCT je zdrojom riadiaceho vypínacieho prúdu I_{RG} kondenzátor C, ktorý však smie byť nabitý maximálne na 20V, aby PN prechod J3 nebol ohrozený pierazným záverným napätím. K prietoku prúdu I_{RG} a tým k vypnutiu tyristorovej štruktúry dôjde v dôsledku zapnutia N-kanálového MOSFET tranzistora. Na rozdiel od toho v súčiastke ETO je anódový prúd I_A zvedený do riadiacej elektródy gate ako prúd I_{RG} pôsobením vlastnej indukčnosti silových prívodov v okamžiku vypnutia N-kanálového MOS spínača. Z toho vyplýva aj menšia požiadavka na indukčnosť pre dráhu I_{RG} ako pri IGCT. U ETO sú MOS spínače (N-

kanál) a (P-kanál) komplementárne, čiže zapnutie jedného je podmienené vypnutím druhého a aj napätie na nich medzi source a drainom vo vypnutom stave musí byť rovnaké. V zapnutom stave štruktúry vedie Q1, vypnutie sa zrealizuje odobratím kladného napätia z hradla gate. Pri vypínaní vedie Q2. Oba spínače sú integrované a k tyristorovej štruktúre pripojené cez PN prechod J3, Napätie na nich je veľmi malé, napäťové zaťaženie U_{AK} preberá tyristorová štruktúra. ^{[2][13][14]}

2.4.2 Vlastnosti a zhrnutie

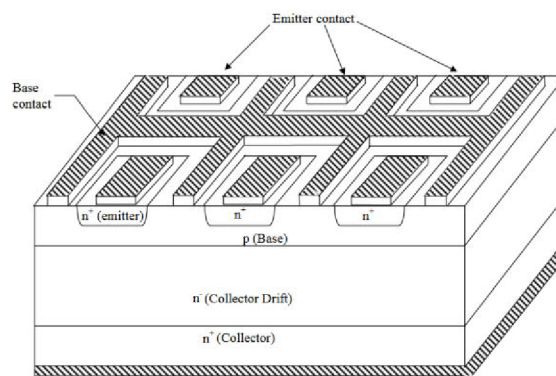
ETO tak isto ako IGCT nevyžaduje použitie odľahčovacích dV/dt obvodov (turn-off snubber). V reálnych aplikáciách sa zvyčajne tento snubber používa, keďže znižuje straty pri vypnutí zariadenia a zvyšuje jeho spoľahlivosť. Pri turn-off (dV/dt) snubberi v porovnaní s bezsnubberovým riešením má ETO nižší čas presahu t_S (storage time - čas medzi 10% hodnotou záporného hradlového prúdu I_{GR} až po pokles anódového prúdu I_A na 90% počiatkovej hodnoty) a kratší čas zániku prúdu, pretože prúd začne klesať ihneď, ako začne stúpať anódové napätie. Kompaktná štruktúra ETO tak isto vyžaduje nízku indukčnosť slučky riadiacej elektródy (okolo 10 nH) táto požiadavka je však o trochu voľnejšia ako pri IGCT ale stále vyššie ako pri GTO. Predpokladá sa, že po vylepšení jeho základných vlastností spôsobí veľké zmeny vo výbere súčiastok a bude dominantnou súčiastkou pre nasledujúcu generáciu výkonových elektronikov. ^{[1][9][10][13][14]}

Na trhu je k dispozícii mnoho iných zariadení ako výrobky alebo na úrovni výskumu a vývoja. Spomeniem napríklad MCT alebo ECT. Všetky z nich sú viac či menej hybridné verzie hore uvedených súčiastok a vývojom nových hybridných verzií sa vynakladá úsilie na dosiahnutie vyšších nominálnych hodnôt prúdov a napätí, lepšie spínacie charakteristiky a znížené straty pri prepínaní.

2.5 BJT

2.5.1 Konštrukcia

Výkonový bipolárny tranzistor (z anglického BJT Bipolar Junction Transistor) je prvá polovodičová súčiastka, ktorá umožnila riadené vypnutie a zapnutie (vynájdená v decembri 1947). BJT boli dlho používané iba na signálovej úrovni. Konštrukcia a pracovná charakteristika výkonového BJT sa výrazne líši od jeho signálového náprotivku. Vzhľadom na to že výkonové tranzistory sú prevažne typu NPN, a v zapojení so spoločným emitorom, v nasledujúcej časti rozoberiem konštrukciu iba tohto zapojenia. Výkonový tranzistor NPN má vertikálnu štruktúru striedajúcich sa vrstiev P a N, ktorá je zrejmá z obrázku 2.5.1.

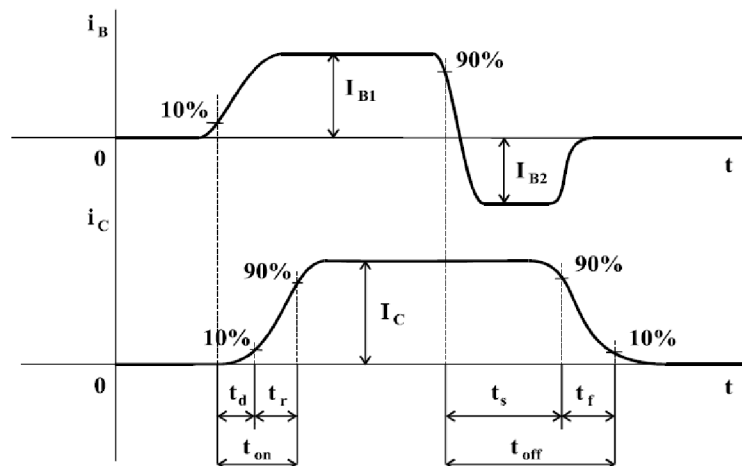


Obrázok 2.5.1 Rez štruktúrou výkonového BJT^[3]

Pre výkonové tranzistory sa preferuje vertikálna konštrukcia, ktorá má výhodu v tom že maximálne využíva plochu prierezu čipu, čím sa znižuje odpor prvku v zapnutom stave a tým aj jeho stratový výkon, resp. môžeme dosiahnuť pri tých istých podmienkach vyššej prúdovej hustoty. Na jej dosiahnutie potrebujeme vysokú hodnotu prúdového zosilňovacieho činiteľa β (tj. dosiahnutie čo najnižšieho riadiaceho prúdu na bázu) Kvôli tomu je dotácia emitorovej oblasti (hrúbka typicky okolo 10 μm s dotáciou 10^{19}) o niekoľko rádov vyššia ako dotácia bázy. Na dosiahnutie vysokých záverných napätí je pridaná nízko dotovaná kolektorová driftovej oblasti (typicky s hrúbkou 50-200 μm a dotáciou 10^{14}) medzi vysoko dotovaný kolektor (hrúbka typicky 250 μm s dotáciou 10^{19}) a stredne dotovanú oblasť bázy (hrúbka okolo 20 μm s dotáciou 10^{16}). Tento rozdiel v koncentrácií nám potom poskytne pomocou modulácie (zväčšenia intenzity) elektrického poľa (a tým aj napätia) na rozhraní PN prechodu v oblasti priestorového náboja. Tento efekt umožní súčiastke zniesť vyššie záverné napätie. V priepustnom smere sa pridanie nízko dotovanej (intrizickej, čo je rovné charakteru čistého Si) vrstvy neprejaví signifikantným zvýšením prahového napätia, nakoľko táto oblasť bude zaplavená majoritným nábojom z vysoko - dotovanej vrstvy kolektora. V praxi majú výkonové bipolárne tranzistory svoje emitory a bázy prepletené ako úzke prúžky. To je nevyhnutné na zabránenie current crowdingu.^{[1][2][5]}

2.5.2 Spínanie

Čo sa týka spínacích charakteristík výkonového bipolárneho tranzistora, sú obdobné ako pri jeho malosignálovom náprotivku. Tranzistor v spínacom režime prechádza zo zapnutého stavu do vypnutého a naopak. Tieto prechody z jedného stavu do druhého ovládané bázovým prúdom sa neuskutočnia okamžite. Prúd kolektora reaguje s určitým oneskorením na zmeny bázového prúdu. Spínacie časy tranzistora sú uvedené na obrázku 2.5.2.



Obrázok 2.5.2 Spínacia charakteristika BJT^[1]

Čas zapnutia a vypnutia je možné v značnej miere ovplyvniť veľkosťou bázového prúdu, ten sa s jeho zväčšovaním skraca. Na druhej strane veľký bázový prúd by spôsobil presýtenie tranzistora a tým zväčšenie času vypnutia t_{off} (hlavne jeho zložky - času presahu t_s), čo by bolo nevýhodné. Tvarovanie potrebného bázového prúdu zabezpečuje koncový stupeň budiča pre bipolárny tranzistor. Výkonové bipolárne tranzistory sa vyznačujú malým prúdovým zosilňovacím činiteľom (asi 10 až 20). Požiadavka na budenie bipolárneho tranzistoru relatívne vysokým prúdom komplikuje konštrukciu budiča takéhoto zapojenia.

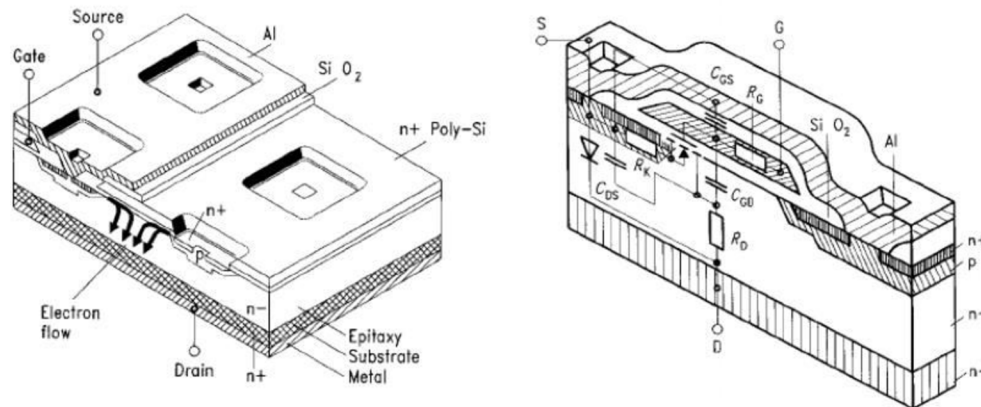
2.5.3 Použitie

BJT je možné vyrobiť s parametrami do 1200 V, 600 A na frekvencie do 5 kHz a výnimočne do 20 kHz. Jednou z veľkých nevýhod bipolárnych tranzistorov je pomerne veľký riadiaci výkon vzhľadom na ich nízky prúdový zosilňovací činiteľ a značne veľký vypínací čas. V súčasnosti už prakticky stratili svoje postavenie vo výkonovej elektronike pre spínacie aplikácie. ^{[1] [26]}

2.6 Výkonový MOSFET

2.6.1 Konštrukcia

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), slovensky tranzistor riadený poľom s hradlovou oxidovou vrstvou. Na obrázku 2.6.1 vidíme rez výkonovým MOSFET tranzistorom. Tak isto ako pri výkonovom bipolárnom tranzistore je využitá vertikálna štruktúra usporiadania. Jej základnou výhodou je že maximálna strata nevzniká na povrchu ako pri laterálnej štruktúre, ale vo vnútri substrátu (bulk), kde sa môže dobre rozptýliť a súčasne cez vrstvu drain jednoduchšie odviešť. Kladný teplotný koeficient odporu R_D pôsobí proti filamentácií.



Obrázok 2.6.1 Výkonový MOSFET v reze^[5]

Preto tranzistoru MOS nehrozí obávaný druhý tepelný prieraz spôsobený lokálnym zvýšením teploty v oblasti PN, ktorý má deštruktívne následky. Rez takisto ukazuje vytvorenie MOS tranzistora viacerými čiastkovými bunkami, ktoré sú usporiadané paralelne a prepojené pokovením. V súčasnej dobe sa dosahuje hustota až 700 000 buniek na cm^2 . Ďalším dôležitým faktorom k dosiahnutiu kompaktného usporiadania je vytvorenie hradlovej elektródy z polykryštalického kremíku (Poly – Si).

Vertikálne usporiadanie odspodu smerom na vrch ukazuje pokovenie drainu, potom nasleduje 500 μm hrubá vrstva substrátu s veľmi nízkym odporom, ktorá slúži ako podložka epitaxnej vrstvy a do buniek usporiadaných váň s vodivosťou P obsahujúcich vo vnútri ostrovčeky s N vodivosťou. Nad tým je na tenkej vrstve oxidu kremíka vytvorená hradlová elektróda z polykryštalického kremíku opäť krytá oxidom. Pokovením sú jednotlivé source elektródy tisícov tranzistorových buniek spojených paralelne do jedného veľkého tranzistora. Každý z jednotlivých MOS tranzistorov má svoj emitor na ostrovčeku N+, ktorý je vaňou oddelený od kolektora. Až po priložení kladného napätia na hradlo úzka bariéra P na hraničnej vrstve s izolujúcim oxidom invertuje. Vytvorí sa vodivý kanál typu N, ktorý spojí navzájom oblasť emitora N+ s oblasťou kolektora N- a tým umožní prechod prúdu. Zostavou N+PN+ ale vzniká aj parazitný vertikálny bipolárny

tranzistor NPN, ktorý je však vedome čo najlepšie skratovaný pokovením emitoru. Pretože emitor je priamo spojený s vaňou P, teda s bázou bipolárneho tranzistora, vzniká medzi emitorom a kolektorom dióda, ktorá je pri kladnom napätí kolektora polarizovaná v závernom smere. Pri zámene polarít napätia medzi kolektorom a emitorom (teda kolektor záporný a emitor kladný – tzv. inverzný režim) je táto dióda vodivá. ^{[2][3]}

2.6.2 Výrobné technológie

Základné výrobné variácie vertikálnych MOS tranzistorov sú:

- VMOS

Nevýhodou tohto usporiadania je obmedzená oblasť pre priechod prúdu medzi kolektorom a emitorom, štruktúra nie je planárna a technológia výroby je značne odlišná od spôsobu používanom pri výrobe IO.

- U MOS

Predčasným prerušením leptania a mierne pozmenenou geometriou dostaneme namiesto priekopy v tvare V priekopu U. Vrchol hradlovej elektródy je zaoblený, čím sa dosiahne nižšej intenzity elektrického poľa. Tento typ tranzistora vykazuje priaznivejšie spínacie vlastnosti. Kolektorový prúd sa pod hradlom rozdelí na väčšiu plochu. Pre spínače s prierazným napätím <100V sa používajú strmé hrany a aplikácia technológie „Trench“, používaná pri výrobe pamätí. Dosahuje sa tak vysokej hustoty integrácie a veľmi nízkeho plošného odporu. Najčastejšie používané technológie poľom riadených tranzistorov však majú planárne usporiadanie hradla. Patrí k nim technológia DMOS a SIPMOS.

- DMOS

Označenie DMOS je odvodené od spôsobu vytvárania oblastí P- a N+ v oblasti emitoru dvojitou difúziou. Hradlo je usporiadané horizontálne, tvorí ho polykryštalický kremík a je celé uložené v oxide kremíka. Ako vyplýva z usporiadania, kanál prebieha laterálne. Emitorová elektróda môže byť vytvorená ako priebežná hliníková vrstva. Štruktúru tvoria väčšinou bunky, ktorých tvar môže byť rôzny, napr. šesťhranný (Hex-FET), pravouhlý (TMOS), trojuholníkový, kruhový alebo páskový. Dvojistou difúziou sa taktiež dosiahne relatívne krátkych dĺžok kanálu 1-2 um, akumuláciou elektrónov pod hradlom dochádza k priaznivému rozdeleniu kolektorového prúdu

- SIPMOS

Pri tejto technológii (*registrovaná značka firmy Siemens AG*) nazývanej tiež DIMOS (podľa dvojitej implantácie použitej pri výrobe) je hradlová elektróda taktiež horizontálna, má však skosené okraje. To má niekoľko výhod. Tieto hrany hradla z polykryštalického kremíku slúžia súčasne ako maska pri implantácii oblasti kanálu (P-) a emitora (N+). Takto je možné nezávisle na dotovaní vane P+ stanoviť dotáciu oblasti kanálu P-. To dovoľuje v istých medziach jednoducho meniť prahové napätie. Takýmto prevedením

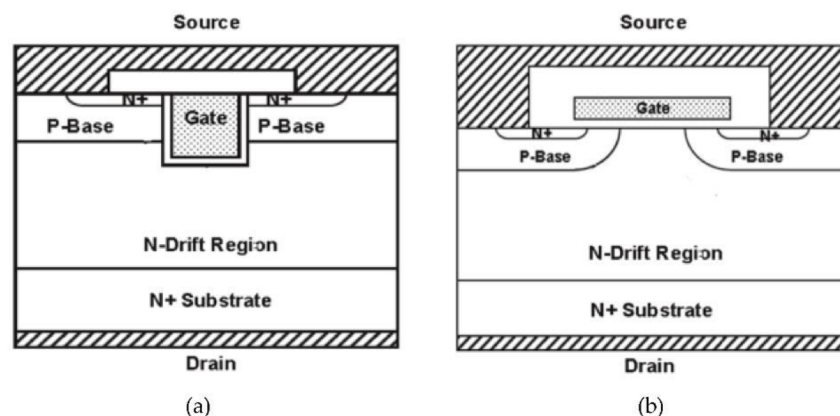
oblasti P je možné vykonať nízkoohmový skrat parazitného NPN tranzistoru. Ďalšiu výhodu poskytujú skosené hrany hradla z polykryštálu kremíka. Nad ním umiestnené vrstvy oxidu a hliníkového povlaku emitora môžu tieto zaoblené hrany pri pokovení lepšie pokryť bez vzniku dutín a trhlín. Štruktúra emitora môže byť priamo kontaktovaná. Pretože pri výrobe sú použité samonastavovacie procesné kroky, odpadajú problémy s toleranciou masiek a nastavenia, rozmery buniek môžu byť malé a je možné dosiahnuť vysokej hustoty integrácie. Z veľmi krátkej dĺžky kanálu (1-1,5 μm) vyplýva vysoká hodnota W/L a tým vysoká hodnota kolektorového prúdu. Navyše je kontaktovaním emitora priamo v poli bunky dobre využitá plocha čipu.^[3]

Ako sme už spomenuli, výkonová elektronika do značnej miery využíva vertikálnu štruktúru. Vývoj sa u výkonových MOSFET tranzistorov rozdelil na dve základné významné štruktúrne rozdiely:

- Trench-Gate MOSFET
- Superjunction MOSFET

2.6.3 Trench-Gate MOSFET

Na obrázku 2.6.3 a) je uvedená štruktúra Trench-Gate MOSFETu, ktorú môžeme porovnať s planárnym MOSFETom na obrázku 2.6.3 b). Vývoj týmto smerom od DMOS štruktúry nastal okolo roku 1997. Môžeme vidieť že dochádza k hlbšej difúzií ako hradla, tak aj jednotlivých vodivostných jám. N-epitaxná vrstva je užšia, čo prispieva ku kratšej vzdialenosti ktorú musia elektróny v N-oblasti uraziť. Toto umožňuje významné zníženie odporu $R_{DS(ON)}$ najmä v oblasti nižších napätí v porovnaní s bežnými štruktúrami.^{[2][4]}

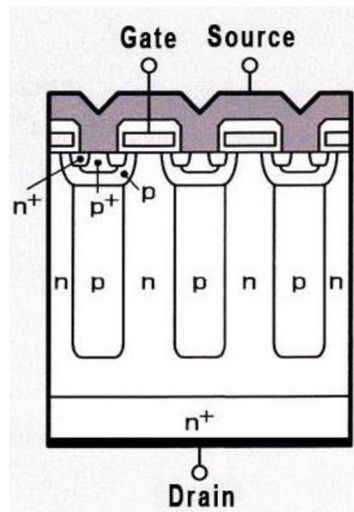


Obrázok 2.6.3 a) Trench MOSFET^[26] b) Planárny MOSFET^[26]

2.6.4 Superjunction MOSFET

Prelom v znižovaní $R_{DS(ON)}$ bol iniciovaný v roku 1999 spoločnosťou Infineon a prišiel s rozvojom **CoolMOS**, ktorý bol ako prvý "Superjunction" MOSFET výkonový tranzistor na

trhu, rezom na obrázku 2.6.4. Kompenzačný princíp použitý v Superjunction komponentoch bol vyvinutý pre MOSFET s rozsahom záverných napätí od 500 do 1000V. Obrázok 2.6.4 ukazuje usporiadanie a funkčný princíp CoolMOS tranzistora s touto konštrukciou.



Obrázok 2.6.4 Superjunction MOSFET^[3]

S pomocou niekoľkých epitaxných krokov alebo bočnej (laterálnej) difúzie z trenchov (priekop), vysoko dotované vodivé bunky sa vstrekujú do oblasti N- oblasti s nízkym driftom. Tieto bunky sú spojené s P jamami. Dopĺňanie buniek (stĺpcov) je dimenzované tak, že N-dotovanie driftovej oblasti je kompenzované a z toho vyplýva veľmi nízka efektívna miera dotácie. V blokovacom stave je pole takmer obdĺžnikové a môže zniesť maximálnu hodnotu napätia vo vzťahu k hrúbke N- oblasti. Dotácia (doping) driftovej oblasti môže byť zvýšená iba do takej miery, ktorá ešte stále povoľuje aby bola kompenzovaná rovnakým množstvom dopingu v P-stĺpci ("Princíp kompenzácie"). Tým sa ruší vzájomná závislosť blokovacieho napätia a hustoty dopingu. V dôsledku toho môže byť hrúbka N-driftovej oblasti podstatne znížená v porovnaní s bežným MOSFET tranzistorom a vodivosť driftovej oblasti môže byť zvýšená prostredníctvom vyššieho dopingu. To znamená že $R_{DS(ON)}$ sa už nebude zvyšovať približne 2,5 násobne ale skoro lineárne s prierazným napätím $V_{(BR)DSS}$. Straty v zopnutom smere sa znížia o 1/5 až 1/3. Takisto môžeme zmenšiť plochu čipu, resp. klesnú nám spínacie straty a zmenší sa aj náboj nabíjania riadiaceho hradla gate.

2.6.5 Použitie

Používajú sa v regulovaných pohonoch s asynchrónnymi a synchrónnymi krokovými motormi, zdrojoch pre svetelnú techniku indukčný ohrev, elektroerozívne obrábanie kovov, impulzné napájacie zdroje atď. Pri vyšších napätiach sú však možnosti použitia MOSFET ohraničené väčším odporom v priepustnom stave a väčšou vstupnou kapacitou, ktorá vyžaduje značné impulzné hradlové prúdy. Výkonové MOSFET zostanú naďalej používané pre nízkonapäťové vysokofrekvenčné aplikácie menšieho výkonu.^[4]

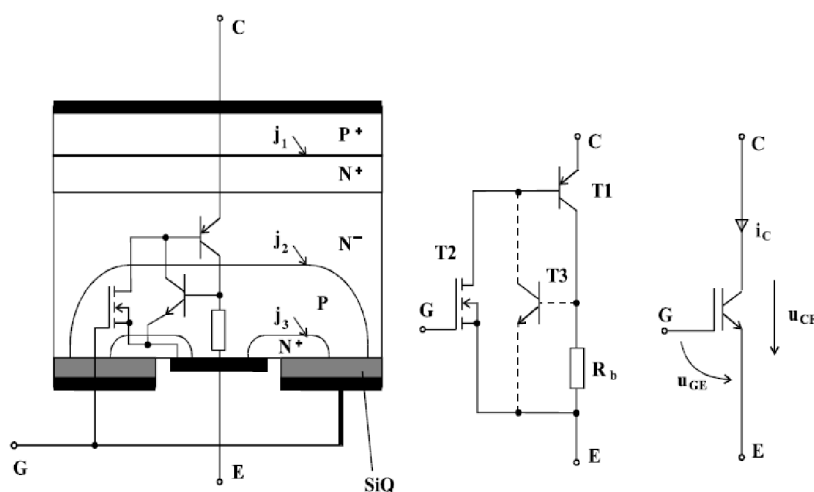
2.7 IGBT

2.7.1 Konštrukcia a vlastnosti

IGBT (anglicky Insulated Gate Bipolar Transistor), slovensky bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom. Vznikol snahou o dosiahnutie kombinácie vlastností ako je mimoriadna prúdová hustota bipolárnych súčiastok (vyznačujú pomerne vysokou injekciou nosičov náboja z emitorovej vrstvy a malou hodnotou odporu v zopnutom stave) a schopnosť riadenia napätím (tzv. nevýkonové riadenie) u MOSFETov. Počiatkový úmysel pri vývoji IGBT štruktúry bol skombinovať tyristorovú štruktúru s ovládaním hradla ako u MOSFETu. Bol vyvinutý v USA na začiatku osemdesiatych rokov Hansom W. Beckem a Carlom F. Wheatleym. O desať rokov neskôr bol IGBT uvedený na trh výrobcami z Európy a Japonska. [1][7]

Táto súčiastka je známa aj pod názvami COMFET (Conductivity Modulated FET), GEMFET (Gain-Modulated FET), IGT (Insulated Gate Transistor), IGR (Insulated Gate Rectifier), IGBT V krátkom čase sa IGBT začal presadzovať vo zvyšujúcom sa podiele aplikácií a začal vytláčať výkonové bipolárne tranzistory a v dnešnej dobe dokonca aj GTO-tyristory vo vysokovýkonových aplikáciách. [2]

IGBT má vysokú vstupnú impedanciu a je schopný dosiahnuť vysoké rýchlosti spínania ako MOSFET, má pritom nízku hodnotu saturačného napätia ako bipolárny tranzistor. Tento mix mu zabezpečuje schopnosť spínať veľké prúdy medzi kolektorom a emitorom s takmer nulovým prúdom na riadiacej elektróde gate. Na obrázku 2.7.1 je znázornená základná štruktúra, náhradná značka a schéma IGBT. Náhradnú schému IGBT znázorniť ako spojenie bipolárneho tranzistoru PNP, ktorého bázový prúd je riadený zopnutím vstupného MOSFETu.



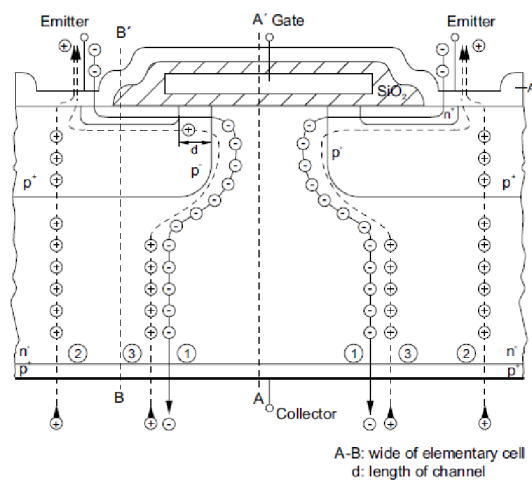
Obrázok 2.7.1 Štruktúra, tranzistorové zapojenie a schematická značka IGBT^[1]

Štruktúra IGBT sa úplne podobá DMOS štruktúre tranzistora MOSFET s tým rozdielom, že v tomto prípade je pridaná vrstva P+, ktorá vytvára kolektor tranzistora IGBT.

Táto vrstva je dodávateľom minoritných nosičov (dier) do oblasti N-, čo spôsobuje zníženie priepustného napätia v porovnaní s MOSFET.

2.7.2 Princíp činnosti

Ak je na IGBT privedené kladné napätie medzi kolektor a emitor, súčiastka je v blokovacom móde. Ak v takomto stave je na elektródu gate privedené napätie vyššie ako prahové, vytvorí sa N-kanál a elektróny sa pohybujú smerom ku kolektoru, ako je zrejmé z obrázku 2.7.2. Na kolektorovej strane PN prechodu, sa vygeneruje napätie v priepustnom smere a diery z p vrstvy kolektora sú injektované nízko dotovanej strednej vrstvy. Tieto injektované diery umožnia zvýšiť hustotu nosičov náboja, zvýšená hustota zníži odpor strednej vrstvy, čiže dochádza k modulácii vodivosti v tejto nízko dotovanej vrstve.



Obrázok 2.7.2 Tok prúdu v IGBT^[4]

Z vnútornej štruktúry vyplýva že pri uvažovaní $R_{sh} > 0$ je možné IGBT modelovať v zopnutom stave ako sériovú kombináciu diódy a odporu zopnutého FET. Úbytok napätia na diódovej časti sa rovnako u bežnej diódy skladá z prahového napätia U_{t0} a úbytku na diferenciálnom odpore. So zvyšujúcou sa teplotou prahové napätie klesá a diferenciálny odpor vzrastá. Celkový úbytok napätia v zopnutom stave sa u IGBT pohybuje v rozmedzí asi 1,5 až 4 V v závislosti na type prvku a na pretekajúcom prúde. So zväčšujúcim sa prúdom tento úbytok narastá. Vzhľadom k tomu že odpor zopnutého tranzistora rastie spolu s teplotou, čiže vykazuje kladný tepelný súčiniteľ odporu, je možné IGBT realizovať ako integrovaný obvod s veľkým počtom paralelne zapojených prvkov na jednom čipe.

Doterajšie úvahy sa vzťahovali k prípadom, kedy je možné úbytok napätia na odpore R_{sh} zanedbať. Pri zväčšení prúdu kolektora však môže dôjsť k zvýšeniu úbytku napätia na tomto odpore, čím sa zvýši napätie na báze **parazitného tranzistora** NPN T3 a časť prúdu kolektora IGBT pretečie bázou a emitorom zmieneneho tranzistora. Ak dôjde k zväčšeniu prúdu kolektora nad určitú kritickú hodnotu, uplatní sa kladná spätná väzba v zapojení dvoch bipolárnych tranzistorov a vďaka nej dostane táto štruktúra vlastnosti tyristora, klesne úbytok napätia na IGBT a prvok už nie je možné vypnúť zásahom do riadiacej elektródy.

Technologickými úpravami pri výrobe IGBT sa dosiahne zvýšenie hodnoty kritického prúdu tak, aby nebola obmedzená hodnota prúdovej zaťažiteľnosti.

Bezpečná pracovná zóna IGBT v súradniciach napätie a prúd je obmedzená hlavne tepelnými stratami. Veľkosť tejto zóny je závislá i na spínacej frekvencii, pretože s rastúcim napätím rastú aj spínacie straty tranzistoru. Obmedzenie spínacej frekvencie je dané potrebou dostatočnej doby pre odvedenie stratového tepla po uskutočnení spínacieho procesu. S tým súvisí aj existencia minimálnej^{[1][3][4]}

2.7.3 Použitie a trend

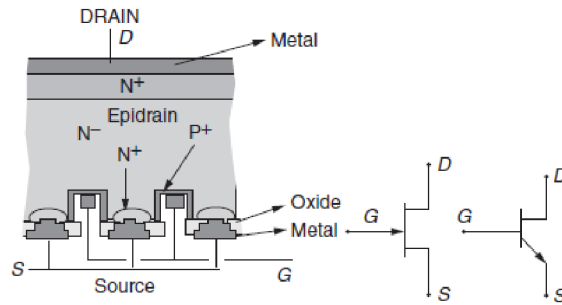
V súčasnej dobe je vo výkonových meničoch najpoužívanejším prvkom IGBT, vďaka značnej prúdovej a napäťovej zaťažiteľnosti (4kV, 3kA), širokej dovolenej pracovnej oblasti, dobrým tepelným charakteristikám. Toto všetko im zabezpečuje dominantné použitie v meničoch s napätím nad 100V pri spínacej frekvencii do 20kHz. IGBT nahradili bipolárne tranzistory vo väčšine výkonových meničov. Vplyvom neustále rastúcich parametrov týchto prvkov sa však rýchlo rozširuje pole ich využitia i v meničoch pre napätie nad 1000 V (napr. v trakčných pohonoch vozidiel MHD ale aj v trakčných pohonoch vozidiel na železnici s napätím 3000V). Vďaka výborným frekvenčným vlastnostiam IGBT a vďaka neustálemu vývoju smerujúcemu k zvyšovaniu prúdových a napäťových hladín je možné tento prvok v súčasnosti ako veľmi perspektívnu alternatívu pre výkonovú elektroniku.

V súčasnosti sú na trhu k dispozícii IGBT s maximálnou napäťovou hladinou 6 500 V od firmy EUPEC, maximálny prúd týchto prvkov je 600 A, IGBT pre prúdy do 2500 A sú k dispozícii v napäťových hladinách do 2000 V. Prejavuje sa tu teda rovnaký efekt ako u FET- prvky pre najvyššiu napäťovú zaťažiteľnosť sú k dispozícii iba pre menšie prúdy, prvky pre veľké prúdy sú napäťovo menej zaťažiteľné. Uvedenú nevýhodu do istej miery odstraňuje možnosť radiť IGBT paralelne.^{[1][2][7]}

2.8 Výkonový JFET (SIT)

2.8.1 Konštrukcia

JFET, (anglicky Junction Field Effect Transistor), slovensky tranzistory s ovládacou elektródou oddelenou PN prechodom, známy aj pod názvom SIT (anglicky Static Induction Transistor), slovensky tranzistor na báze statickej indukcie. Je to výkonová polovodičová súčiastka, ktorá bola vyvinutá už v 50-tych rokoch. Komerčne sa začala využívať až v roku 1987 po zavedení do výroby firmou Tokin Corp. v Japonsku. Súto prvky s krátkym kanálom na báze ochudobňovania prechodu (junction), riadené poľom. Rez štruktúrou jeho schématické značky sú uvedené na obrázku 2.8.1.



Obrázok 2.8.1 Rez štruktúrou JFET a shématická značka^[2]

Ich prevádzka závisí iba na toku majoritných nosičov náboja (elektróny), čiže sa jedná o unipolárnu súčiastku, ktorá má veľmi nízke hodnoty parazitných kapacít. Keďže nenastáva injekcia nosičov náboja z riadiacej elektródy gate, nedochádza k ukladaniu náboja (storage effect) a malý odpor hradla GATE (R_g) je využívaný pre minimálnu stratu vysokofrekvenčného signálu. Preto SIT vykazujú veľmi nízke spínacie straty a majú potenciál dosahovať veľmi vysoké spínacie frekvencie, dokonca vyššie ako MOSFET, až do pásma THz.

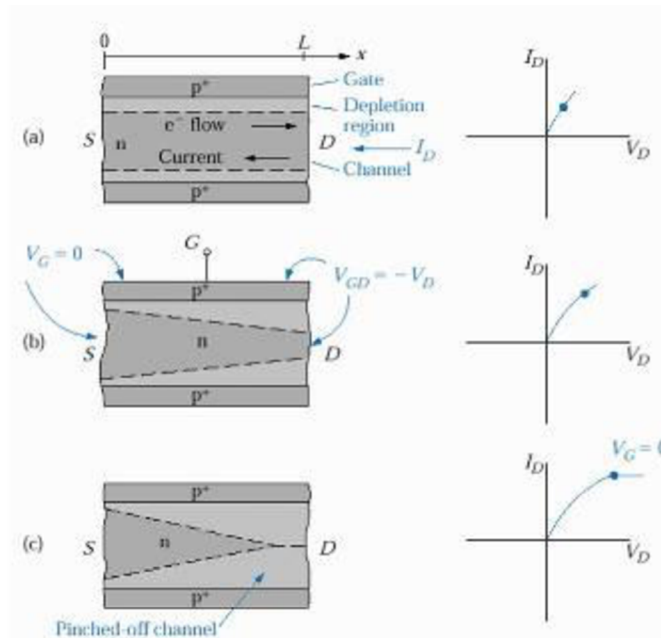
2.8.2 Spínanie a modulácia kanálu

SIT je v kľudovom stave (pri $V_{GS} = 0$) v zopnutom stave, pripravený pri priložení napätia V_{DS} viesť prúd I_D . Vypína sa záporným napätím, ($V_{GS} < 0$), ktoré môže dosiahnuť veľkosť až niekoľko desiatok voltov. Čím vyššia je hodnota záporného napätia V_{GS} , tým väčšie pracovné napätie je SIT schopný vo vypnutom stave zniesť (vlastnosť rovnaká ako u vákuovej triódy). Pomer V_{DS} a V_{GS} sa niekedy označuje ako blokujúce zosilnenie μ (blocking gain).

Vychádzajme s podmienky $V_{GS} = 0V$. Ako je vidieť 2.8.2 a) PN prechod vytvára ochudobnenú oblasť (oblasť priestorového náboja), ktorá sa rozširuje do menej dotovanej oblasti N. Pre správnu činnosť tranzistora musia byť obidva prechody hradlo-kanál polarizované záverne. V tomto stave je PN prechod v termodynamickovej rovnováhe a pri zvyšovaní napätia V_{DS} začne pretekať jeho N+ kanálom prúd I_D , ktorý pri zvyšovaní V_{DS} lineárne narastá. Pri malom napätí U_{DS} sa teda tranzistor JFET chová ako lineárny rezistor, ktorého veľkosť je riadená napätím U_{GS} .

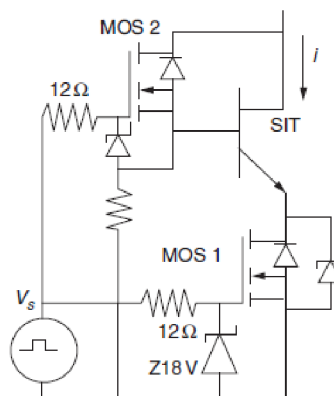
Na 2.8.2 b) vidíme že ak záporné napätie U_{GS} stúpne, oblasť priestorového náboja sa rozširuje, kanál sa zmenší a prúd I_D tranzistorom začne klesať. Tu nastáva „priškrcovanie“ kanálu (rozširovanie oblasti priestorového náboja), ktoré je nerovnomerné. Túto nerovnomernosť spôsobuje rozdiel potenciálov napätia U_{DS} . Keďže source je uzemnený, na rovnaký potenciál ako N kanál, šktenie nastáva v časti drainu prúd I_D sa zvyšuje ešte pomalšie. Obrázok 2.8.2 c) znázorňuje uzavretie kanála. Prúd I_D dosiahol maximálnu hodnotu, tomuto napätiu hovoríme $V_{DS(sat)}$. Tranzistor je v saturácii (je nasýtený). Aj pri $V_{DS} > V_{DS(sat)}$ sa už jeho hodnota nezvyšuje, dochádza však ku skráteniu dĺžky kanálu. Cez zaškrtenú oblasť kanála sú nosiče odsávané elektrickým poľom. To vzniká tak, že priložené

napätie U_{DS} , ktoré prevyšuje $U_{DS(sat)}$, sa teda prejaví ako rozdiel potenciálov na zaškrtenej časti kanála. Táto je však vzhľadom k nezakrštenej časti malá a preto sa prúd I_D nemení.



Obrázok 2.8.2 spínanie JFET pri a) $V_{GS} = 0V$ b) $V_{GS} < 0V$ c) $V_{DS} = V_{DS(sat)}$ [2]

Na rozdiel od SCR, GTO, MOSFET alebo IGBT, vlastnosť SIT byť v kľudovom stave zapnutý umožňuje jeho použitie v obvodoch generovania vysokorýchlostných impulzov podobne ako u SOS diód. Tento stav však môže zvýšiť komplexnosť obvodu budenia hradla gate. Výkonový JFET zvyčajne vyžaduje väčšie napätie a radiaci výkon ako MOSFET. Tieto dve nevýhody u SIT je možné riešiť pomocou kaskádového zapojenia v ktorom je JFET ako zdroj a je spínaný nízkonapäťovým tranzistorom MOSFET (MOS1) s vysokým nominálnym prúdom ako vidíme na 2.8.3, MOSFET2 môže byť použitý na ovládanie SIT v bipolárnom móde.



Obrázok 2.8.3 Kaskádové zapojenie JFET [2]

Toto zapojenie má však tiež dve nevýhody. Prvá je že pri zapínaní vzniknú dodatočné straty pri nabíjaní kapacitý nízkonapäťového MOSFET tranzistora z kladnej svorky napäťového zdroja. Druhá je že kaskádová kombinácia neumožňuje priame riadenie JFET tranzistora, kvôli absencii riadiaceho hradla medzi drainom JFETu a hradlom gate nízkonapäťového MOSFETu.^[2]

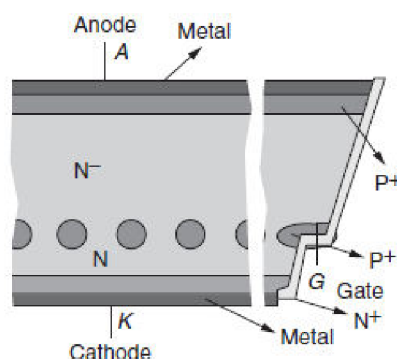
SIT vykazuje pozitívny teplotný koeficient, umožňuje jednoduché paralelné radenie ako MOSFET a taktiež aj jednoduché sériové zapojenie. Nepotrebuje zapínacie ani vypínacie odľahčovacie obvody (snubber). Na potlačenie prepätia vzniknutého parazitnou indukčnosťou stačí jednoduchý obmedzovací RC obvod. SIT možno prevádzkovať aj čisto v bipolárnom režime (nazývaného aj bipolárny SIT mód, BSIT, BMSIT) ak je prvok navrhnutý tak, že dovoľuje kladným prúdom na hradlo gate vstrekovanie dier do kanála drainu. Zapnutý stav BSIT ako u bipolárneho tranzistora. Tento mód spôsobí predĺženie vypínacieho času, ale zvýši sa prúdová hustota a to môže mať pozitívny vplyv pre impulzný výkon.

2.8.3 Použitie a trend

Ich použitie je v oblasti ultrazvukových generátorov a zdrojov pre indukčný ohrev. Pretože bez riadiaceho signálu je SIT vo vodivom stave a tiež kvôli veľkému úbytku vo vodivom stave je jeho použitie obmedzené na špeciálne účely. Parametre SIT sa pohybujú okolo 1200V a 300A. SIT bude aj naďalej dominantnou súčiastkou pre špeciálne výkonové zariadenia pracujúce s veľmi vysokou spínacou frekvenciou, kde mu ostatné súčiastky nemôžu konkurovať.

2.9 SITH

Súčiastka odvodené od SIT štruktúry použitá pre impulzný výkon je SITH (Static Induction Thyristor), taktiež nazývaný FCTh (Field Controlled Thyristor) alebo FCD (Field Controlled Diode). Obsahuje P+ vrstvu (namiesto N+ vrstvy u SIT) na vytvorenie PN prechodu ako je vidieť na štruktúre z obrázku 2.9.1.



Obrázok 2.9.1 Štruktúra SITH^[2]

Ak je $V_{GK} = 0$, (gate-katóda skratovaná) SITH sa správa ako dióda. Táto dióda môže byť vypnutá takmer okamžite bez nejakej zotavovacej doby, ak $V_{GK} < 0$, avšak vybíjací prúd kapacity hradla môže byť veľký ako polovica anódového prúdu, čo nám sťažuje návrh a fungovanie budiča. Alternatívou ku ľahčeniu riadenia je tak isto ako u SIT použitie kaskádového zapojenia. SITH sa používa na generovanie impulzov ako úvodný spínač pre indukčné obvody. Avšak tieto súčiastky sú ešte stále vo vývoji a očakáva sa u nich vyšší výkon, symetrické blokovacie vlastnosti a vypnutý základný stav. S ich širším využitím sa uvažuje v meničoch pre indukčný ohrev, vysokofrekvenčných jednosmerných meničoch, aktívnych sieťových filtroch a v PWM striedačoch pracujúcich s frekvenciou v nadakustickej oblasti atď. ^{[2][21]}

3 INTEGRÁCIA

V tejto kapitole zhrniem prístupy k integrácii jednotlivých diskretných súčiastok do rôznych foriem, od výkonového modulu, cez úmodulárny systém PEBB, až po integráciu riadiacich a výkonových obvodov na rovnaký sustrát. Rozobratá je aj problematika integrácie snímacích, ochranných a riadiacich prvkov, resp. obvodov.

3.1 Výkonový modul

Prvá a najstaršia forma integrácie je výkonový modul. Prvý bol na trh uvedený v roku 1975 firmou SEMIKRON. Na obrázku 3.1.1 je súčasná generácia modulu Semipack.



Obrázok 3.1.1 Výkonový modul SEMIPACK

Jedná sa o bezpotenciálne riešenie, čiže obvod odvodu tepla (vodivá základová doska) aj ostatné časti modulu (okrem výkonových prívodov) sú na potenciáli zeme. Je to dosiahnuté pozitívom substrátu. Jeho štruktúra je znázornená na obrázku 3.1.2. Substráty musia zniesť vysoké prúdy a zabezpečiť vysoké izolačné napätie až niekoľko stoviek voltov. Taktiež musia pracovať vo vyšších teplotných rozsahoch (od 150 do 200 °C).



Obrázok 3.1.2 Štruktúra substrátu

Substrát pozostáva s:

- keramického materiálu (najčastejšie Al_2O_3 , oxid hlinitý)
- meďi (jednostrannej alebo obojstrannej) Jeh Vid' obrázok

Prednosťou Al_2O_3 je jeho cena. Nevýhodou nízka tepelná vodivosť (24-28 W/mK) a krehkosť. Z ďalších možných alternatív **izolačného** materiálu substrátu spomeniem napríklad Nitrid hliníka (AlN), ktorý je drahší, ale má omnoho lepšiu tepelnú vodivosť (> 150 W/mK). HPS (High Performance Substrate) ide o Al_2O_3 dotovaný Zirkónom, jedná sa o patent firmy Curamik. Dosahuje väčšiu prúdovú hustotu ako klasický Al_2O_3 .

Metódy výroby substrátu (spôsob oplášťovania izolačného materiálu vrstvou Cu):

- DCB (direct bonded copper substrát, čiže priamo lepená meď). Vyniká veľmi dobrou tepelnou vodivosťou a cenou.
- AMB (Active Metal Brazing) Ide o vysokoteplný (800 °C – 1000 °C) vákuový proces naspájkovania meďi, metóda vhodnejšia pre malosériovú výrobu.

Ďalej rozoberám iba DCB substrát. Jeho veľká výhoda je nízky koeficient tepelnej rozťažnosti (CTE -Coefficient of Thermal Expansion), ktorý je podobný CTE kremíka, na rozdiel od čistej meďi. To eliminuje pnutie ktoré nastáva medzi vrstvami jednotlivých materiálov a zabezpečuje dobrú výdrž pri tepelných cykloch. Teplotné a power (zohriatie záťažou) cykly sú stresy, ktorým je vystavený modul, ako v procese kvalifikácie, tak v reálnej aplikácii.

V module je umiestnený jeden alebo viac čipov roznych typov výkonových súčiastok (tvoriacich topológiu). Čipy sú na DCB kvôli cene zväčša naspájkované. Používa sa aj proces sintrovania (spekania), ktorý je spoľahlivejší, ale oproti spájkovaniu výrazne cenovo nevýhodnejší. Spodná Cu časť DCB (s obojstrannou Cu) je k základovej doske modulu, ktorá je tiež z meďi (býva ešte poniklovaná) taktiež prispájkovaná.

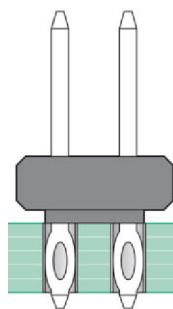
Najčastejšie používané topológie implementované v moduloch sú:

- Spínač (MOSFET, IGBT) s antiparalelnou diódou
- Mostíkový usmerňovač so štyrmi (1-fázový) alebo šiestimi (3-fázový) diódami
- Polovičný mostík (vetva zapojenia meniča s dvomi spínačmi a ich antiparalelnými diódami)
- Trojfázový menič (šesť spínačov a ich antiparalelné diódy)

Výkonové moduly poskytujú v porovnaní s diskretnými súčiastkami vyššiu prúdovú hustotu a vyššiu spoľahlivosť. Modul sa tradičným skrutkovým spojom pripája na chladič.

Okrem toho potrebujeme zabezpečiť elektrický kontakt medzi modulom a budičom (driver) umiestneným na DPS. Ten býva väčšinou obstaraný:

- **pinmi** prispájkovanými na DPS
- **pressfit kontaktmi**, ktoré sa vtlačia do via na DPS vykazujú vysokú spoľahlivosť a jednoduchý proces montáže bez potreby spájkovania, ich princíp je na obrázku 3.1.3
- **pružinkami** ktoré tlačia na kontaktovanú plochu na DPS, majú výhodu umožňujúcu nedeštruktívne rozpojenie a opätovné spojenie z dôvodu inšpekcie alebo opravy



Obrázok 3.1.3 Pressfit kontakt^[34]

Pressfit kontakt aj pružinka majú obmedzenú schopnosť prenášať veľké prúdy čo súvisí s ich pomerne nízkou plochou prierezu a styčnou plochou. Preto moduly obsahujú niekoľko pinov alebo pružiniek na jedno elektrické spojenie.

Pozornosť vo vývoji výkonových modulov sa momentálne sústreďuje na zníženie ceny, zvýšenie spoľahlivosti, redukciu parazitných javov a návrh čo najoptimálnejšej tepelnej cesty (thermal path), z dôvodu optimalizácie chladenia kvôli čoraz vyšším prúdovým hustotám.

3.2 Inteligentné výkonové moduly (PIM)

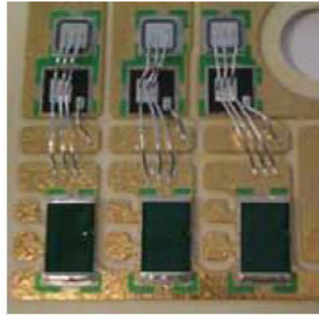
Sú to výkonové moduly do ktorých bolo integrované ochranné funkcie, čím vznikli inteligentné výkonové moduly (PIM). Jedná sa o hybridné obvody, kde na spoločnej podložke sú spojené čipy výkonových súčiastok, ochrán a snímačov. Prednostne sa používajú v rozsahu výkonov od 5 do 30 kW a napätí od 500 do 1200V.^[26]

3.2.1 Moduly s integrovaným meraním prúdu

Meranie prúdu v moduloch slúži za prvé na ochranu výkonových prvkov pred nadprúdom a za druhé sa jedná o snímanie prúdového signálu slúžiaceho pre riadenie prúdových slučiek. Hrubé monitorovanie prúdu slúži na splnenie prvej úlohy, z čoho vyplýva že sám polovodič môže byť na tento účel využitý pomocou snímania jeho saturačného napätia $V_{CE(sat)}$. Snímanie druhej úlohy, teda prúdového signálu musí byť veľmi presné (v rozmedzí 2% až 5%), dynamická odozva približne 1 μ s a to všetko pre frekvenčný rozsah od jednosmerného napätia do približne 10 kHz.^[4]

3.2.2 Bočníky na meranie prúdu (current shunts)

Bočníky slúžia na priame meranie prúdu a sú umiestnené do emitorovej cesty (svorka - DC) IGBT modulov alebo na AC výstup. Na obrázku 3.2.2 vidíme v spodnej časti tri bočníky (obdĺžnikové komponenty) pre meranie prúdu v trojfázovom striedači.

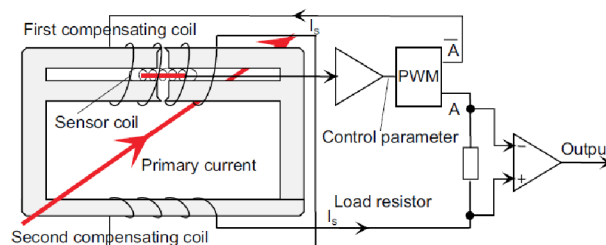


Obrázok 3.2.2 Bočníky na meranie prúdu^[4]

Vyhodnocovanie sa odohráva v diferenčnom zosilňovači v riadiacom stupni. Bočné plôšky po stranách zabezpečujú nízkoindukčné spojenie s hlavnou prúdovou vetvou. Problémom pri používaní bočníkov je nízky rozdiel medzi merateľným rozsahom napätia v zaručenom prostredí a stratami na bočníku. 5 mW bočník má úbytok napätia len 100 mV pri 20 A, ale stratu 2 W. Pri takejto výkonovej strate, sú dosahované limity pre montáž DPS. Bočníky ktoré sú integrované do DPS majú výhodu, že tepelné straty môžu byť priamo rozptýlené cez chladič. To rozširuje rozsah použiteľného bočníkov od cca. 20 A do cca. 50 A. Nevýhodou sú zvýšené priestorové požiadavky pri návrhu DPS.^[4]

3.2.3 Snímače prúdu (current sensors)

Pre prúdy nad 50 A je potrebné galvanické oddelenie, na jeho dosiahnutie sa používajú rôzne princípy ako napríklad oddeľovací transformátor, Hallov jav, princíp magnetorezistivity. Na obrázku 3.2.3 je uvedený princíp kompenzačných prevodníkov (compensating transducers).

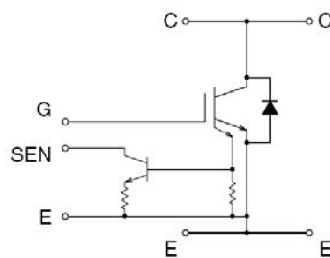


Obrázok 3.2.3 Snímač prúdu^[4]

Tento spôsob je charakterizovaný vysokou presnosťou, širokým frekvenčným rozsahom a vysokou schopnosťou preťaženia. Vyhodnotenie senzorov je súčasťou konceptu ochrany a riadiacej elektroniky IPM. V princípe ide o meranie veľkosti prúdu (magnetického poľa) hlavnej prúdovej vetvy vo vzduchovej medzere transformátora, toto je potom cez prevodník digitalizované a porovnávané v komparátore s prúdom (magnetickým poľom) pomocného vinutia, kde výstupom je záporná spätná väzba, ktorá sa snaží o vykompenzovanie týchto dvoch magnetických poľí. Prúd v kompenzačnom vinutí je priamym odrazom prúdu v hlavnej vetve. Je možné merať jednosmerný prúd a zistiť smer prúdu.^[4]

3.2.4 Sense IGBT moduly

Tu sa jedná o IGBT moduly ktoré vyžadujú špeciálny čip, pri ktorom meraný prúd ktorý je úmerný hlavnému prúdu a odoberá sa prostredníctvom malého počtu samostatne pripojených buniek. Tieto IGBT vyžadujú špeciálne bondovanie a signal conditioning (čo je manipulácia s analógovým signálom takým spôsobom, že spĺňa požiadavky ďalšieho stupňa na ďalšie spracovanie). V porovnaní s riešeniami s bočníkmi v obvode emitora si môžeme zvoliť oveľa vyšší odpor merania. Na rozdiel od nadprúdovej ochrany, ktorú poskytuje monitorovanie V_{CE} , sú potrebné kratšie dead-times (oneskorenia), resp. vôbec žiadne. Nevýhodou je nedostatok presnosti a teplotná závislosť metódy merania, čo znamená, že sa môže použiť iba na ochranné účely. Schématické zapojenie Sense výstupu je znázornené na obrázku 3.2.4. ^[4]



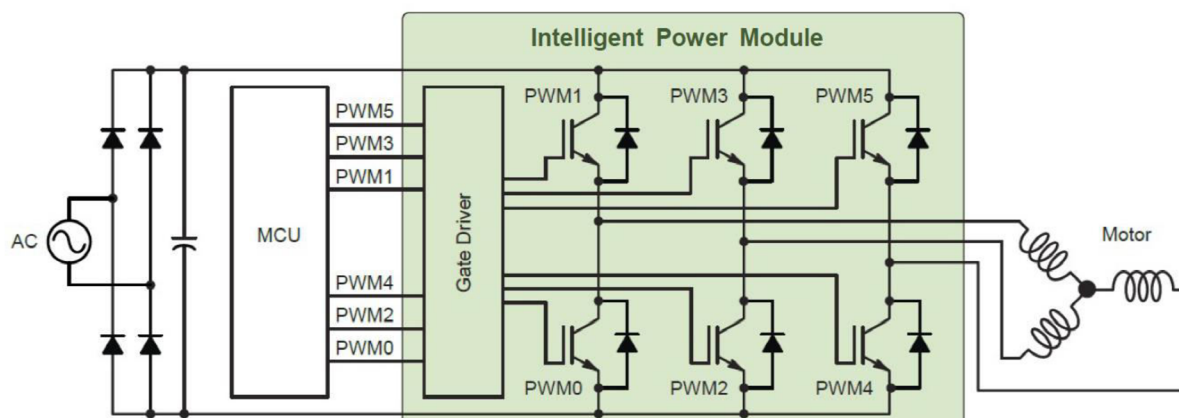
Obrázok 3.2.4 Sense výstup^[4]

3.2.5 Integrované meranie teploty

Moduly s vysokým stupňom integrácie čoraz viac využívajú jednoduché PTC (Positive Temperature Coefficient) alebo NTC (Negative Temperature Coefficient) teplotné senzory v SMD konštrukciách alebo ako senzory na čípe. V moduloch sú senzory izolované a spájkované na keramickom substráte DBC v blízkosti čipov. Pri moduloch so základnou doskou dosahujú senzory približne teplotu základnej dosky. Snímače v moduloch bez základnej dosky dosahujú približne teplotu chladiča. ^[4]

3.3 IPM (Intelligent Power Module)

Je to ďalší stupeň integrácie vo výkonových moduloch. Sú schopné integrovať ešte viac komponentov. Jedná sa v podstate o PIM s integrovaným koncovým stupňom budenia. Na obrázku 3.3.1 je aplikácia IPM riadená μC , konkrétne riadenie trojfázového motora.



Obrázok 3.3.1 Aplikácia IPM^[31]

Bloková schéma je uvedená súčasťou je nižšie na obrázku je totožná s blokovou schémou budiča z obrázku 4.1.1. Jedná sa o produkt spoločnosti ON SEMICONDUCTOR, konkrétne STK984-190-E

3.4 PEBB

Firma ABB vyvinula Power Electronic Building Blocks pre použitie vo všetkých možných konvertoch napäťových zdrojov. S týmito stavebnými blokmi uvedenými na obrázku 3.4 sa dá ľahko prispôsobiť špeciálnym požiadavkám a súčasne sa náklady udržiavať na primeranej úrovni. Pri použití takýchto štandardizovaných stavebných blokov sú inžinierske a vývojové práce obmedzené na minimum.

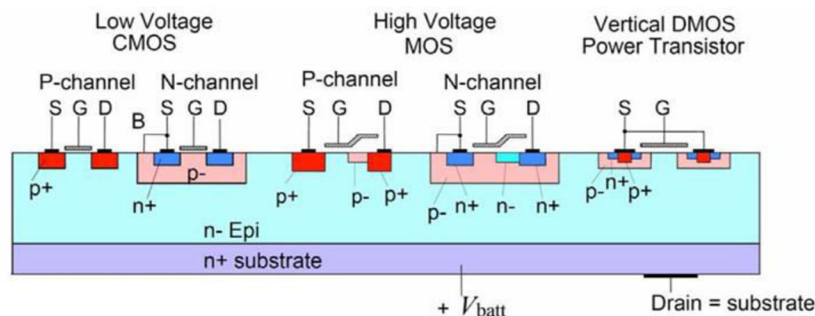


Obrázok 3.4 PEBB^[11]

Stavebný blok výkonovej elektroniky (PEBB) je všeobecná koncepcia (nie ochranná známka) obsahujúca niekoľko technologických prvkov, ktoré sú považované za kľúčové na dosiahnutie významného zníženia nákladov, strát, veľkosti a hmotnosti aplikácií výkonovej elektroniky. Hoci samotné zníženie nákladov je najdôležitejším prínosom, lepší rozptyl strát, veľkosť a váha môžu tiež viesť k dodatočným úsporám nákladov. [8]

3.5 SMART POWER IC

Dnešné výkonové technológie umožňujú prídanie diagnostických funkcií a ochranných obvodov pre elektronické výkonové spínače na čip. Táto kombinácia výkonových zariadení, analógových a digitálnych obvodov sa nazýva „Smart Power“ obvody. Jedná sa o druh monolitickéj systémovej integrácie zahŕňajúcej aj výkonové prvky. Využitie majú v rôznych priemyselných aplikáciách a tak isto v automobilovom priemysle. Ako príklad uvediem inteligentný výkonový spínač pre kontrolu brzdového systému ABS, výkonový čipový systém pre kontrolu airbagov, manažment motora, spínané zdroje, inteligentné vypnutie všetkých svetiel atď. Tvorí ho kombinácia nízkonapäťových CMOS (logiky), vysokonapäťových MOS a vertikálnych DMOS výkonových tranzistorov na jednom čipe ako vidíme na obrázku 3.5. [25]

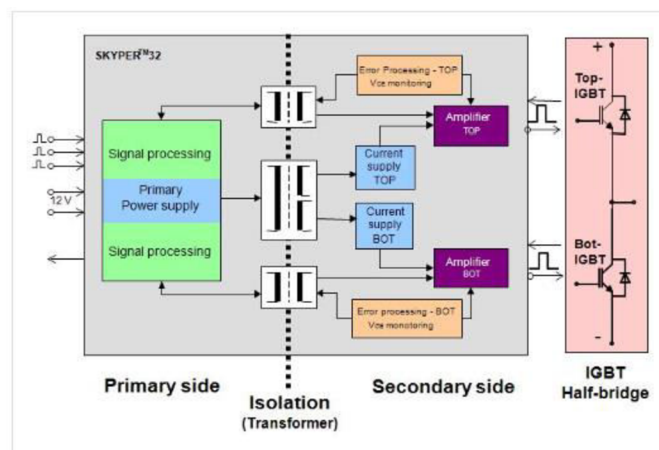


Obrázok 3.5 Smart power IC [25]

4 BUDIČ (DRIVER)

4.1 Topológia

Obvody budenia sa najčastejšie používajú na zosilňovanie signálov z riadiacich obvodov alebo mikroprocesorov, ktoré slúžia k ovládaniu výkonových spínačov/prvkov. Driver často využíva dodatočné funkcie, ktoré zahŕňajú odizolovanie riadiaceho a napájacieho obvodu (z dôvodu že výkonový prvok v obvode meniča má zvyčajne iný potenciál s rozdielom niekoľko stoviek voltov), detekciu porúch, ukladanie a hlásenie zlyhaní riadiaceho systému, ktoré slúžia ako prevencia proti poruchám, analyzovanie signálov snímačov a vytváranie pomocných napätí. Driver môže byť implementovaný ako dedikovaný integrovaný obvod, diskretný tranzistor alebo transformátor. Môžu byť tiež integrované v regulátore IO. Na obrázku 4.1.1 vidíme typický budič, kde z ľavej strany vstupuje signál z mikroprocesora alebo iného riadiaceho obvodu a dochádza k jeho spracovaniu. Tak isto je tu primárne napájanie z napätia 12 V.



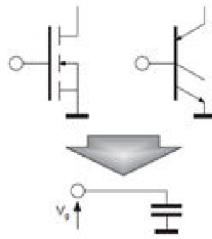
Obrázok 4.1.1 Bloková schéma budiča^[11]

Ďalej galvanické oddelenie transformátorom a na sekundárnej strane, ktorá funguje ako koncový stupeň zosilnenie nespojitého riadiaceho signálu, jeho privedenie na IGBT tranzistory v zapojení riadeného polmostíka a spracovanie chybového signálu na základe snímania napätia V_{CE} .

Odizolovanie riadiaceho a napájacieho obvodu dosiahneme:

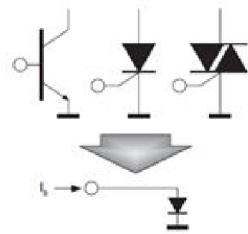
- Transformátor
- Optočlen - často sa používajú na izoláciu signálov namiesto transformátorov. Optočlen je vyrobený z LED diódy (svetlo vyžarujúcej diódy) a svetelne citlivého tranzistora (fototranzistora) v jednom balení. Vo všeobecnosti sú optočleny nižšej kvality ako transformátory, pretože vykazujú vyššiu náchylnosť na zmeny v obvode ako transformátor, menšiu trvácnosť, obmedzený výkon a obmedzené izolačné napätie. Tieto nevýhody sú zreteľnejšie v lacných optočlenoch. ^[11]

U prvkov riadených napätím si ich riadiacu elektródu gate si môžeme predstaviť ako kondenzátor z obrázku 4.1.2. Typickými zástupcami sú MOSFET a IGBT



Obrázok 4.1.2 Riadiaca elektróda napät'ovo riadených prvkov^[10]

Naopak prvky ako sú tyristory, triaky, a bipolárne tranzistory sú riadené prúdom a teda ich riadiacu elektródu bázu si môžeme predstaviť ako PN diódu na obrázku 4.1.3.^[1]

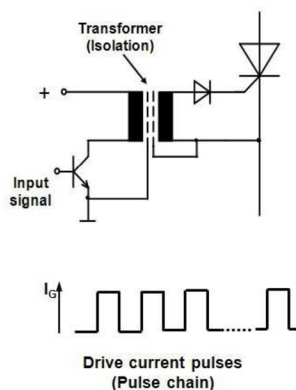


Obrázok 4.1.3 Riadiaca elektróda prúdovo riadených prvkov^[10]

4.2 Budič tyristora.

V budiacich obvodoch tyristora sa na jeho spustenie ako riadiace signály používajú prúdové impulzy. Frekvencia, dĺžka fázy, sekvencia atď. týchto impulzov sú ovplyvnené signálmi dodávanými riadiacou elektronikou.

Schéma zapojenia, najjednoduchšieho koncového stupňa budenia pre tyristor ktorá obsahuje impulzný transformátor je znázornená na obrázku 4.2.^[2]



Obrázok 4.2 Jednoduchý budič tyristora a jeho riadiace prúdové impulzy^[10]

4.3 Koncový stupeň budenia BJT

Výkonové BJT vyžadujú relatívne vysoký riadiaci výkon kvôli ich malému prúdovému zisku. Tento riadiaci výkon musí byť dodaný cez obvody budenia bázového prúdu, čo je dôvod, prečo nemôžu byť súčasťou integrovaných obvodov. Koncový stupeň budiacich obvodov bázového prúdu musí byť schopný zvládnuť jednotky až desiatky Ampérov. Na obrázku sú znázornené dva typy takýchto stupňov, v ktorých sú nízko resp. strednýkonové tranzistory reprezentované prepínačmi K_{ON} a K_{OFF} . Na obr.4.3 a) je znázornený jednoduchý koncový stupeň, ktorý nepoužíva záporné napätie pre prechod báza - emitor. Zrýchlenie pri vypnutí tranzistora sa dosiahne pomocou odporu $R_{B(OFF)}$, ktorý je pripojený medzi bázu a zem. Tento odpor umožňuje prúdenie rekombinačného prúdu $i_{B(OFF)}$ určeného elektrickými nábojmi z vrstvy bázy, ktoré sa podieľajú na vedení tranzistora. Hodnota $R_{B(OFF)}$ je výsledkom kompromisu. Menší odpor znamená kratšiu dobu vypnutia. Na druhej strane, menší odpor znamená, že väčšia časť prúdu $I_B +$ (dodávaného zdrojom V_{B+}) je smerovaná do zeme, keď je tranzistor v zapnutom stave. Takže, aby sme získali dostatočný bázový prúd, musíme zvýšiť I_B (o dost veľkú hodnotu, čo zvyšuje riadiaci výkon:

$$P_{control} = V_{B+} \cdot I_{B+} \quad [27] \quad (4.3.1)$$

Napätie $I_B +$ dodané zdrojom závisí od základnej hodnoty prúdu $i_{B(ON)}$ potrebnej na nasýtenie tranzistora a hodnoty odporu $R_{B(OFF)}$:

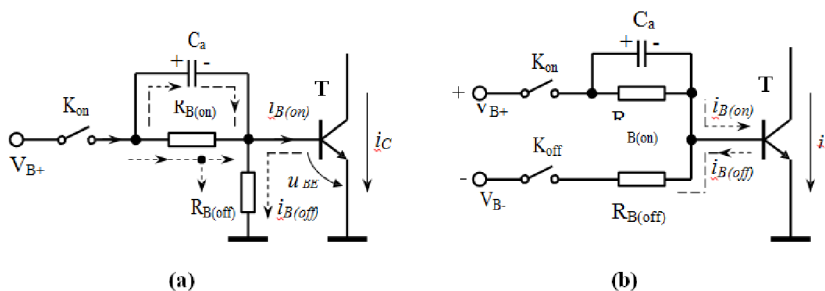
$$I_{B+} = I_{B(on)} + \frac{V_{BE(on)}}{R_{B(off)}} \quad [27] \quad (4.3.2)$$

Pri podmienke

$$I_{B(on)} \geq \frac{I_c}{\beta} \quad [27] \quad (4.3.3)$$

Kondenzátor C_A zapojený paralelne s odporom $R_{B(ON)}$ sa nazýva akceleračný kondenzátor a má za úlohu urýchliť prechod tranzistorov do zapnutého stavu injekciou špičkového prúdu do bázy. Špičkový prúd sa objaví ihneď po zopnutí spínača K_{ON} , keď je kapacita C_A nabitá. Preto prúd $I_B +$ obíde odpor $R_{B(ON)}$, a je limitovaný iba vnútorným odporom zdroja a dynamickým odporom spojenia báza - emitor. Kondenzátor sa začne nabíjať, až kým jeho napätie nebude zhodné s úbytkom napätia na odpore $R_{B(ON)}$. Od tohto momentu celý prúd $I_B +$ bude prúdiť odporom $R_{B(ON)}$.

Na obr. 4.3 b) je znázornený koncový stupeň BJT drivera, ktorý používa záporné blokovacie napätie $V_B -$). Akonáhle je koncový prúd $i_{B(ON)}$ prerušený spínačom K_{ON} , prechod B-E je záporne polarizovaný napätím $V_B -$ cez spínač K_{OFF} . To vydie k vytvoreniu rekombinačného prúdu $i_{B(OFF)}$, ktorý je väčší ako ten istý prúd zobrazený na obrázku 4.3 a). Táto zvýšená hodnota vedie k rýchlejšiemu vypnutiu BJT. Možno povedať, že finálna fáza prezentovaná na obr.4.3 b) je vylepšená verzia, ktorá je prezentovaná na obr.4.3 a). V aplikáciách je možné odstrániť odpor $R_{B(OFF)}$ z obr.4.3 b), ak nechceme regulovať rýchlosť vypnutia a nechceme obmedzovať prepätia na spínačoch. Pretože prechod B-E má nízke záverné napätie, odporúča sa, aby blokovacie napätie $V_B -$ neprekročilo hodnotu 7 až 10 V. [27]



Obrázok 4.3 a) koncový stupeň BJT s kladným napätím prechodu báza – emitor^[27]

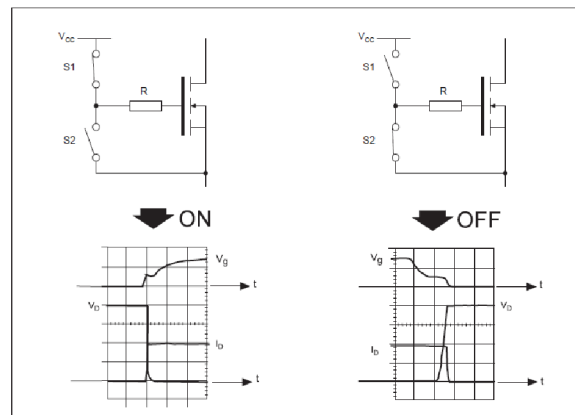
b) koncový stupeň BJT so záporným napätím prechodu báza – emitor^[27]

4.4 Budenie MOS a IGBT

4.4.1 Zopnutie

Keď sa spínajú za rovnakých podmienok, IGBT a aj MOSFET sa správajú presne rovnakým spôsobom a majú veľmi podobné charakteristiky prúdu a napätia. Na obrázku 4.4.1 je najjednoduchší spôsob nabíjania a vybíjania kapacity hradla gate tranzistora MOSFET. Dôležitým atribútom pre budič MOSFETu je jeho schopnosť zabezpečiť dostatočný prúd, aby rýchlo prešiel oblasťou Millerovej oblasti (Miller Plateau kapacita gate-to-drain C_{GD}) v prechodovom intervale medzi vypnutím, zapnutím a naopak. V Millerovej oblasti napätie

na gate zostáva na konštantnej úrovni, zatiaľ čo napätie na drain podľa spínania stúpa alebo klesá, vo väčšine aplikácií je toto napätie približne 4 až 6 V, v závislosti od úrovne spínaného prúdu.



Obrázok 4.4.1 Spínanie a vypínanie IGBT^[10]

Napätie na gate IGBT potrebné pre vypnutie je vo všeobecnosti približne -8V až -15V, aby sa zabránilo nežiaducemu zopnutiu kapacity. Dobu vypnutia je možné podstatne skrátiť zavedením rekombinačných centier do PNP tranzistora T1. Tým sa však zmenší jeho prúdový zosilňovací činiteľ β a pre rovnaký prúd I_C bude do bázy potrebné zaviesť väčší prúd I_B . Pretože pri väčšom prúde tranzistorom VDMOS bude väčší úbytok na jeho odporu $R_{DS(ON)}$, bude tiež väčšie úbytok napätia na celej štruktúre IGBT. Potlačenie dynamických strát sa tak dosahuje na úkor zväčšenia strát vodivostných. Vhodným kompromisom je rozdelenie tranzistorov do troch skupín podľa maximálnej pracovnej frekvencie:

S (standard)	$f_{max} \approx 3 \text{ kHz}$	$U_{CE} \approx 1,5 \div 1,8 \text{ V}$	pre $U_{CEmax} = 600 \text{ V}$
F (fast)	$f_{max} \approx 10 \text{ kHz}$	$U_{CE} \approx 1,8 \div 2,0 \text{ V}$	pre $U_{CEmax} = 600 \text{ V}$
U (ultrafast)	$f_{max} > 10 \text{ kHz}$	$U_{CE} \approx 2,0 \div 2,2 \text{ V}$	pre $U_{CEmax} = 600 \text{ V}$ ^[12]

Izolácia medzi gate a emitorom je vyrobená z tenkého oxidu kremíka. Maximálne napätie nesmie nikdy prekročiť hodnotu od 20V do 25V, aby sa zabezpečilo, že vrstvy oxidu zostanú neporušené. Pre porovnanie sú hodnoty pre zapnutie a vypnutie uvedené v tabuľke:

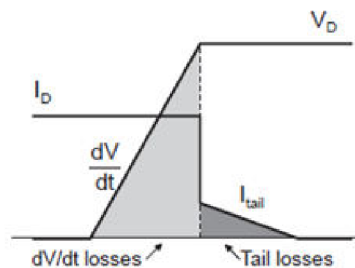
Tabuľka 4.4.1 Vypínacie a zapínacie napät'ové hladiny pre MOSFET a IGBT

	MOSFET [V]	IGBT [V]
Zapnutie	+10	+15
Vypnutie	0	-8 (-15)

4.4.2 Vypnutie

Vypnutie IGBT sa môže rozdeliť na dva rozdielne intervaly, ako je to znázornené na obrázku 4.4.2. V prvom intervale sa chová podobne ako MOSFET. Zvýšenie napätia na drain (dV/dt) je nasledované veľmi rýchlym poklesom spínaného prúdu. Straty v tomto intervale (dV/dt) závisia hlavne od rýchlosti nárastu napätia, ktoré môže byť riadené veľkosťou odporu pripojeného na gate. Druhý interval "zvyškového prúdu" (tail current) je špecifický pre IGBT (u MOSFETu neexistuje).

Tento prúd je spôsobený menšinovými nosičmi náboja zachytenými v "báze" bipolárnej výstupnej časti IGBT, čo spôsobuje, že zariadenie zostáva určitý čas zapnuté. Na rozdiel od bipolárneho tranzistora nie je možné tieto nosiče extrahovať, aby sa urýchlilo prepnutie, pretože neexistuje žiadne vonkajšie spojenie s bázou parazitnej PNP/NPN štruktúry, zariadenie zostane zapnuté, až kým nosiče nerekombinujú prirodzene. Z toho vyplýva, že obvod budiča nemá vplyv na úroveň zvyškového prúdu a jeho profil. Zvyškový prúd sa však výrazne zvyšuje s teplotou. Keďže sa tento interval vyskytne, keď je na súčiastke už značné napätie, spôsobuje pri každom vypnutí stratu. Celkové straty pri vypnutí sú zobrazené na obrázku 5 ako sivá oblasť.



Obrázok 4.4.2 Spínacie straty IGBT^[10]

Výkon zahrňajúci tieto dva typy spínacích strát je spojený s frekvenciou spínania. Straty pri vypnutí sa stávajú kritickými pri prevádzke vo vysokých frekvenciách. V tomto prípade môže byť dV/dt zvýšená (a teda znížená strata) znížením veľkosti odporu pripojeného na gate R_G , čo umožní rýchlejšie nabíjanie kapacity hradla gate. Spínacie straty sú úmerné veľkosti odporu R_G - napríklad zníženie odporu zo 100 na 10 znižuje straty dV/dt o faktor 10. Je však potrebné pamätať na to, že straty spôsobené zvyškovým prúdom IGBT sú úplne nezávislé od hodnoty odporu R_G .^{[5][10]}

5 MATERIÁLY, HEMT ŠTRUKTÚRA A TRANZISTOR

V tejto kapitole predstavím materiály ktoré majú zatiaľ menšinový podiel na trhu ale v budúcnosti ich dôležitosť bude stúpať a môžu plnohodnotne nahradiť kremík. Kapitulu uzavriem princípom štruktúry HEMT a tranzistorom HEMT na báze týchto materiálov.

5.1 Súčasnosť

V súčasnosti je nosným materiálom na výrobu polovodičových materiálov kremík. Radí sa aj s Germániom medzi elementárne polovodiče. Ich výhodou je jednoduchšia technologická spracovateľnosť vo výrobe, čistota a aj následná procesná úprava vytvárania štruktúr. Hlavne kremík sa vyznačuje svojou čistotou, mechanickými vlastnosťami a výrobou na waferoch väčších rozmerov.

Existuje však oveľa viac materiálov ktoré môžu na tento účel slúžiť, niektoré z nich sú perspektívnejšie, iné menej. Okrem najznámejších polovodičov IV. skupiny ako Si a Ge, poznáme aj viaczložkové materiály pozostávajúce z prvkov III. a V. ale aj s kombinácie prvkov II. a VI. skupiny. Technologická spracovateľnosť a procesná úprava viaczložkových prvkov je o niečo horšia ako v prípade elementárnych polovodičov.

5.2 GaAs

Typickým príkladom viaczložkových polovodičov je arzenid gália (GaAs). Arzenid gália (GaAs) je zlúčenina z prvkov gália a arzenu. Ide o dvojzložkový materiál pozostávajúci z prvkov III. a V. skupiny. Začal sa skúmať čoskoro po objave tranzistora v roku 1947, kedy bol GaAs a ďalšie polovodičové materiály posudzované ako potencionálni kandidáti na výrobu elektrických súčiastok. Trvalo desiatky rokov, než tento „materiál budúcnosti“ zažil prvý komerčný úspech, bolo to až v roku 1970. GaAs je materiál s vysokou mobilitou elektrónov vhodný pre vysoko-rýchlostné aplikácie. Je možné použiť na vyššie teploty ako kremík, pričom napätie v priepustnom smere bude nižšie, čo je spôsobené vyššou mobilitou elektrónov. Trpí problémom čistoty a dostatočnej veľkosti kryštálov.

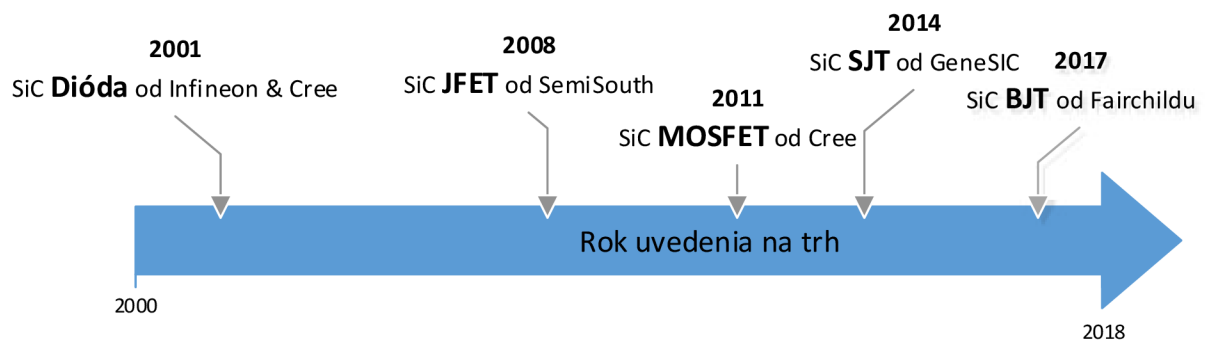
GaAs je často používaný ako podkladový materiál pre epitaxiálny rast iných polovodičov III-V, vrátane InAsGa, AlGa a ďalšie.

Jeho aplikácie sú napríklad nevykonové veľmi rýchle obvody. V súčasnosti nie je podiel tohto materiálu na trhu polovodičov nejako veľký.

5.3 SiC

Karbid kremíka známy tiež pod obchodným názvom karborundum jedná sa o zlúčeninu kremíka a uhlíka. Oba materiály sú zo IV. skupiny. SiC je podobne ako GaAs známy už desaťročia, avšak iba v posledných dvadsiatich rokoch bol dostatočne preštudovaný a boli využité jeho polovodičové vlastnosti. Jeho mechanické vlastnosti sa môžu značne odlišovať v závislosti od spôsobu prípravy a kvality východiskovej suroviny. Čistý karbid kremíka možno pripraviť metódou CVD (Chemical Vapor Deposition). Jej nevýhodou je vysoká ekonomická náročnosť a nízke výťažky, naopak výhodou je vysoká čistota, homogénnosť a jemnosť.

V súčasnej dobe sa za masívneho vývoja z tohto materiálu vyrábajú výkonové súčiastky ako diódy, MOSFET, JFET, IGBT, GTO, časová os ich uvedenia na trh je uvedená na obrázku 5.3. SiC sa rýchlo stáva polovodičovou voľbou pre pokročilé aplikácie.



Obrázok 5.3 Časová os vývoja jednotlivých komponentov z SiC a ich výrobcov

5.4 GaN

Galium Nitrid, slovensky nitrid gália je ďalší perspektívny materiál. Je to dvojzložkový polovodič tvorený z prvkov III. a V. skupiny periodickej tabuľky prvkov. Tak isto ako SiC je mechanicky veľmi stabilný a tvrdý a vo svojej čistej forme odoláva mechanickým namáhaniam.

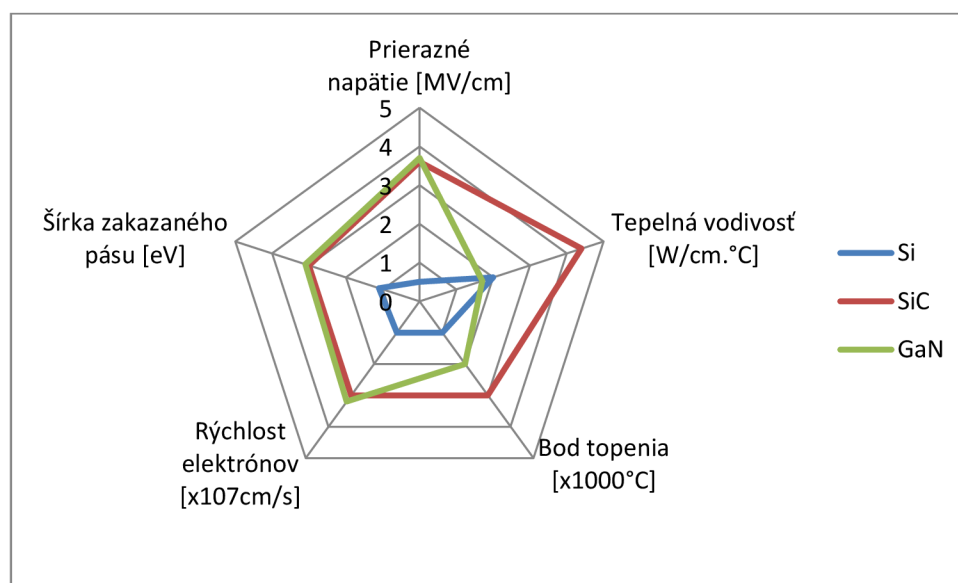
5.5 Zhrnutie a trend

V tabuľke 5.5 sa nachádza porovnanie vlastností jednotlivých materiálov. Ako prvá je uvedená šírka zakázaného pásu. Tento parameter je dominantný pre SiC a GaN, ktoré sa už zo svojej podstaty nazývajú polovodiče so „širokým zakázaným pásom“. Čím je táto hodnota vyššia, tým môžeme daný materiál používať pri vyšších teplotách, k tomu prispieva aj hodnota tepelnej vodivosti, v ktorej dominuje materiál SiC. Elektronika založená na SiC má teoretický potenciál pracovať pri teplotách prechodu (junction temperature) nad 600 °C. Takto rozšírený teplotný limit umožní vysokú integráciu systémov výkonovej elektroniky s veľmi nízkou hmotnosťou a značnou výkonovou hustotou.

Tabuľka 5.5 Porovnanie vlastností polovodičových materiálov

Vlastnosti	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Šírka zakázaného pásu [eV]	1.11	1.43	3.26	3.42
Relatívna dielektrická konštanta	11.8	12.8	9.7	9.0
Intenzita elektrického poľa [V/cm]	2.5e5	3.5e5	35e5	35e5
Saturačná rýchlosť [cm/sec]	1.0e7	1.0e7	2.0e7	1.5e7
Pohyblivosť elektrónov [cm ² /V-sec]	1350	6000	800	1000
Pohyblivosť dier [cm ² /V-sec]	450	330	120	300
Tepelná vodivosť [W/cm-K]	1.5	0.46	4.9	1.7

Relatívna dielektrická konštanta, spolu s intenzitou elektrického poľa nám definuje napäťovú zaťažiteľnosť materiálu. Z toho vyplýva že SiC a GaN dosahuje vyššie hodnoty záverného napätia, konkrétne 10 × viac ako kremík. Saturačná rýchlosť spolu s pohyblivosťou elektrónov a dier ovplyvňuje spínaciu rýchlosť, je dominantná pre GaAs, preto jeho použitie pre vysokorýchlostné aplikácie. Porovnanie vlastnosti jednotlivých materiálov vinikne na radarovom grafe 5.5.1.



Obrázok 5.5.1 Radarový graf vybraných materiálov

Hlavne vysoká spínacia frekvencia daných materiálov nám pomáha redukovať náklady na pasívne prvky ako cievka, kondenzátor, taktiež požiadavky na chladič a tým aj na rozmery celého meniča. Nevýhodou je že v prípade vyšších frekvencií do popredia vystupujú spínacie straty a tak isto je zvýšená požiadavka na výstupný EMI filter a budič.

Jedinou všeobecnou nevýhodou zabraňujúcou masovému komerčnému využitiu v elektronike je v súčasnosti ich cena. Tá je daná jeho zložitým výrobným procesom, najmä

samotného materiálu, hlavne u SiC. Respektíve následným obťažnejším procesom výroby samotných polovodičových súčiastok. Je to dané najmä výrobou na waferoch menšieho priemeru a nižšou výťažnosťou.

Preto je v súčasnosti dominantná skôr aplikácia hybridných SiC štruktúr (zväčša IGBT a SiC freewheeling dióda). Kedy technologický proces výroby SiC diód je už pomerne dobre zvládnutý. [15] [16]

5.6 Štruktúra HEMT

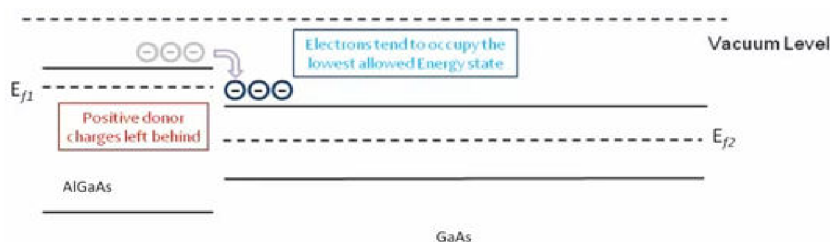
HEMT znamená v preklade štruktúra s vysokou pohyblivosťou elektrónov. Sú na báze materiálov ktorých problematika je bližšie uvedená v tejto kapitole. Najrozšírenejšie štruktúry HEMT sú na báze materiálov

GaN (Galium-Nitrid)

GaAs (Galium-Arzenid)

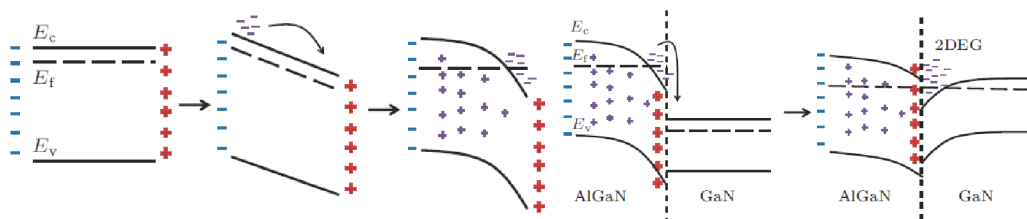
AlGaN (Aluminum-Galium-Nitrid)

Podstatou je vytvorenie heteropriechodu na rozhraní minimálne dvoch vyššie uvedených polovodičových materiálov, ktoré musia mať rozdielnu šírku Zakázaného pásu (bandgap). To nám následne umožní takzvaný „Modulation Doping“, v preklade modulačný doping. Ako vidíme na 5.6.1, spojením dvoch materiálov, dochádza k prekrytiu ich vodivostného pásu. Keďže elektróny majú tendenciu obsadiť najnižší povolený energetický stav, tento mechanizmus nám umožňuje výrazne zvýšiť koncentráciu voľných nosičov náboja v polovodičovej vrstve ale bez prítomnosti nečistôt ktoré sa objavujú pri konvenčných technikách ako napr. iónová implantácia, katódové naprašovanie, ktoré tiež vedie k zvýšeniu koncentrácie ale elektricky nabitých nečistôt takto zanesených do mriežky ju narúšajú (spôsobujú chyby mriežky ako interstícia, vakancia,..) a to spôsobuje rozptyl a kolízie elektrónov a spomaľuje ich rýchlosť.



Obrázok 5.6.1 “Modulation doping“ [29]

Vodivý kanál u HEMT tvorí tzv. „Two dimension electron gas“ (2DEG), po slovensky dvojrozmerný elektrónový plyn. Princíp jeho vytvorenia pre N-dotovanú AlGaAs/GaN vrstvu vidíme na obrázku 5.6.2.



Obrázok 5.6.2 Princíp vytvorenia 2DEG^[29]

Na rozhraní materiálov dochádza k narušeniu termodynamickej rovnováhy. To je spôsobené voľnými nosiče náboja (elektróny), ktoré sú priťahované k rozhraniu AlGaIn/GaN. Dochádza ku vzájomnému posunu energetických pásov a to tak že vo valenčnom páse polovodiča s menšou šírkou zakázaného pásu (GaN) sa Fermiho hladina posunie nad úroveň valenčného pásu, to umožní už popísaný modulačný doping. Tým dochádza k postupnému obnoveniu termodynamickej rovnováhy a zrovnaniu Fermiho hladiny v oboch materiáloch. V GaN vrstve sa vytvorí kvantová jama (oblasť prekrytia E_c a E_f) voľné nosiče (elektróny) v nej vytvoria 2DEG. Keďže je ich pohyb v kolmom smere zanedbateľný, pohybujú sa paralelne, odtiaľ je názov „dvojrozmerný“ elektrónový plyn. 2D vodivý kanál uväzní elektróny na veľmi malej ploche, čo nám ešte zvýši výbornú prúdovú hustotu, zároveň sme významne zvýšili koncentráciu (modulačným dopingom) a neznížili rýchlosť elektrónov rozptylom na prímiesiach.

V MOSFEToch je práve rozptyl na prímiesiach hlavnou príčinou pomerne nízkej pohyblivosti. Zatiaľ čo u MOSFETu riadiace napätie ‘moduluje’ prierez kanálu pri HEMT riadiace napätie ‘moduluje’ priamo vodivosť kanálu, pričom prierez zostáva bez zmeny.

Rozdelenie:

- HEMT so zhodnou kryštalickou mriežkou , napríklad: AlGaAs/GaAs, AlInAs/InGaAs/InP
- HEMT so rozdielnou kryštalickou mriežkou (pseudomorfný HEMT) resp. pHEMT. Napríklad: AlGaAs/InGaAs/GaAs, SiGe/Si
- Metamorfný HEMT (mHEMT) majú vyrovnávaciu vrstvu (buffer layer) medzi dvomi rozdielnymi kryštalickými mriežkami, napríklad: AlInAs/InGaAs/GaAs, AlInSb/InSb

Výhody HEMT technológie:

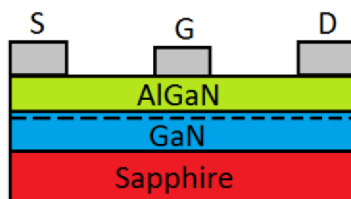
- Vyššie prierné napätie
- Schopnosť prenášať väčšie DC alebo RF prúdy
- Veľmi dobré vysokofrekvenčné charakteristiky
- Nízky prechodový odpor
- Pri GaAs HEMT, rýchlosť elektrónov 5 krát väčšia ako u Si
- Dobré tepelné vlastnosti (teplotná vodivosť) z dôvodu použitia Si alebo SiC substrátu
- Teplotná stabilita (materiály s vyšším bandgap číslom)
- Určené pre vysokorýchlostné a vysokovýkonové aplikácie

Nevýhody HEMT technológie

- Nie úplne odladený proces, z toho prameniace neželané chyby ako tvorenie pascí (traps) a na nich neželaný prúdový rozptyl
- Kontrola výrobného procesu
- Vyšší zvodový prúd (leakage current)
- Spôľahlivosť kvalita a reprodukovateľnosť
- Vysoká cena epitaxie
- Relatívne nová technológia

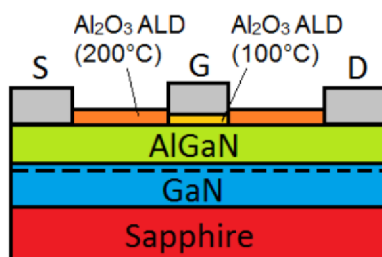
5.7 Tranzistor HEMT

Prvé konvenčné dostupné HEMT-y na trhu využívali ako substrát GaAs (Galium-Arzenid) s vrchnou vrstvou AlGaAs. (Aluminium-Galium-Arzenid). Výskum tohto materiálového systému sa však už priblížil k teoretickým limitom, preto je pre zachovanie technologického pokroku potrebný vývoj nových materiálov ako napríklad AlGaN/GaN, ktorý je ďalším typom HEMT tranzistoru. Veľké zvýšenie záujmu o tranzistory HEMT prinieslo zavedenie už spomenutej technológie GaN. Tieto tranzistory mali hradlo vytvorené kovovým kontaktom, takýto GaN HEMT je na obrázku 5.7.1.



Obrázok 5.7.1 GaN HEMT s kovovým kontaktom^[30]

U výkonových tranzistorov, kde má hradlo veľkú plochu, by sa u hradla v takom usporiadaní prejavovali veľké zvodové prúdy (spôsobené povrchovými defektami a konečnou výškou Schottkyho bariéry). U výkonových tranzistorov HEMT sa preto hradlo oddeľuje vrstvou izolantu. Na vyriešenie tohto problému sa používajú MIS (kov-izolant-polovodič) alebo MOS (kov-oxid-polovodič), kde ako izolačnú vrstvu môžeme použiť SiO_2 , Si_3N_4 , HfO_2 alebo Al_2O_3 , tzv. MOSHEMT, vid' obrázok 5.7.2.



Obrázok 5.7.2 MOSHEMT^[30]

Problém je výroba GaN kryštálov, ktorá je komplikovaná a nedarí sa vyrábať GaN kryštály o veľkých priemeroch. Je preto snaha vyrábať HEMT epitaxným rastom na rôznych typoch podložiek. Z hľadiska dostupných technológií je najvýhodnejšie podložka monokryštalický kremík. Pri ňom však musí byť vyriešený problém rozdielnych mriežkových konštánt, preto sa používa ešte tzv. „vyrovnávacia vrstva“ (anglicky buffer layer). Ďalšie možné podložky sú SiC alebo zafír.

Hlavné výhody tranzistoru HEMT:

- Nie sú u neho prechody. Kanál je vytvorený na základe "presakovania" elektrónov z bohato dotovanej oblasti s veľkou šírkou zakázaného pásu. Kanál stále existuje a nie je nutné zabezpečovať zaplnenie kanála minoritnými nosičmi alebo nosiči z oblastí kontaktov S a D.
- Laterálna štruktúra HEMT má v porovnaní s vertikálnymi štruktúrami, napr. VDMOS, oveľa menšie parazitné kapacity, umožňuje teda podstatne rýchlejšie zopnutie a rozopnutie aj z hľadiska časových konštánt obvodu.
- Pretože štruktúra HEMT nemá prechody, nemá ani parazitné bipolárne tranzistory a nehrozí tu nebezpečenstvo nechceného zopnutie štruktúry. Ak nastane preraz, blíži sa viac prerazu izolantu ako lavinovému prierazu prechodu.

V niektorých zapojeniach však môže byť nevýhodou, že tranzistor HEMT nemá substrátovú diódu. V súčasnej dobe výkonové tranzistory HEMT začínajú v oblastiach výkonov do 10 kW vytlačať mikrovlnné elektrónky. Sú v perspektívne pre mikrovlnné a vysoko výkonové zosilňovače. Typické oblasti použitia týchto tranzistorov sú vesmírne rádio teleskopy, mobilné telefóny.^[29]

5.8 Situácia na trhu

V súčasnosti tranzistory HEMT produkuje niekoľko firiem na trhu ako napríklad aj ON Semiconductor (v kaskádovom zapojení ako NTP8G202N) v spolupráci s firmou Transphorm USA, ktorá patrí v produkcii GaN HEMT tranzistorov medzi lídrov. Transphorm má vo svojom portfóliu tranzistor TPH3207WS, čo je 650V GaN FET (kaskádové zapojenie) s nominálnym prúdom 50A.

Panasonic uviedol svoju radu X-GaN™ tranzistorov. Tu sú použité na „rast“ tranzistorov už spomenuté kremíkové podložky (substrát), kvôli na udržanie výrobných nákladov na únosnej úrovni. Jeho odlišnosťou je druhá P-dotovaná hradlová vrstva, ktorá vstrekuje diery pod drain pri závernom namáhaní (blokovacie napätie), to rieši problém kolapsu prúdu, ktorý je vlastný konvenčným tranzistorom založeným na báze GaN.

„Kolaps prúdu“ je fenomén, ktorý nastáva počas prevádzky keď elektróny, ktoré sú vystavené vysokému elektrickému poľu, sa dostanú do pascí (v blízkosti kanála). Pri vysokej spínacej frekvencii sa množstvo takto zachytených nábojov rýchlo zvyšuje, zvyšuje rezistivitu kanála a vedie k zničeniu súčiastky.

Panasonic taktiež uviedol na trh tranzistor pod označením, PGA26C09DV, pre napätie 600V a prúd 15A. Jedná sa o GIT, čiže Gate Injection Transistor. Je to varianta HEMT tranzistora, tak isto na kremíkovom substráte. Je použiteľný pre meniče menice o výkone jednotiek až 10 kW. Toto je výkonové spektrum v ktorom sa dnes pohybuje väčšina výrobcov.

Firma Qorvo produkuje GaN tranzistory nielen na kremíku ale aj na karbide kremíka (SiC). Porovnanie týchto dvoch substrátov je jednoznačne v prospech SiC, kde GaN s týmto substrátom pri rovnakom výkone vykazuje o 54 °C nižšiu teplotu, teplota kanála je nižšia o 27% a životnosť prvku sa zvýši 10 až 100 násobne. ^{[12][17][18][19][20][22][23][24]}

6 CHLADENIE

95% aplikácií chladenia vo výkonovej elektronike pokrývajú

- Chladenie vzduchom (nútené)
- Chladenie kvapalinou

Pri týchto typoch chladenia sa už samozrejme uvažuje s namontovaním výkonových modulov na chladič, ktorý poskytuje rozšírenú plochu pre odvod tepla, ktorý nastáva pomocou prestupu tepla k chladiacemu médiu buď priamym vedením alebo prostredníctvom tepelného nosiča.

Môžu byť použité dvoma spôsobmi:

- zvýšená hustota výkonu, ale s vysokou dynamikou teploty čipu (znížená životnosť)
- nízka teplota čipu, dlhá životnosť

Z ďalších vybraných spôsobov sú to napríklad, chladenie odparovaním, sprejové chladenie, tryskové termosifónové chladenie, pool boiling, tepelné trubičky, atď. V tejto kapitole predstavím ich základný princíp a ich výhody, resp. nevýhody. V tabuľke 6 je porovnanie rôznych typov chladenia.

Tabuľka 6 Porovnanie rôznych typov chladenia

Metóda chladenia	Typický koeficient prestupu tepla [W/m²K]
Vzduch (prirodzené prúdenie)	3-25
Voda (prirodzené prúdenie)	15-1000
Vzduch (nútené prúdenie)	10-200
Voda (nútené prúdenie)	do 10000
Termosifónové chladenie	5000-50000
Tepelné trubičky	do 50000
Tryskové chladenie	do 50000
Pool boiling	do 50000
Sprejové chladenie (voda)	do 500000

6.1 Chladienie vzduchom

Vzduch vôbec nie je výnimočným vodičom tepla. Jeho tepelná vodivosť je približne 0.026 W/mK. Existujú však výhody pri použití vzduchu ako chladiaceho média, je to napríklad jeho univerzálna dostupnosť, schopnosť izolovať a tak isto jeho nekorozívny charakter.

- *Prirodzené chladienie*

Je všeobecne známe, že vzduch stúpa ako sa zahreje. Je to spôsobené v dôsledku zníženia jeho hustoty (konvekciou). Prúd vzduchu vyplývajúci z tohto konvekčného procesu sa označuje ako laminárne prúdenie. Tento proces poskytuje prirodzený prostriedok pre odvádzanie tepla. Výhodou prirodzeného chladienia je jeho nízka resp. žiadna miera opotrebenia a z toho vyplývajúca minimálna, resp. žiadna nutnosť údržby. Ďalšia výhoda je nulová emisia hluku v aplikáciách. Nevýhodou je jeho veľmi nízka účinnosť.

- *Nútené chladienie*

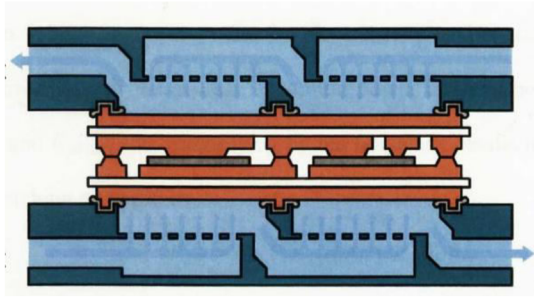
Používajú sa ventilátory za účelom zvýšenia rýchlosti molekúl vzduchu. Táto zvýšená rýchlosť prispieva k vytvoreniu turbulentného prúdenia molekúl vzduchu (oproti laminárnemu) a efektívne zvyšuje odvod tepla do okolitej atmosféry. Výhodou použitia chladienia s núteným obehom vzduchu je to, že má oveľa lepší chladiaci účinok, než chladienie prirodzené. Nevýhodou je vysoká hladinu hluku pri aplikáciách, rovnako ako výsledné opotrebenie. Na porovnanie, nútené chladienie môže oproti chladieniu prirodzenému znížiť tepelný odpor toho istého chladiča v rozsahu 5 až 25%.^[4]

Nútené chladienie rozdeľujeme podľa typu ventilátora a prúdenia na

- axiálne
- radiálne
- tangenciálne

6.2 Chladienie kvapalinou

Efektívnejšou je chladienie kvapalinou, ktorá je vo väčšine prípadov voda alebo zmes voda/glykol. Tento typ chladienia sa používa pre meniče o výkone jednotiek MW a vyššom, kedy je možnosť aplikovať tzv. „sendvičové“ chladienie, ktoré vidíme na obrázku 6.2, ide o obojstranné vodné chladienie kapsulového balenia výkonovej súčiastky.



Obrázok 6.2 „Sendvičové“ chladenie kvapalinou^[4]

Moduly sú chladené kvapalinou už od pomerne malých výkonov. Hlavné tie ktoré už majú z prevádzkových dôvodov vodný cyklus (napríklad pohony vozidiel, galvanické inštalácie, indukčné vykurovanie,..). Teplota chladiacej kvapaliny je v rozmedzí 50 až 70 °C. Teplotný rozdiel medzi povrchom chladiča a chladiacou kvapalinou, je nižší ako pri chladení vzduchom

Na chladenie sú veľmi citlivo moduly IGBT, pretože je tu veľká hustota prúdu. Vzhľadom k parazitnému tyristoru v štruktúre IGBT môžu pri vysokej teplote nekontrolovateľne zopnúť. Oddelenie napäťových úrovní pri chladení vodou nie je taký problém ako by sa mohlo zdať. Merný elektrický odpor vody je v rádoch $10^{15} \Omega$. Čistá voda v jednom metri tenkej plastovej hadičky potom bude mať odpor $>1 \text{ M}\Omega$.

Faktory ovplyvňujúce tepelný odpor pri chladení kvapalinou:

- kontaktná plocha k chladiacej kvapaline (napríklad počet chladiacich kanálov)
- objemový prietok ako funkcia poklesu tlaku
- schopnosť skladovania tepla chladiacej kvapaliny
- turbulencia vo vode
- vedenie tepla a rozširovanie chladiča (materiál chladiča)
- teplota chladiacej kvapaliny (v závislosti od viskozity a hustoty)^[4]

Jeden zo spôsobov ako zvýšiť účinnosť kvapalinového chladiaceho systému je vkladanie cievok dovnútra chladiaceho kanálu na vyvolanie turbulentného prúdenia chladiacej kvapaliny. **Turbulentné prúdenie** vyvolané cievkami môže zvýšiť účinnosť chladiaceho systému o 15 až 20%. Turbulentné prúdenie môžu byť tiež vytvorené prítomnosťou mikrokanaľíkov v chladiacom kanáli. Nevýhodou spomínaných riešení je riziko zablokovania chladiaceho kanála z dôvodu nečistôt v chladiacej kvapaline.^[4]

6.3 Termosifónové chladenie

Pri termosifónovom chladení je prenos tepla dosiahnutý prirodzeným prúdením kvapaliny pôsobením gravitácie. Je založené na fakte že zohriata voda má nižšiu hustotu ako studená a preto stúpa do vrchnej časti chladiaceho systému a tým spôsobuje prirodzenú cirkuláciu chladiacej kvapaliny. Výhody termosifónového chladenia sú minimálne náklady na údržbu, minimálne opotrebenie a nízka hlučnosť. Hlavnou nevýhodou je že systém musí byť vždy vo vertikálnej polohe a preto má veľkú priestorovú náročnosť.^[4]

6.4 Chladenie prechodovou fázou média

Entalpia odparovania je množstvo tepla ktoré musí dané množstvo tekutiny absorbovať na prechod do stavu plyného. Opak tohto procesu sa nazýva entalpia kondenzácie. V každom z týchto stavov je rozptýlené rovnaké množstvo tepla. Chladiaca kvapalina sa odparuje v mieste vzniku tepla. Plyná látka prenáša teplo do kondenzátora (toto miesto pôsobí ako tepelný výmenník). Tu sa plyná látka vyzráža (kondenzuje) späť do svojej kvapalnej formy. Entalpia odparovania chladiacej kvapaliny je vysoká ($> 2000 \text{ kJ / kg}$).

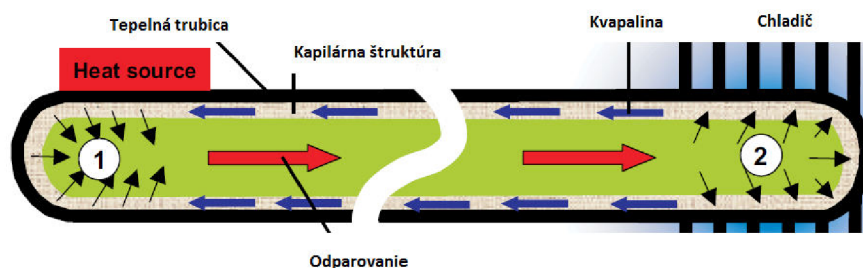
Príklady použitia tejto metódy chladenia zahŕňajú pool boiling, tepelné trubičky, rozstrekovacie (sprejové) chladenie a iné.^[4]

- **Pool boiling**

Je proces, kedy sa chladiace médium pri zdroji tepla zohrieva, vytvára bubliny plynu, ktoré kondenzujú na vrchnom chladiči. Pri vysokej hustote tepelného prúdu sa pri zdroji tepla môže vytvoriť vrstva pary. To znižuje alebo bráni kontaktu medzi zdrojom tepla a chladiacou kvapalinou, čo nevyhnutne vedie k veľkému zníženiu chladenia. To sa označuje ako Leidenfrost efekt.

- **Tepelné trubičky**

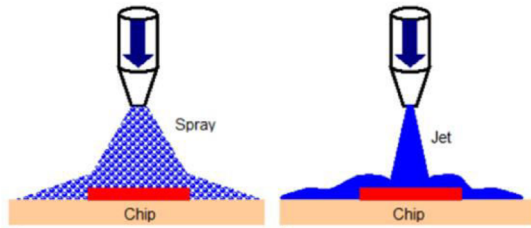
Sú veľmi zaužívaný spôsob chladenia vo výkonovej elektronike. Spoliehajú na prírodné sily pri prenose tepla. Sú naplnené malým množstvom tekutiny pod nízkym tlakom, ktorá sa pri zdroji tepla odparí a na strane chladiča opäť skondenzuje. Vnútorňa časť tepelnej trubice má kapilárnu štruktúru. Princíp je uvedený na obrázku 6.4.1.



Obrázok 6.4.1 Princíp chladenia tepelnými trubičkami^[4]

- **Sprejové a tryskové chladenie**

Tieto metódy chladenia používajú princíp naprašovania kvapalného chladiva vo forme kvapôčiek alebo prúdu z trysky ako je vidieť na obrázku 6.4.2.



Obrázok 6.4.2 Sprejové a tryskové chladenie^[4]

Chladenie môže byť aplikované z jednej alebo oboch strán. Chladiaca kvapalina sa vyparuje na mieste kde zasiahne povrch a na chladnejších miestach kondenzuje. Typickými chladiacimi látkami sú inertné kvapaliny. Je výhodné, ak chladiaca kvapalina priamo zasiahne čip, pretože výsledkom bude optimálne priame chladenie. Výhodou je odparovanie chladiacej kvapaliny priamo na čipe a teda rýchlejší prenos tepla. Nevýhody sú nízke množstvá tepla odparovania produkovaného fluórovanými uhl'ovodíkmi, zložitosť chladiaceho zariadenia (veľké množstvo zariadení, vrátane čerpadiel, rozstrekovacích rúrok, kondenzátorov, skladovacích nádrží, mikrofiltrov a uzavretý tlakový systém), vysoký tlak v celom chladiacom systéme 3 až 15 barov a riziko upchania dýzy (niektoré 0,1 mm).^[4]

7 ZÁVER

Úlohou tejto práce ako celku bolo v skratke zosumarizovať prierez, súčasný stav a trend vo výkonnej elektronike na poli diskretných výkonových súčiastok a a súčiastok na báze nových materiálov. Každá z čiastkových tém tejto práce je vhodná na hlbšiu analýzu, nakoľko na ich detailné rozpracovanie nebol priestor.

Čo sa týka kremíkovej technológie, tu prevláda hlavne trend zdokonaľovania. U prvkov na báze SCR je to snaha o vylepšenie procesu vypínania, čo na trh prinieslo nové prvky ako IGCT, MCT, ETO, ECT a iné. Menšiu renesanciu taktiež zažívajú zariadenia na báze statickej indukcia ako JFET, SITH. Vo všeobecnosti môžem povedať že rôzne modifikácie základných štruktúr vznikajú z potreby ich prispôsobenia požadovanej aplikácií a výkonovému spektru.

Integráciou týchto prvkov do výkonových modulov je ešte viac optimalizovaný ich výkon, chladenie a spoľahlivosť. Tá sa zvyšuje zakomponovaním snímačov, ochrán a riadenia. Moduly je možné skladať do rôznych modulárnych platforiem. Týmto spôsobom vznikne zákaznicke riešenie na mieru. Keďže sa jedná o modulárny systém, odpadá zdĺhavá inžinierska práca na strane zákazníka a významne sa skraca je čas dodania požadovaného riešenia na trh.

Nemenej úsilie je venované zvýšeniu účinnosti. Na jej dosiahnutie je potrebné zvýšenie spínacej frekvencie, prúdovej hustoty, výkonovej zaťažiteľnosti, spoľahlivosti a zníženie strát. Tu už kremíková technológia nestačí. O to sľubnejšie je použitie súčiastok na bázi nových materiálov, ktoré nám dosiahnutie týchto cieľov dovoľujú.

Tranzistory HEMT na báze GaN sú teoreticky schopné pracovať až do teploty 600°C. To však dnes ešte nie je reálne, pretože potrebujeme aby aj ostatná materiály ako púzdro tranzistora, DPS zniesli takúto teplotu. Veľmi perspektívny je aj karbid kremíka (SiC).

Masovému presadeniu týchto súčiastok stále bráni trh. To je spôsobené ich vyššou cenou, ktorá vyplýva z náročnejšej technologickej vyrobiteľnosti a výťažnosti procesu týchto materiálov. Kvôli cene niektorí potencionálni zákazníci zatiaľ nevidia úspory, ktoré im počítačová vyššia investícia môže priniesť. Ďalší z dôvodov je väčšina súčasných aplikácií, ktoré nedokážu potenciál takýchto súčiastok plne využiť.

Súčasný trend je skôr aplikácia hybridných SiC štruktúr (zväčša IGBT a SiC freewheeling dióda). Kedy technologický proces výroby SiC diód je už pomerne dobre zvládnutý. Avšak som presvedčený že tranzistory HEMT majú pred sebou svetlú budúcnosť.

LITERATÚRA

- [1] DUDRIK, J. *Výkonové polovodičové súčiastky*.
- [2] RASHID, M.H. *Power electronics handbook, devices, circuits, and applications*, 3rd ed., Elsevier Inc., 2011, 1409 s. ISBN: 978-0-12-382036-5
- [3] STENGL, J. P., TIHANYI, J., *Leistungs-MOS-FET Praxis*, 2., neu bearb. Aufl.-München : Pflaum, 1992 ISBN 3-7905-0619-2
- [4] WINTRICH A., NICOLAI U., TURSKY W., REIMANN T., *Application manual power semiconductors*, 2nd revised edition, ISLE Verlag 2015, Werner-von-Siemens-Strasse 16, D-98693 Ilmenau, Germany, © SEMIKRON International 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [5] KUBAT M., *Power semiconductors*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984, 507 s., ISBN 3-540-12569-8
- [6] Portál Odbornecasopisy.cz [online]. BARTOŠ S., *ETO: hybridní polovodičová součástka na bázi vypínacího tyristoru GTO*, AV ČR, Praha 2006 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [7] Portál Wikipedia.org [online]. 2017 [cit. 2017-13-02]. Dostupné z: <https://www.wikipedia.org/>
- [8] Portál Resourcecenter.ieee-pes.org [online]. *Power Electronics Building Block (PEBB) Concepts*, posted 27 Aug 2004, [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://resourcecenter.ieee-pes.org/>
- [9] Portál Ijedr.org [online]. CHAUDHARI K. R., *Emitter Turn-off Thyristor (ETO) - A High Power Semiconductor Switch*, © 2014 IJEDR | Volume 3, Issue 1 | ISSN: 2321-9939 2014 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <https://www.ijedr.org/>
- [10] PATHAK A. D., *MOSFET/IGBT drivers theory and application*, © 2001, IXYS Corporation; 3540 Bassett Street; Santa Clara, CA, Application note IXAN0010
- [11] Portál Powerguru.org [online]. 2012 [cit. 2017-19-04]. Dostupné z: <http://www.powerguru.org/driver-circuits/>
- [12] BOUŠEK J., KOSINA P., MOJROVÁ B., *Elektronické součástky*, skriptum, s.209, FEKT VUT v Brne, 2015, OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0193
- [13] Portál Odbornecasopisy.cz [online]. NOVÁK J., *Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti*, ČVUT v Prahe, 2003 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [14] Portál Odbornecasopisy.cz [online]. BARTOŠ S., *Součástky IGCT zjednoduší a zdokonalí výkonové polovodičové měniče*, Ústav pro elektrotechniku AV ČR, Praha, 2000, Článek vznikl za podpory grantu GA ČR 102/00/1246 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [15] Portál Matnet.sav.sk [online]. 2006 [cit. 2017-9-04]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=239>
- [16] Portál Apei.net, Copyright © 2017 Cree Fayetteville, Inc. All Rights Reserved [online]. 2017 [cit. 2017-09-05]. Dostupné z: <http://www.apei.net/applications/core-technologies/silicon-carbide.aspx>

- [17] COLINO L., BEACH R. A., *Fundamentals of Gallium Nitride Power Transistors*, © 2009, EPC – Efficient Power Conversion Corporation, Application note: AN002
- [18] Portál Odbornecasopisy.cz [online]. KABEŠ K., *Nitrid Gália-perspektivní materiál pro výkonovou elektroniku*, Časopis ELEKTRO 1/2013 [cit. 2017-15-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/01/Elektro_01_2013_output/web/Elektro_01_2013_opf_files/WebSearch/page0038.html
- [19] Portál Qorvo.com, [online]. 2017 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.qorvo.com/innovation/technology/gan>
- [20] Portál Transphormusa.com, [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.transphormusa.com/>
- [21] Datasheet, *SiC- JFET Silicon Carbide- Junction Field Effect Transistor*, Published by Infineon
- [22] Portál Fujitsu.com. [online]. 2014 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.fujitsu.com/downloads/EDG/binary/pdf/products/gan/gan.pdf>.
- [23] Portál Posterus.sk , HRONEC P., *Charakterizácia impulzných vlastností tranzistorov HEMT na báze GaN*, 2011, Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=12150>
- [24] Portál Eu.industrial.panasonic.com. [online]. © Panasonic Automotive & Industrial Systems Europe GmbH 2017, [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://eu.industrial.panasonic.com/products/semiconductors/power/gan-power-transistors>
- [25] ZITTA H., *Circuits and Systems - Smart Power Integrated Circuits*, Infineon Technologies, Austria. [online] Dostupné z: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-195-05.pdf>
- [26] BALIGA B. J., *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, © 2008 Springer Science + Business Media, LLC, s. 1085, ISBN 978-0-387-47313-0
- [27] ALBU M., *Control of the power bipolar junction transistors*, Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi, Power Electronics Laboratory.
- [28] LUKASIAK L., JAKUBOWSKI A., *History of Semiconductors*, Journal of Telecommunication and Information Technology, Institute of Microelectronics and Optoelectronics Warsaw University of Technology, 2010
- [29] GAMA R., *HEMT Technológia Tranzistorov, (High Electron Mobility Transistors Technology)*, s. 13, 2015 prezentácia.
- [30] BLAHO, M. *Nové technológie a ich využitie v GaN HEMT tranzistoroch*. Bratislava: Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Elektrotechnický ústav Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 2016. 36 s., 7 s. príloh. Dizertačná práca. Školiteľ: RNDr. Dagmar Gregušová, DrSc.
- [31] Application note AND9390/D, published by ON SEMICONDUCTOR, [online] Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9390-D.PDF>
- [32] Portál Completepowerelectronics.com. [online]. 2013, [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.completepowerelectronics.com/igct-insulated-gate-commutated-thyristor/>
- [33] Portál Kis.fri.uniza.sk. [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.kis.fri.uniza.sk/~ludo/e-Publikacia/elektronika/kap8/>

[34] Portál Connectortips.com [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z:
<http://www.connectortips.com/wave-solder-vs-press-fit-vs-smt/>

ZOZNAM SKRATIEK

IPM	Integrated Power Module, integrovaný výkonový modul
CNC	Computer Numeric Control, počítačovo-číslicové riadenie
SCR	Silicon Controlled Rectifier, riadený kremíkový usmerňovač
BTL	Bell Telephone Laboratories, Bellove telefónne laboratóriá
GE	Genrel Electric (názov spoločnosti)
MOSFET	Metal Oxide Filed Effect Transistor, tranzistor riadený poľom
GTO	Gate Turn-Off Thyristor, vypínací tyristor, GTO tyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolárny tranzistor riadený poľom
SIT	Static Induction Transistor, tranzistor na báze statickej indukcie
DSP	Digital Signal Processor, digitálny signálový procesor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor, komutačný tyristor s integrovanou hradlovou elektródou
ETO	Emitter Turn-Off Thyristor, tyristor s emitorovým vypínaním
MOS	Metal Oxide Filed Effect Transistor, tranzistor riadený poľom
PEBB	Power Electronics Building Blocks, stavebné bloky výkonovej elektroniky
MCT	MOS Controlled Thyristor, tyristor riadený tranzistorom MOS
PN	prechod na rozhraní pozitívne a negatívne dotovaného polovodiča
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltage, najvyššie dovolené záverné opakované napätie tyristora
RBSOA	Reverse Bias Safe Operating Area, bezpečná záverná pracovná oblasť
I_2t	množstvo energie prepustené poistkou pri poruche
ECT	Emitter Controll Thyristor, tyristor s emitorovým riadením
NPN	Negative-Positive-Negative transistor, bipolárny tranzistor s NPN usporiadaním polovodičových vrstiev
R_d	Dynamic resistance, dynamický odpor
U_{DS}	napätie medzi elektódami drain a source
IO	integrovaný obvod
DMOS	Double Diffused MOS, MOS tranzistor vyrobený technológiou dvojitej difúzie
DIMOS	technológia výroby MOS tranzistorov, patent firmy Siemens AG
FET	Metal Oxide Filed Effect Transistor, tranzistor riadený poľom
COMFET, GEMFET	Gain-Modulated FET Conductivity Modulated FET, iný názov pre IGBT tranzistor
IGT	Insulated Gate Transistor, iný názov pre IGBT tranzistor
IGR	Insulated Gate Transistor, iný názov pre IGBT tranzistor
Rsh	Shunt resistance, shuntovací odpor

Ut0	Threshold voltage, prahové napätie
MHD	Mestská Hromadná Doprava
DCB	Direct Copper Bonding, priame lepenie medi
Al ₂ O ₃	značka chemického zlúčeniny, Oxid Hlinitý
AlN	značka chemického zlúčeniny, Nitrid Hlinný
HPS	High Performance Substrate, vysokovýkonný substrát
AMB	Active Metal Brazing, aktívne spájkovanie kovov
CTE	Coefficient of Thermal Expansion, koeficient tepelnej rozťažnosti
JFET	Junction Field Effect Transistor, unipolárny tranzistor s PN prechodom
TIM	Thermal Interface Material, termálna pasta
VCE(sat)	saturačné napätie medzi kolektorom a emitorom
DC	Direct Current, jednosmerný prúd
AC	Alternating Current, striedavý prúd
IPM	Integrated Power Module, integrovaný výkonový modul
PIM	Power Integrated Module, integrovaný výkonový modul
PTC	Positive Temperature Coefficient, pozitívny tepelný koeficient
NTC	Negative Temperature Coefficient, negatívny tepelný koeficient
SMD	Surface Mounted Device, súčiastka pre povrchovú montáž
ASIC	Assembly Specific Integrated Circuit, špecifický zákaznícky integrovaný obvod
IC	Integrated Circuit, integrovaný obvod
ABS	Anti-lock Braking System, protiblokovací brzdový systém
CMOS	Coupled MOS, spojené MOS tranzistory
LED	Light Emitting Diode, luminiscenčná dióda
R _{dson}	Dynamic resistance in ON state, dynamický odpor v zopnutom stave
BJT	Bipolar Junction Transistor, bipolárny tranzistor
C _{GD}	Gate-to-Drain Capacitance, kapacita medzi elektrodami gate a drain
SiGe	chemická zlúčenina kremíka a germánia
SiC	Oxid Kremičitý
GaAs	Gálium Arzenid
GaN	Gálium Nitrid
InAsGa	Indium-Gálium-Arzenid
AlGa	chemická zlúčenina hlenníka a gália
SiO ₂	oxid kremíka
CVD	Chemical Vapor Deposition, chemické naparovanie

EMI Electro-Magnetic Interference, elektromagnetické rušenie