

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled výkonových polovodičových součástek

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

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

Jméno a příjmení: **Jiří KUBEŠ**
Osobní číslo: **E09B0080P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Přehled výkonových polovodičových součástek**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte krátký úvod do problematiky výkonové polovodičové techniky.
2. Zpracujte přehled současných polovodičových prvků používaných ve výkonové elektronice (stručná historie, hlavní současní výrobci, základní struktura/y, technologie výroby, základní pracovní režimy činnosti, základní statické a dynamické parametry, mezní hodnoty dosahované v současné době, základní charakteristiky, typické použití, požadavky na spínací obvody, ap.).
3. Uveďte současné trendy a naznačte výhledy do budoucna (nové materiály, technologie, typy součástek, ap.).
4. Zhodnoňte veškeré získané informace.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, svazek I., ZČU v Plzni, 1994.
2. Doleček, J.: Moderní učebnice elektroniky, 2. díl, BEN, 2005.
3. Benda, V., Papež, V.: Výroba silnoproudých zařízení 2, ČVUT, 2002.
4. Katalogy předních výrobců výkonových polovodičových prvků.
5. Elektronické zdroje.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Fořt, Ph.D.

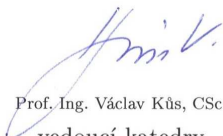
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na přehled výkonových polovodičových součástek. Součástky jsou řazeny dle složitosti struktury, od nejmenšího počtu PN přechodů (diody) až po nejsložitější struktury (triak). Vše je chronologicky uspořádáno. U každé součástky, používané ve výkonové elektronice, jsou napsány údaje od historie, struktury, parametrů až po použití. Pro názornější ukázky jsou použity obrázky, díky kterým je vše jasnější a srozumitelnější. Nechybí také grafy a charakteristiky. Dosahované parametry, tj. proudy, napětí apod. jsou přebrány z katalogů předních výrobců daných součástek. Vše je utříděno pro snazší orientaci a vyhledávání potřebných informací.

Klíčová slova

Dioda, Tranzistor, IGFET, MOSFET, IGBT, Tyristor, RCT, GTO, IGCT, Triak

Abstract – Summary of power semiconductor components

The present thesis is focused on an overview of power semiconductor devices. The components are sorted by the complexity of the structure, from the smallest number of PN junction (diode) to the most complex structure of (triac). Everything is arranged chronologically. For each component, used in power electronics, data are written from the history, structure, parametersto use. For illustrative examples are used pictures that makeeverything clear and understandable. There also graphs and characteristics. The achieved parameters, ie current, voltage, etc. are taken from the catalogs of the leading manufacturers ofcomponents. Everything is easier orientation for sorting and searching for information needed.

Key words

Diodes, Transistors, IGFET, MOSFET, IGBT, Thyristor, RCT, GTO, IGCT, Triac

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 6.6.2012

Jiří Kubeš

.....

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 DIODY	12
1.1 HISTORIE	12
1.2 SOUČASNÍ VÝROBCI	12
1.3 ZÁKLADNÍ STRUKTURA SOUČÁSTKY	13
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY.....	14
1.5 ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ REŽIMY.....	14
1.5.1 <i>Propustný stav</i>	14
1.5.2 <i>Závěrný stav</i>	14
1.6 ZÁKLADNÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ PARAMETRY	15
1.6.1 <i>Statická charakteristika</i>	15
1.6.2 <i>Dynamické vlastnosti</i>	15
1.6.3 <i>Provozní parametry</i>	16
1.7 MEZNÍ HODNOTY DOSAHOVANÉ V SOUČASNÉ DOBĚ.....	16
1.8 TYPICKÉ POUŽITÍ SOUČÁSTKY	17
1.8.1 <i>Diody s krátkou dobou zpětného zotavení</i>	17
1.8.2 <i>Standardní síťové diody</i>	18
1.8.3 <i>Svářecí diody</i>	18
1.8.4 <i>Ochranné a nulové diody pro vypínací tyristory</i>	18
1.8.5 <i>Záchytné a nulové diody pro IGCT tyristory</i>	18
1.8.6 <i>Schottkyho dioda</i>	18
2 TRANZISTORY	20
2.1 HISTORIE	20
2.2 SOUČASNÍ VÝROBCI	21
2.3 BIPOLÁRNÍ TRANZISTOR	21
2.3.1 <i>Základní struktura součástky</i>	21
2.3.2 <i>Technologie výroby</i>	22
2.3.3 <i>Základní pracovní režimy činnosti</i>	23
2.3.4 <i>Mezní hodnoty dosahované v současné době</i>	23
2.4 UNIPOLÁRNÍ TRANZISTOR	23
2.4.1 <i>Základní struktura součástky</i>	24
2.4.2 <i>Technologie výroby</i>	24
2.4.3 <i>Základní pracovní režimy činnosti</i>	25
2.4.4 <i>Základní statické a dynamické parametry</i>	25
2.4.5 <i>Mezní hodnoty dosahované v současné době</i>	26
2.4.6 <i>Typické použití součástky</i>	26
2.5 BIPOLÁRNÍ TRANZISTOR S IZOLOVANÝM HRADLEM.....	27
2.5.1 <i>Historie součástky</i>	27
2.5.2 <i>Hlavní současní výrobci</i>	27
2.5.3 <i>Základní struktura součástky</i>	27
2.5.4 <i>Technologie výroby</i>	28
2.5.5 <i>Základní pracovní režimy činnosti</i>	29
2.5.6 <i>Základní statické a dynamické parametry</i>	29
2.5.7 <i>Mezní hodnoty dosahované v současné době</i>	29
2.5.8 <i>Typické použití součástky</i>	30
3 TYRISTOR	31
3.1 STRUČNÁ HISTORIE SOUČÁSTKY	31

3.2	HLAVNÍ SOUČASNÍ VÝROBCI	31
3.3	ZÁKLADNÍ STRUKTURA SOUČÁSTKY	31
3.4	TECHNOLOGIE VÝROBY.....	32
3.5	ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ REŽIMY ČINNOSTI	32
3.6	ZÁKLADNÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ PARAMETRY	33
3.7	MEZNÍ HODNOTY DOSAHOVANÉ V SOUČASNÉ DOBĚ.....	33
3.8	TYPICKÉ POUŽITÍ SOUČÁSTKY	33
3.9	DRUHY TYRISTORŮ	34
3.9.1	<i>Rychlé tyristory.....</i>	34
3.9.2	<i>Zpětně propustný tyristor RCT.....</i>	34
3.10	TYRISTOR GTO	34
3.10.1	<i>Stručná historie součástky.....</i>	34
3.10.2	<i>Hlavní současní výrobci</i>	34
3.10.3	<i>Základní struktura součástky.....</i>	35
3.10.4	<i>Technologie výroby.....</i>	35
3.10.5	<i>Základní pracovní režimy činnosti</i>	35
3.10.6	<i>Základní statické a dynamické parametry.....</i>	35
3.10.7	<i>Mezní hodnoty dosahované v současné době.....</i>	36
3.10.8	<i>Typické použití součástky</i>	36
3.11	TYRISTOR IGCT	37
3.11.1	<i>Stručná historie součástky.....</i>	37
3.11.2	<i>Hlavní současní výrobci</i>	37
3.11.3	<i>Základní struktura</i>	37
3.11.4	<i>Technologie výroby.....</i>	38
3.11.5	<i>Základní pracovní režimy činnosti</i>	38
3.11.6	<i>Základní statické a dynamické parametry.....</i>	38
3.11.7	<i>Mezní hodnoty dosahované v současné době.....</i>	39
3.11.8	<i>Typické použití součástky</i>	39
4	TRIAK	40
4.1	STRUČNÁ HISTORIE SOUČÁSTKY	40
4.2	HLAVNÍ SOUČASNÍ VÝROBCI	40
4.3	ZÁKLADNÍ STRUKTURA SOUČÁSTKY	40
4.4	TECHNOLOGIE VÝROBY.....	40
4.5	ZÁKLADNÍ PRACOVNÍ REŽIMY ČINNOSTI	41
4.6	ZÁKLADNÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ PARAMETRY	41
4.7	MEZNÍ HODNOTY DOSAHOVANÉ V SOUČASNÉ DOBĚ.....	41
4.8	TYPICKÉ POUŽITÍ SOUČÁSTKY	42
5	SOUČASNÝ TREND A VÝHLED DO BUDOUCNOSTI	43
	ZÁVĚR.....	45
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46

Seznam symbolů a zkratk

V_{RRM}	.....	Opakovatelné špičkové závěrné napětí
I_{FAVm}	.....	Střední propustný proud
I_{FSM}	.....	Neopakovatelný špičkový propustný proud
V_{TO}	.....	Prahové napětí
r_T	.....	Diferenciální odpor v propustném stavu
U_{RSM}	.....	Neopakovatelné špičkové závěrné napětí
T_{jm}	.....	Teplotou polovodičové struktury
ΔP_F	.....	Ztrátový výkon propustným proudem
ΔP_{off}	.....	Okamžitá hodnota vypínacího ztrátového výkonu
$U_{R(BR)}$	.....	Průrazného napětí
r_T	.....	Diferenciální propustný odpor
U_{TO}	.....	Prahové napětí
I_H	.....	Vratný proud
I_L	.....	Přídržný proud
I_{TGQM}	.....	Maximální vypínatelný proud
V_{DRM}	.....	Opakující se zpětné a blokuující napětí
t_{off}	.....	Vypínací doba
t_{on}	.....	Zapínací doba
U_{BO}	.....	Spínacího napětí
I_{TeM}	.....	Proud při dané teplotě pouzdra
s_{Ukrit}	.....	Strmost nárůstu blokovacího napětí

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na přehled výkonových polovodičových součástek. Text je rozdělen do několika částí, podle druhu součástek. Tyto součástky používané ve výkonové elektronice jsou řazeny podle počtu přechodů PN, popřípadě podle složitosti struktury od diod, přes tranzistory až po triak. Ke každé součástce je popsána historie vzniku, současní výrobci, základní struktura součástky, technologie výroby, základní pracovní režimy, statické a dynamické vlastnosti, mezní hodnoty dosahované v současné době a typické použití. Poslední část se zabývá výhledem do budoucnosti těchto součástek, dává nástin novým technologiím a novým možnostem výkonové elektroniky. Tato závěrečná práce shrnuje, jaké součástky jsou dnes ve výkonové elektronice používány a vytváří představu o tom, jakých hodnot mohou dnes tyto součástky dosahovat. Tyto maximální parametry byly pečlivě sbírány z katalogů výrobků dnešních předních výrobců.

Polovodičové součástky našly své uplatnění jako elektronické spínače ve výkonových měničích nebo střídačích. [1]

Revoluce ve výkonové elektronice, která je díky zejména rychlému vývoji polovodičových výkonových součástek, má za následek zlepšení výkonu, snížení nákladů a v neposlední řadě rozšířené možnosti použití výkonových elektronických systémů. Vývoj polovodičových výkonových součástek a jejich související technologie byla započata vynálezem bipolárního tranzistoru kolem roku 1940. Moderní doba výkonové elektroniky začala vynálezem tyristoru v roce 1956. Většina výkonových polovodičových součástek byla vyrobena až po tomto roce. Protože náklady na plýtvání energií a problémy spojené s odstraňováním produkovaného tepla jsou vysoké, snažíme se dosáhnout malého ztrátového výkonu. Velikost, hmotnost, ztráta výkonu a s tím i náklady spojené jsou důležitá motivace pro používání lepšího přepínání. [2]

Nejenže dochází k neustálému zvyšování parametrů součástek, ale také dochází k objevování součástek nových a především klesá jejich cena, tím pádem roste dostupnost a otevírají se nové možnosti aplikace. Moderní výkonové součástky povětšinou bývají vyrobeny z křemíku a jejich vlastnosti se značně přibližují ideálnímu spínači, nebo usměrňovači. Vysokovýkonové součástky jsou typické tím, že se provozují jen v režimu spínání. [3]

Tématem výkonových polovodičových součástek se pochopitelně zabývá i mnoho jiných autorů či publikací a odborných časopisů. Málokdy jsou však informace o dané součástce komplexně a uceleně uspořádané. Většinou jsou zaměřeny jen na určitou

součástku a její specifikaci. Proto vznikla tato práce jako ucelený přehled používaných výkonových polovodičových součástek.

1 Diody

Elektronické součástky s jedním PN přechodem. Označení diod vzniklo kombinací slov di (znamená 2) a ode (koncovka z anglického electrode). Elektrody diod značíme Anoda a Katoda. Nejdůležitější vlastností diody je usměřňování, nejčastěji střídavého proudu. V rámci využití diod ve výkonových měničích jsou požadovány vysoké hodnoty závěrného napětí, malá propustná napětí a rychlý přechod ze závěrného do propustného stavu a taktéž naopak. [4]

1.1 Historie

V roce 1874 německý vědec Karl Ferdinand Braun objevil "jednostranné vedení" krystalů. Braun patentoval krystalový usměřňovač v roce 1899. Oxid měďnaté a selenové usměřňovače byly vyvinuty pro elektrické aplikace v roce 1930. Indický vědec Jagadish Chandra začal jako první používat krystal pro detekci rádiových vln v roce 1894. Krystalový detektor byl vyvinut do praktického zařízení pro bezdrátovou telegrafii Greenleaf Whittier Pickardem, který vynalezl křemíkový krystalový detektor v roce 1903 a získal patent v roce 1906.

Další experimentátoři zkoušeli celou řadu dalších látek, z nichž nejrozšířenější nerost byl galenit. Další látky nabídly o něco lepší výkon, ale galenit byl nejčastěji používán, protože měl tu výhodu, že byl levný a bylo snadné ho získat. Krystalový detektor v těchto raných krystalových rozhlasových přijímačích se skládal z nastavitelného drátu bodového kontaktu (tzv. "kočičí chlup"), který mohl být ručně přesunut na celém povrchu krystalu s cílem získat optimální signál. Toto znepokojující zařízení bylo nahrazeno diodami v roce 1920, kde byla nutná vysoká čistota materiálu. Krystalový detektor se vrátil k dominantnímu používání s příchodem levných pevných germaniových diod v roce 1950. [5]

1.2 Současní výrobci

ABB Diody – Polovodiče www.abb.com

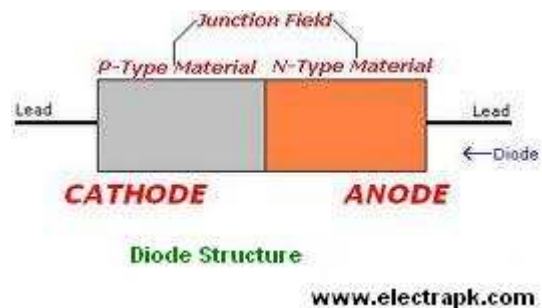
SEMIKRON www.semikron.cz

DIOTEC www.diotec.com

1.3 Základní struktura součástky

Dioda je jednoduché zařízení s PN přechodem s vodivými kontakty, které jsou připojeny ke každé z oblastí. Součástí diody je polovodič typu N a druhá část je polovodič typu P. Základní struktura diody je uvedena na obrázku č. 1 níže.

Existuje několik typů diod, ale schematický symbol má všeobecné použití, taktéž i pro usměrňovací diody. Oblast typu N diody se nazývá katoda a oblast typu P se nazývá anoda. [6]



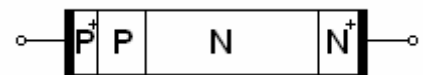
Obr. č. 1 Základní struktura diody [6]

Na styku polovodiče typu P a N vznikne hradlová vrstva, která pouští proud ideálně jen jedním směrem. Jako základní stavební prvek se pro diody používá křemíková nebo germaniová destička, která je obohacená o trojmocný (např. bor) nebo pětímocný (např. fosfor) prvek. Tím vzniká vodivost typu N nebo P. Vzájemným působením sil se na přechodu P-N objeví vnitřní elektrické pole.

Po Připojení napětí tak, že minus bude na polovodiči typu N, začne diodou téci proud. Pokud bude minus připojeno na polovodič typu P teče jen velmi zanedbatelný proud (řádově nA), který je zapříčiněn minoritními nositeli.

Ve směru propustném má dioda pouze velmi malý odpor (řádově Ω), narozdíl od směru závěrného, kde má odpor veliký.

Z těchto vlastností vyplývá použití diod jako usměrňovačů, vedoucích proud pouze jedním směrem. V závěrném směru můžeme zatěžovat diodu pouze omezenou velikostí napětí. Překročením průrazného napětí v závěrném směru totiž narůstá závěrný proud, způsobující ohřev diody. Proud se lavinovitě zvětšuje až dojde ke zničení diody. Proto se nesmí během provozu hodnota maximálního závěrného napětí překročit. [7]



Obr. č. 2 struktura diody P^+PNN^+

U výkonových diod je základem přechod PN.

Na krajích jsou vytvořeny vysokodotované vrstvy pro minimalizaci kontaktního odporu kov-polovodič. Výsledná struktura je pak P^+PNN^+ . [8]

1.4 Technologie výroby

Difúze – Vhánění atomu prvku na destičku. Tyto atomy způsobují opačnou vodivost, než má daná destička. Prostupují povrchem, až uvíznou v krystalové mřížce. Největší koncentrace těchto atomů je pod povrchem.

Iontová implementace – Vsazování cizích iontů do atomové mřížky urychlovacím vysokým napětím. Takto urychlené ionty prostupují do požadované hloubky pod povrch polovodiče. U této metody lze řídit hloubku a směr dopadu iontů. [9]

1.5 Základní pracovní režimy

1.5.1 Propustný stav

Propustný stav vzniká pokud má polovodič typu P oproti polovodiči typu N kladné napětí. Pak je dioda zapnuta. [1]

Polarizací přechodu PN jsou vstřikovány, ve směru přímém, díry do polovodiče typu N a elektrony jsou vstřikovány do polovodiče typu P. Nerovnovážné nosiče zvyšují koncentraci nosičů náboje zvyšují a upravují vodivost na vnějšku vlastního přechodu PN. [4]

V propustném stavu je na diodě propustné napětí (přibližně 1 V). Diodou v přímém směru prochází propustný proud, dosahující i několik kA. [1]

1.5.2 Závěrný stav

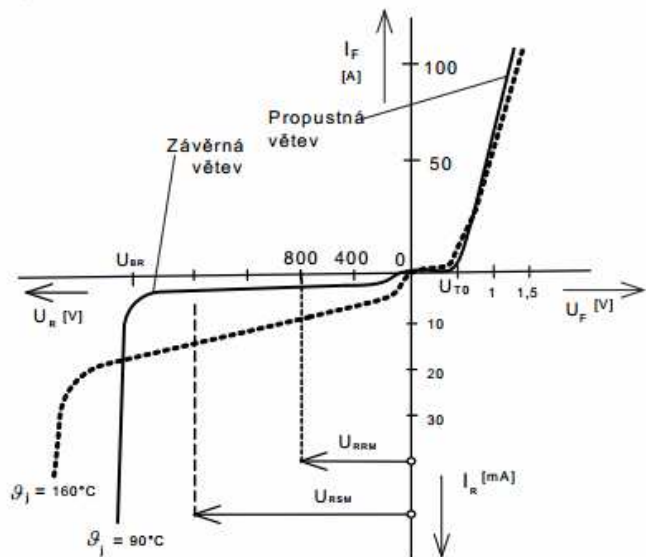
Závěrný stav vzniká pokud má polovodič typu N oproti polovodiči typu P kladné napětí. Pak je dioda vypnuta. Pokud je polarizována dioda závěrně, objeví se na ní závěrné napětí (až několik kV). Procházející proud v tomto závěrném směru se označuje jako závěrný proud. [1]

Z ohledu na dosažení velkého závěrného napětí má tuto důležitou vlastnost přechod PN, který bývá zaplaven v propustném směru nerovnovážnými nosiči náboje. [4]

1.6 Základní statické a dynamické parametry

1.6.1 Statická charakteristika

Znázornění závislosti proudu na napětí mezi elektrodami diody. Jde zde o časově neproměnné veličiny. Tato charakteristika má 2 větve. Propustná větev odpovídá stavu propustnému. Parametrem, který je důležitý pro tento stav, je propustné prahové napětí,



Obr. 2.2 Příklad voltampérové charakteristiky diody

Obr. č.3 VA charakteristika [10]

například pro rychlou diodu ČKD DR 855-250R je tato hodnota stanovena na 0,982 V, a diferenciální propustný odpor je pro tuto diodu 0,875 mΩ. Pro linearizaci charakteristiky je to směrnice přímky. Druhá větev je větev závěrná a odpovídá závěrnému směru. Taktéž je zde definován závěrný diferenciální odpor. Pro linearizaci charakteristiky je brán jako konstantní hodnota. Pro závěrnou charakteristiku je důležitou hodnotou závěrné průrazné napětí. Překročením této hodnoty se zmenší velikost závěrného diferenciálního odporu. Proud a jeho velikost je pak závislá na napětí a odporu daného obvodu, v němž je dioda umístěna. Neomezený nárůst proudu vede ke zničení diody. [1]

1.6.2 Dynamické vlastnosti

Mezi přechodné jevy patří komutace diody, neboli vypnutí. Zánikem proudu a tedy vypnutím však průběh neodpovídá pohybu náhradního bodu po statické charakteristice. Připojením komutačního napětí na větev s diodou dojde k rychlému zániku propustného proudu. Snížením propustného proudu téměř na nulu však proud diodou úplně nezaniká, ale přechází do zpětného směru s původní velikostí strmosti. Vodivost diody se přechodem proudu z propustného do závěrného téměř nemění. Po krátké chvilce se ztrácí vodivost zpětného směru a závěrný proud tak klesá na běžnou statickou hodnotu. Dioda je tudíž pak schopna udržet závěrné napětí. Tato doba se označuje jako doba zotavení t_{rr} . Proud diodou během této doby se označuje jako zotavovací proud i_{rr} .

Dalším přechodným jevem je zapnutí diody, kterému však ve většině případů aplikací nemusíme věnovat zvýšenou pozornost. [1]

1.6.3 Provozní parametry

Napětíová zatížitelnost je opakovatelná hodnota zatěžování špičkovým závěrným napětím U_{RRM} . Tato hodnota je maximální přípustná pro závěrné napětí, jež se smí periodicky opakovat.

Dalším parametrem je neopakovatelné špičkové závěrné napětí U_{RSM} , které se smí na diodě objevit, aniž by došlo k jejímu zničení. Ve většině katalogích se však hodnoty rovnají, tedy $U_{RRM} = U_{RSM}$.

Proudová zatížitelnost je omezena teplotou polovodičové struktury T_{jm} . Při překročení této hodnoty dochází ke ztrátě požadovaných vlastností diody. Toto oteplení způsobuje ztrátový výkon při provozu. Podstatným parametrem je také ztrátový výkon propustným proudem ΔP_F , který závisí na střední i efektivní hodnotě propustného proudu. Poměrně velkých hodnot při vypínání diody dosahuje okamžitá hodnota vypínacího ztrátového výkonu ΔP_{off} . S nárůstem spínacího kmitočtu nabývá na významu.

Proudová přetížitelnost je udávána pro přetížení, které trvá déle než 10 ms, neopakovatelným špičkovým proudem I_{FSM} . Při návrhu jištění se vychází právě z údajů proudové přetížitelnosti. [1]

1.7 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Rychle zotavující diody

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 4\,500\text{ V}$
- Střední propustný proud $I_{FAV_m} = 1256\text{ A}$
- Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 19\text{ kA}$
- Prahové napětí $V_{TO} = 1.807\text{ V}$
- Diferenciální odpor v propustném stavu $r_T = 0.735\text{ m}\Omega$

Standardní síťové diody

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 6000\text{ V}$
- Střední propustný proud $I_{FAV_m} = 7385\text{ A}$
- Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 87\text{ kA}$
- Prahové napětí $V_{TO} = 0,894\text{ V}$
- Diferenciální odpor v propustném stavu $r_T = 0,166\text{ m}\Omega$

Lavinové diody

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 5000\text{ V}$
- Střední propustný proud $I_{FAV_m} = 2700\text{ A}$
- Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 29\text{ kA}$

- Prahové napětí $V_{TO} = 1,13 \text{ V}$
- Diferenciální odpor v propustném stavu $r_T = 0,44 \text{ m}\Omega$

Svářecí diody

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 400 \text{ V}$
 - Střední propustný proud $I_{FAVm} = 11350 \text{ A}$
 - Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 85 \text{ kA}$
 - Prahové napětí $V_{TO} = 0,758 \text{ V}$
 - Diferenciální odpor v propustném stavu $r_T = 0,021 \text{ m}\Omega$
- [11]

Ochranné a nulové diody pro vypínací tyristory

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 4500 \text{ V}$
- Střední propustný proud $I_{FAVm} = 1256 \text{ A}$
- Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 19 \text{ kA}$

Záchytné a nulové diody pro IGCT tyristory

- Opakovatelné špičkové závěrné napětí pro $V_{RRM} = 4500 \text{ V}$
 - Střední propustný proud $I_{FAVm} = 1123 \text{ A}$
 - Neopakovatelný špičkový propustný proud $I_{FSM} = 26 \text{ kA}$
- [12]

1.8 Typické použití součástky

1.8.1 Diody s krátkou dobou zpětného zotavení

Diody můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií: Usměrňovací diody (Standardní síťové diody) a rychlé diody. Usměrňovací diody jsou obvykle používány k přeměně střídavého proudu na stejnosměrný. Ačkoli jsou optimalizovány pro nízké ztráty vedením, usměrňovací diody odolají pouze mírným dynamickým změnám napětí při přechodu z propustného do závěrného stavu.

Naproti tomu rychlé diody se používají jako doprovodná zařízení pro ochranu spínacích prvků. Každý vypínač (GTO, IGCT nebo IGBT) vyžaduje doplnění nulovou diodou (např. pro kompenzaci účinníku, nebo zmenšení efektivní hodnoty střídavé složky usměrněného proudu) při spínání indukční zátěže.

Rychlé diody jsou odolné proti velkým dynamickým napětím (rychlým změnám napětí při přechodu z propustného do závěrného stavu). Ovšem mají obvykle větší ztráty ve vedení než usměrňovací diody. Pro každou skupinu spínacích prvků (GTO, IGCT a IGBT) nabízíme rychlé diody přizpůsobené konkrétním spínacím aplikacím. [11]

1.8.2 Standardní síťové diody

Síťové (usměrňovací) diody můžeme rozdělit do dvou kategorií: standardní a lavinové. Síťové diody jsou obvykle používány k přeměně střídavého proudu (AC) na stejnosměrný (DC). Standardní síťové diody jsou optimalizovány pro nízké propustné ztráty a vyznačují se vysokou proudovou zatížitelností. Lavinové diody se vyznačují odolností proti krátkodobému přepětí. [11]

1.8.3 Svářecí diody

Svářecí diody jsou navrženy pro svářecí aplikace ve středofrekvenční oblasti nebo pro jiné vysokoproudové usměrňovače. Mají velmi nízké propustné i komutační ztráty a zachovávají si vysokou proudovou zatížitelnost až do vysokých frekvencí.

ABB nabízí svářecí diody ve standardním hermeticky uzavřeném pouzdru i svářecí diody tzv. bez pouzdra. Nově nastupujícím trendem se stávají vysokoproudové svářecí aplikace pro spojování obtížně svařitelných materiálů. [11]

1.8.4 Ochranné a nulové diody pro vypínací tyristory

Tyto diody mají nízké dynamické ztráty. Nízké jsou také hodnoty náboje zpětného zotavení. Dále se vyznačují měkkou zotavovací charakteristikou. Tyto diody jsou vhodné pro obvody s vypínacími tyristory. [12]

1.8.5 Záchytné a nulové diody pro IGCT tyristory

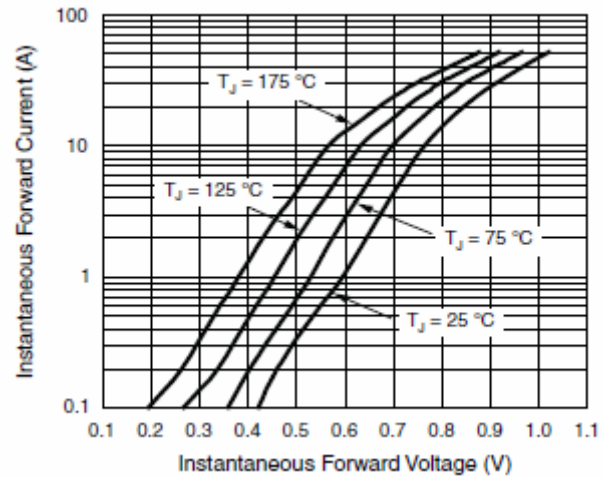
Vyznačují se optimalizovanou měkkou zotavovací charakteristikou. Mají rozšířenu bezpečnou pracovní oblast. Jsou vhodné pro obvody s IGCT tyristory. [12]

1.8.6 Schottkyho dioda

Tato polovodičová součástka má usměrňující přechod kov polovodič. Další typickou vlastností je, že mají nízké propustné napětí, které je přibližně poloviční ve srovnání s běžnými diodami. Zanedbatelná je také doba zotavení. Velký závěrný proud je nevýhodou, taktéž i nízká proudová a napěťová zatížitelnost.[1]

Schottkyho kontakt vzniká napařením příslušného kovu na povrch struktury NN+, která bývá vytvořena epitaxní technologií. Proud je přenášen majoritními nosiči, při přechodných jevech tedy nedochází k injekci, extrakci ani rekombinaci nerovnovážných nosičů. Schottkyho diody lze použít pro frekvence převyšující 100 kHz.

Ekvivalentně lze Schottkyho diodu znázornit jako ideální usměrňující kontakt polovodič kov s odporem v sérii. Velikost prahového napětí závisí na druhu použitého kovu. Perspektivním typem výkonové diody je kombinace struktur Schottkyho MNN^+ a diody P^+NN^+ . Je tím zlepšena propustná



charakteristika a lze dosáhnout **Obr.č.4 VA charakteristika Vishay MBR20H200CT** průrazného napětí $U_{R(BR)} > 200$ V. Takovéto integrované diody zvané MPS se objevily už i s průrazným napětím až 4 kV. Možností je také výroba Schottkyho diod z materiálů s větším zakázaným pásmem. Příkladem GaAs, SiC, GaN. Schottkyho dioda na bázi SiC může dosahovat až $U_{RRM} = 1$ kV a $I_{FAV} = 10$ A . [8]

Tyto usměrňovací diody většinou usměrňují velké vysokofrekvenční proudy. Snášejí poměrně velké proudové přetížení. Pro velmi vysoké frekvence jsou vyráběny z křemíku nebo sloučeniny GaAs. Použití přechodu kov polovodič je také v integrovaných logických a číslicových obvodech. [4]

2 Tranzistory

Jsou to elektronické aktivní součástky, které mají tři elektrody. Tranzistor je zkrácení anglických slov Transfer Rezistor, což nám dává informace o funkci této součástky, neboli transformace odporu mezi svorkami, která je řízena proudem v obvodu řízení třetí svorky.[4]

Pro výkonovou elektroniku má tranzistor využití jako spínače. Vypínání a zapínání je řízeno prostřednictvím hradla. Tranzistory dělíme na bipolární, unipolární a bipolární s izolovaným hradlem. U bipolárních tranzistorů je proud tvořen volnými nosiči náboje s kladnou i zápornou polaritou. Unipolární tranzistory mají proud zajištěn jen jedním typem nosičů, tedy buď kladnými nebo zápornými. Tranzistory IGBT jsou kombinací obou předešlých. [1]

2.1 Historie

První patent na princip polem řízeného tranzistoru byl podán v Kanadě fyzikem Lilienfeldem v roce 1925, ale Lilienfeld nezveřejnil žádné výzkumné články o tomto zařízení, a proto bylo ignorováno průmyslem. V roce 1934 německý fyzik Dr. Oskar Heil patentoval jiný polem řízený tranzistor. Není žádný přímý důkaz, že toto zařízení bylo postaveno, ale pozdější práce v 90. letech ukázaly, že jedno z návrhů Lilienfelda pracovalo, jak bylo popsáno. Právní dokumenty z Bellových laboratoří ukazují, že William Shockley a jeho spolupracovník Gerald Pearson stavěli provozní verze z patentů Lilienfelda.

Po válce se Shockley rozhodl pokusit se o výstavbu triody jako polovodičového zařízení. Klíčem k vývoji tranzistoru bylo pochopení procesu pohyblivosti elektronů v polovodiči. Najít způsob, jak řídit tok elektronů z emitoru do kolektoru tohoto nově objeveného polovodiče, čímž by mohl vzniknout zesilovač. Myšlenka krystalu diody byla, že krystal sám by mohl poskytnout elektrony přes velmi malou vzdálenost vyčerpané oblasti. Klíčovým se zdálo být umístění vstupního a výstupního kontaktu blízko k sobě na povrchu krystalu, na obou stranách této oblasti. Brattain začal pracovat na vybudování takového zařízení. Na základě pokusů Ralpha Braye identifikoval William Shockley v Bellových laboratořích jev, kdy byl pozorován mimořádně nízký odpor při použití impulsů napětí. Byl označen jako efekt vstříku minoritních nosičů. Tranzistor se tak stal realitou.[13]

2.2 Současní výrobci

ABB Polovodiče www.abb.com - výroba IGBT, IGCT

SEMIKRON www.semikron.com - unipolární tranzistory, IGBT, vícekanálové tranzistory

SIEMENS www.siemens.com – silikonové, křemíkové tranzistory

TOSCHIBA www.toshiba.com – unipolární, bipolární, IGBT

VISHAY Co. www.vishay.com - mosFet

STMicroelektronics www.st.com

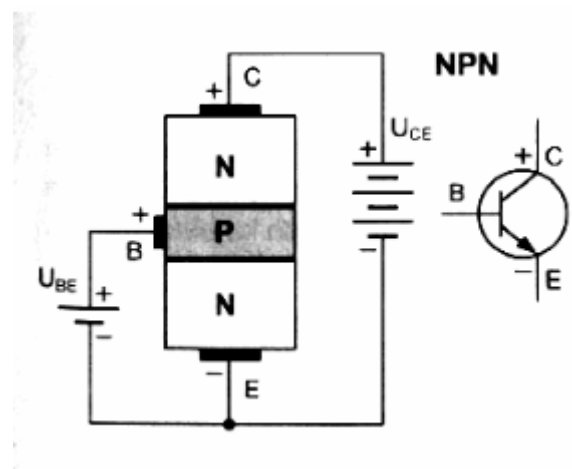
2.3 Bipolární tranzistor

Použití výkonových bipolárních tranzistorů ve spínacích aplikacích upadá. V jiných aplikacích však význam těchto součástek zůstává. Do hodnot proudů 10 A jsou bipolární tranzistory nahrazovány tranzistory MOSFET, díky buzení nižším výkonem a svou rychlostí, která je až 5 krát vyšší než u bipolárních tranzistorů. Ze stejných důvodů jsou Darlingtonova zapojení 2 až 3 tranzistorů od 15 A nahrazovány tranzistory IGBT. Dle výrobců mají BJT se závěrným napětím nad 800 V příliš vysoké ztráty a nízkou rychlost, proto se nevyplatí je vyrábět.

Tyto tranzistory mají definovanou bezpečnou pracovní oblast SOA ve výstupních VA charakteristikách, kterou nesmí pracovní bod upustit. BJT pro vysoká napětí existují pouze ve verzi NPN. Vývoj Darlingtonů se zastavil kolem roku 1985 na úrovni 400 A, 1000 V a 12 ms. Vysokonapěťové BJT existují pouze v provedení NPN. Za první vysokonapěťový BJT je považován BUX 48 (SGS Thomson, 1979), $I_C = 10$ A, $U_{CE} = 50$ V, $U_{CB} = 900$ V, $t_{off} = 3$ ms. [3]

2.3.1 Základní struktura součástky

Bipolární tranzistory mají tři elektrody a tudíž jsou to součástky se dvěma přechody PN. Jednotlivé značení elektrod je emitor, kolektor a báze. Uspořádání NPN vznikne umístěním polovodiče typu P mezi dva polovodiče typu N. U uspořádání typu PNP je to naopak. PN přechod umístěný blíže kolektoru nazýváme kolektorový přechod. PN přechod, který je



Obr. č.5 tranzistor NPN struktura [14]

blíže emitoru, nazýváme emitorový přechod.

Bipolární tranzistor funguje na principu interakce dvou přechodů PN. Mezi dvěma polovodiči typu N, jeden spojen s elektrodou kolektoru a druhý s elektrodou emitoru, je vložena úzká oblast typu P, která je spojena s elektrodou báze. Mezi bází a emitorem má napětí polaritu takovou, že báze emitor je v propustném stavu. Napětí mezi kolektorem a emitorem je polarizováno tak, aby přechod kolektor báze byl polarizován závěrně.

Při této polarizaci napětí dochází ke vstříku elektronů z emitorové oblasti typu N, kde jsou nosiči většinovými, do oblasti typu P, kde se tyto elektrony stávají menšinovými nosiči. Difúzním pohybem se elektrony blíží ke kolektoru (oblast N). Jelikož je tato oblast blízká emitorové oblasti, ochuzené vrstvy dalšího přechodu způsobí silné elektrické pole. Následkem je přechod elektronů do horní oblasti N. Jen část elektronů nekombinuje v bázi. Proud báze emitor je vlivem druhého přechodu přemístěn do směru kolektor emitor. [4]

2.3.2 Technologie výroby

Výroba tranzistorů má řadu použitelných technologií podle toho, kde bude tranzistor používán. Dle daných kritérií jsou pak kladeny potřebné nároky i na jejich přesnost. Je jasné, že čím vyšší požadavky na přesnost jsou (citlivost na malé změny proudu, ...), tím je vyšší i cena tranzistorů. [15]

1) Slitinově difúzní. Do povrchu základní destičky, tvořící kolektor, je difúzí shora vytvořena báze. Slitinovou technologií je pak vyroben Emitor. Oproti slitinovému tranzistoru se touto technologií dosahuje tenčí báze (několik mikrometrů). Dochází tak ke zmenšení zbytkového proudu a zvětší se tím proudový zesilovací činitel. Kolektor dobře odvádí teplo z tranzistoru, neboť je připájen na kovovou destičku. To je důvod, proč je možné vyrábět tyto tranzistory pro velké výkony.

2) Epitaxně planární. Základem bohatě dotovaná destička křemíku (substrát N^+). Poté se na ní vytvoří epitaxní vrstva, která je tlustá několik mikrometrů. Dále se povrch celého monokrystalu okysličí, čímž vznikne ochrana před okolním prostředím. V místě vzniku báze se kysličník odleptá. Difúzí se vytvoří báze a celý krystal se opět pokryje kysličníkem. Obdobným způsobem dojde k vytvoření emitoru. Následně se okysličí opět povrch celého tranzistoru. Kysličník se odstraní z míst, na která se napaří kovová vrstva umožňující připojit vývody báze a emitoru. Planární epitaxní tranzistor má velmi stálé vlastnosti, protože jsou všechny části tranzistoru chráněny kysličníkem. [16]

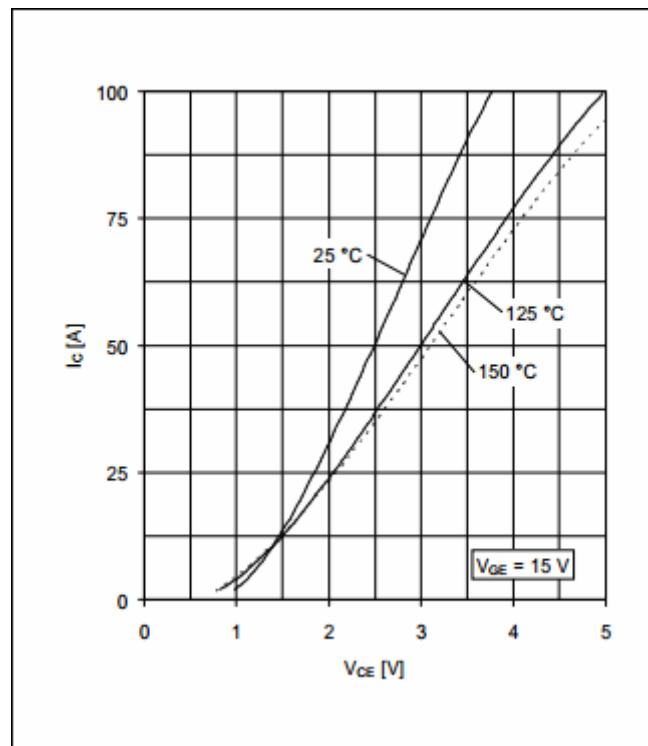
2.3.3 Základní pracovní režimy činnosti

Bipolární tranzistor může pracovat v pěti režimech. Pátým režimem je průraz, který je povětšinou nežádoucí, a proto se uvádí většinou jen režimy čtyři. Jsou dány polaritou přiložených napětí U_{BE} a U_{CE} . Aktivní režim, inverzní aktivní, nevodivý, saturační. [4]

2.3.4 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Napěťová zatížitelnost $U_{CE}=1700\text{ V}$

Proudová zatížitelnost $I_C=1000\text{ A}$



Obr.č.6 zapínací VA charakteristika IGBT ABB 5SMY 12G 1721 [17]

2.4 Unipolární tranzistor

Kolektorový proud prochází v unipolárním tranzistoru jen jedním typem vodivosti (P nebo N). Rozlišujeme tedy tranzistory s kanálem N a s kanálem P. Průchod proudu kanálem je řízen elektrickým polem a jeho intenzitou. Častý název pro unipolární tranzistory je tedy tranzistor řízený polem (FET). Elektrické pole může působit na proudový kanál dvěma způsoby. První možnost je přes závěrnou vrstvu přechodu a druhá možnost je přes zvláštní izolační vrstvu. Podle toho je označení J FET pro FET s přechodovým hradlem a IG FET pro FET s izolovaným hradlem.[1]

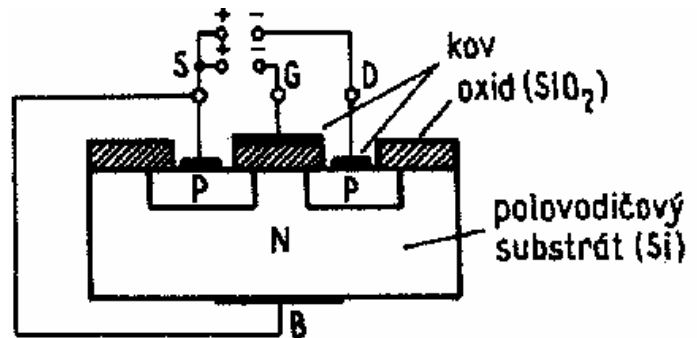
IG FET

Unipolární tranzistory s izolovaným hradlem mají izolací odděleno hradlo od polovodičové struktury. Izolaci tvoří vrstva oxidu. Časté označení těchto tranzistorů je tedy MOS FET. Izolační vrstva způsobuje podstatné zvětšení vstupního odporu až na hodnotu $10^{15}\ \Omega$. Existují dva typy IG FET, ochuzovací a obohacovací typ. Výkonové IG FET jsou většinou obohacovacího typu. [1]

Součástky typu MOS FET v současné době patří mezi nejrozšířenější. Miniaturní tranzistory jsou také implementovány do logických obvodů. Od 70. let byly zkonstruovány struktury MOS pro velké proudy a napětí s vysokou opakovací frekvencí. Tranzistory MOS mají následující přednosti: Vysoká vstupní impedance, vysoké výkonové zesílení, napěťové řízení a teplotní stabilita. [8]

2.4.1 Základní struktura součástky

Pod povrchem struktury lze vlivem změny povrchového potenciálu vyvolat akumulaci nebo extrakci nosičů, popřípadě vznik inverzní vrstvy. Přiložením kladného napětí U_{GS} , proti emitoru S, na hradlo G dochází ke změně povrchového potenciálu pod vrstvou SiO_2 . [8]



Obr. č.7 IG FET s obohacovacím kanálem [18]

Pokud tedy je U_{GS} kladné, pak se v okolí hradla G z vrstvy P odpuzují kladné díry, na volná místa se rozšiřují elektrony z oblasti typu N. Mezi N na straně D a částí N na straně S začínají vytvářet vodivé elektronové kanály. Pokud U_{GS} dosáhne prahového napětí, jsou tyto kanály ve stavu, umožňujícím průchod proudu mezi elektrodami D a S. Nárůstem U_{GS} se kanály rozšiřují a při stejném U_{DS} dovolují průchod většímu proudu. Pokud je však $U_{DS} > 0$ a $U_{GS} = 0$ proud nemůže procházet, protože mu brání v cestě závěrně polarizovaný přechod PN. Nejvýkonnější variantou je tzv. hexfet, kde mají jednotlivé buňky tvar šestiúhelníků.[1]

2.4.2 Technologie výroby

Planární technologií jsou vyráběny nízkovýkonové tranzistory. Kanál je souběžný s povrchem polovodiče, proto se nazývají horizontální, nebo též laterální. Nevýhodou je velký odpor kanálu v sepnutém stavu, všechny elektrody na jedné straně křemíkové destičky a odvod tepla vyvíjejícího se v kanále.

Snaha o zmenšení úbytku napětí v sepnutém stavu vedla na strukturu LDMOS, u které můžeme boční difúzí přesně nastavit délku kanálu. Poté co byla přenesena elektroda D na druhou stranu křemíkové destičky, vznikla struktura VDMOS. Tím došlo k lepšímu využití destičky a větší izolační pevnosti mezi kolektorem a emitorem. Dobrou reprodukovatelnost délky kanálu lze také pomocí technologie vertikálního selektivního

leptání. Tím vzniká tvar V leptu nebo U leptu. Tuto vzniklou strukturu označujeme VVMOS nebo modifikaci UMOS.

Ve výkonových aplikacích se povětšinou používají VDMOS nejčastěji s kanálem typu N popřípadě méně časté P. Pro vysoké výkony pouze v provedení N. Celková struktura je tvořena dílčími strukturami, kterých může být i více než 10 000. Tyto dílčí struktury jsou propojovány paralelně. Substrát zde pro jednotlivé tranzistory má funkci kolektoru. Elektrody S a G jsou propojovány na horní straně čipu. Přes kanál laterálně protéká proud a poté vertikálně přes vrstvy N- a N+. Jedná se o indukovaný kanál. Výkonové tranzistory MOS mají velmi blízko k technologii integrovaných obvodů. Princip se nemění, ale existují různá geometrická uspořádání. Trojúhelníkové oblasti zvané TRIMOS, výrobci RCT a Texet. Šestiúhelníkové oblasti zvané HEXFET, výrobci International Rectifier. Čtvercové emitorové oblasti, SIPMOS (Siemens), TMOS (Motorola). [3]

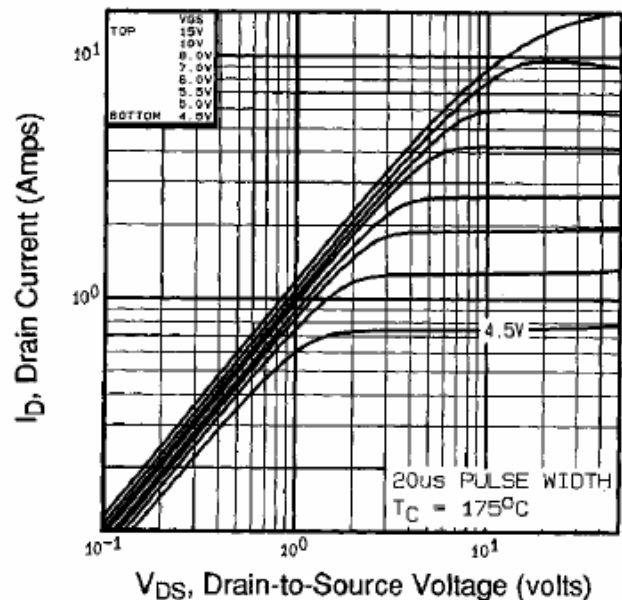
2.4.3 Základní pracovní režimy činnosti

Výkonové tranzistory MOS mají nejčastější pracovní režim jako spínač. Tranzistor přechází ze stavu vypnutého do stavu zapnutého a naopak se spínacím odporem. Díky tomuto režimu je možné ovládat výkon na zátěži za minimalizovaného ztrátového výkonu. Charakter zátěže určuje průběh přechodových jevů. Zejména pak Milerův jev, kdy impedance zátěže ovlivňuje vstupní kapacitu. Nejčastějším typem zátěže bývá indukčnost s nulovou diodou. [8]

2.4.4 Základní statické a dynamické parametry

Přiložením napětí U_{GS} vzniká inverzní vrstva, pod hradlovým oxidem, propojující kanálem s odporem R_{Ch} oblast N+ spojenou s S a oblast typu N spojenou s D. Hradlový oxid na povrchu přesahuje dotované oblasti typu N.

V místech přesahu dochází vlivem



Obr. č.8 charakteristika výstupní International rectifier IRF 510 [19]

napětí U_{GS} k akumulování elektronů. Odpor akumulované vrstvy s vyšší konduktivitou můžeme označit R_a . Proud také prochází vrstvou s vysokou rezistivitou, která má odpor R_D . Dále ještě máme odpor R_{N+} . Celkový odpor je pak dán součtem, $R_{DS}=R_{Ch}+R_a+R_D+R_{N+}$. Napětí na struktuře je dáno $U_{DS}=R_{DS} \cdot I_D$. Ztrátový výkon pak v sepnutém stavu $PD=I_D^2 R_{DS}$. Složky R_{on} při zapínání jsou závislé na teplotě. [8]

Mezi dynamické vlastnosti patří zapínací doba t_{on} a vypínací doba t_{off} . Neopomenutelné jsou parazitní kapacity, které ovlivňují dynamické vlastnosti. Při přiložení zapínacího napětí se nejdříve nabíjí vstupní kapacita. Je zde časová prodleva, než se na ní dosáhne prahového napětí U_{GS} . Teprve pak se začne tranzistor otevírat. Velikostí U_G a R_G je dán maximální nabíjecí proud vstupní kapacity. Na zapínací dobu má tedy vliv i odpor R_G . [1]

2.4.5 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Napěťová zatížitelnost je dána velikostí U_{DS} . V dnešní době dle katalogu je tato hodnota napětí D-S značená $V_{DSS} = -500$ až 1500 V. Velká napěťová zatížitelnost je pouze na úkor zatížitelnosti proudové.

Proudová zatížitelnost je dána maximálním kolektorovým proudem doplněným o teplotu pouzdra a příslušným napětím U_{GS} . Dosahovaná hodnota proudu je až 300 A. Velkou předností IG FET je teplotní stabilita umožňující paralelní řazení součástek. Oproti tomu nevýhodou jest větší zbytkové napětí. Ekvivalentní odpor R_{DS} v zapnutém stavu je dnes na hodnotě 0.001 až 16Ω . Zapínací a vypínací doba je menší než $1 \mu s$, takže lze využít vyšších frekvencí.

Příkladem může být tranzistor MESFET na bázi SiC s maximální frekvencí až 25 GHz. Dosahované hodnoty výkonů jsou dnes 1 až 625 W. [1]

2.4.6 Typické použití součástky

Tranzistory MOSFET můžeme nalézt ve většině současné elektroniky, neboť jsou základním aktivním prvkem. Svými přednostmi vytěsnily klasické bipolární tranzistory z většiny oblastí. Použití je ve výkonové elektronice, ale také v signálových digitálních a analogových obvodech. Ve výkonové elektronice bylo využití MOSFETů donedávna limitováno křemíkovou technologií a napětím zhruba 600 V. V dnešní době se již podařilo vyrobit tranzistory MOSFET i na bázi silikon-karbidů SiC a galium arseniků GaAs. Tím se rozšířily aplikace ve vyšších frekvencích a vyšších napětích. [20]

2.5 Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem

Tyto tranzistory nejčastěji označované jako IGBT jsou polovodičové výkonové součástky, které kombinují jednoduchost řídicí charakteristiky vstupu G tranzistoru MOSFET a bipolárních tranzistorů s vysokým proudem a nízkou saturací. V jednom pouzdře je umístěna izolovaná vstupní část FET, tedy elektroda G, používaná na řízení a výstup výkonného bipolárního tranzistoru pro vysoké napětí a proudy. [21]

2.5.1 Historie součástky

Princip IGBT poprvé navrhl Yamagami ve svém patentu japonské S47-21739, který byl podán v roce 1968. První experimentální pokus provedl B. Jayant Baliga, ve svislém zařízení s elektrodou G s V-drážkou, který vyšel v literatuře v roce 1979. Stejný IBGT režim objevil také Plummer a poprvé podal patentovou přihlášku roku 1978. Praktické zařízení schopná pracovat ve větším proudovém rozsahu hlásil jako první Baliga v roce 1982. Obdobný návrh předložil také JP Russel. Baliga a také AM Goodman v roce 1983 prokázali, že spínací rychlost může být upravena v širokém rozsahu pomocí elektronového ozáření. Kompletní potlačení parazitního tyristorového jevu a výsledný non-latch-up IGBT provoz na celé spektrum provozního zařízení dosáhl A. Nakagawa v roce 1984. Produkty IGBT byly poprvé komercializovány společností Toshiba v roce 1985. [22]

2.5.2 Hlavní současní výrobci

INTERNATIONAL RECTIFIER www.irf.com

INFINEON www.infineon.com

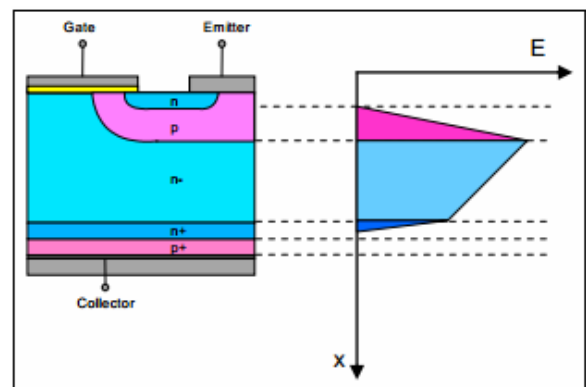
SEMIKRON www.semikron.com

TOSCHIBA www.toshiba.com

IXYS www.ixys.com

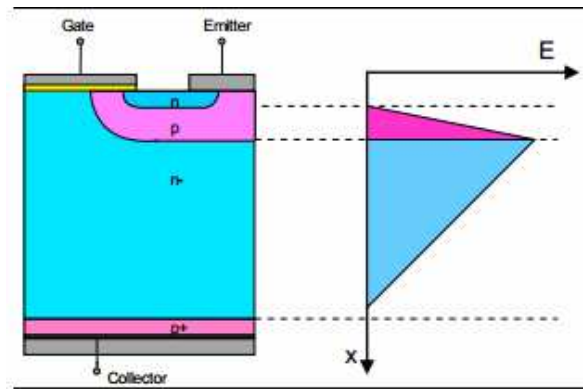
2.5.3 Základní struktura součástky

IGBT čipy jsou založeny na dvou různých hlavních principech návrhu. První se týká struktury brány: trench nebo planární brána (Gate). Druhý princip se vztahuje k IGBT použité technologie: PT nebo NPT.



Obr. č.9 PT-IGBT (planární Gate) [23]

Planární brána je nákladově efektivní struktura založená na dopovacím procesu a vytváří horizontální strukturu brány. Důmyslný trench gate je založen na kombinaci dopování, leptání a plnicích procesech. Trench proces vede k velmi účinné, vertikální struktuře brány a umožňuje malé čipové velikosti, které pak vedou ke kompaktním návrhům modulů.



Obr. č.10 NPT-IGBT (planární Gate) [23]

Termín "Punch-Through" (PT) popisuje tvar elektrického pole uvnitř IGBT při blokování. Elektrické pole proniká přes vrstvu N- do vrstvy N+. Uvnitř vrstvy N+ je pole strmější než ve vrstvě N-. Díky tomu může PT-IGBT být tenčí než NPT IGBT a celkové ztráty jsou nižší. [23]

Tranzistory PT mají větší rychlost spínání a menší napěťový úbytek při otevřeném tranzistoru. NPT mají větší hodnotu maximálního napětí U_{GES} mezi kolektorem a emitorem zavřeného tranzistoru. [4]

2.5.4 Technologie výroby

Vyráběné jsou dva druhy: symetrická (se stlačeným polem, PT, punch-through structure) a nesymetrická (NPT, non-punch-structure). Struktura NPT je základní a sestává ze čtyř vrstev N+PN-P+. Hradlo je z polykřemíku a překrývá vrstvy N+ (oblast source, samozákryt) P- (oblast kanálu) a N- (epitaxní vrstva u PT nebo substrát u PT). Kontakty source spojují vrstvy N+ a P-. Kolektor je vyveden na spodní straně. Závěrné napětí je drženo přechodem P+N-. Charakteristickými vlastnostmi jsou nízká injekční účinnost, dále velká doba životnosti nosičů, velké U_{Cesat} .

Struktura PT má navíc mezivrstvu N+ tzv. stop vrstvu (buffer layer). Tato vrstva umožňuje stlačení elektrického pole a umožňuje dosažení vyššího blokovacího napětí při zachování dobrých propustných charakteristik. Struktura PT bývá nazývána struktura se stlačeným polem. Závěrné napětí je drženo přechodem P+N-N+, který má charakter diody PIN. [3]

2.5.5 Základní pracovní režimy činnosti

Za normálního způsobu provozu je na kolektoru připojeno kladné napětí oproti emitoru. Pokud je na hradle nulový potenciál oproti emitoru, tranzistorem neteče proud. Pokud má hradlo kladný potenciál, pod hradlem jsou přitahovány elektrony do oblasti P. Určitou velikostí napětí mění oblast P na typ N.

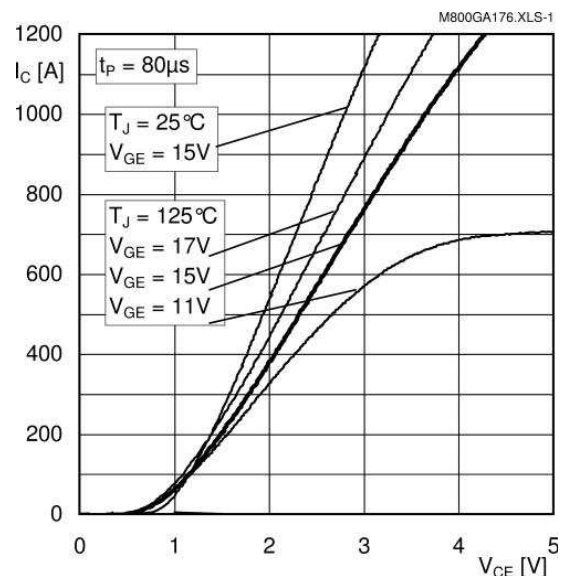
Tato inverzní vrstva vytváří kanál N vedoucí z oblasti N+ do N-. Poté jsou emitovány elektrony z emitoru N+ do oblasti N-. Z kolektoru jsou injektovány díry z P+ do N-. V oblasti typu N- přebytek elektronů a děr zmenšuje odpor této oblasti. IGBT má tedy menší odpor mezi kolektorem a emitorem než MOSFET. [4]

2.5.6 Základní statické a dynamické parametry

Příkladem je uvedena výstupní charakteristika IGBT tranzistoru firmy Semikron typ SKM 800GA176D na obrázku číslo 8. Vypínací a zapínací doby jsou ve srovnání s MOSFET jen o málo větší. Spínací doba se tedy pohybuje v rozmezí hodnot 0,1 až 1 μ s. Obdobně jako u MOSFET se také zde objevuje velká vstupní kapacita, kterou musíme uvažovat a volit vhodné R_G a vhodně dimenzovat zdroj U_G .

Proudová a napěťová zatížitelnost je obdobná jako u bipolárních tranzistorů.

Oproti IG FET jsou zatížitelnost proudová i napěťová vyšší. I u tranzistorů při vysokém kolektorovém proudu se dosahuje vysoké napěťové zatížitelnosti. Příkladem může být již zmiňovaný tranzistor Semikron SKM 800GA176D který má proudovou zatížitelnost 830 A a napěťovou zatížitelnost 1700 V. Součástky se zatížitelností nad 100A jsou povětšinou vyráběny s antiparalelní integrovanou diodou.[1]



Obr. č.11 výstupní charakteristika IGBT Semikron 800GA176D [24]

2.5.7 Mezní hodnoty dosahované v současné době

- 6500V / 600A (výrobce Eupec)
- 3300V / 1200A (výrobce Eupec)
- 2500V / 1800A (výrobce Press-Pack)
- 1700V / 2400A (výrobce Eupec)

2.5.8 Typické použití součástky

IGBT jsou používány v oblasti měničů o menších výkonech. Rozhodující je vysoká integrace součástek v inteligentních modulech IGBT a vysoká spínací frekvence. Hlavní je využití v širokém spektru velkosériově vyráběných frekvenčních měničů pro asynchronní motory a pro synchronní motory s permanentními magnety. Využití je také v oblasti výkonů nad 100 až 150 kW. Perspektivní je v této oblasti výkonů využití IGBT ve střídačích, i vícehladinových, pro asynchronní motory.

Nelze opomenout aplikace jako jsou pulsní měniče a kompatibilní usměrňovače. Elektrická trakce je jednou z typických oblastí využití v tomto výkonovém rozsahu. IGBT začínají v určité míře pronikat ve výkonech v řádech jednotek a desítek megawattů jako měniče.

[25]

3 Tyristor

Název tyristor je obecně použitý název pro bipolární spínací polovodičové součástky. Existuje celá řada součástek tyristorového typu. Rozlišení je dle různých hledisek. Můžeme se setkat s vícevrstevnými diodami, triodami, tetrodami. Nejvýznamnější jsou čtyřvrstvé triody.

Tyristor s označením SCR je dle konstrukce vysokonapěťový tranzistor s přidanou vrstvou P+. Tyristor zachovává strukturu Schockleyových diod, která je čtyřvrstvá. Původní báze vysokonapěťového tranzistoru je použita jako řídicí elektroda a je označována jako hradlo G. [4]

3.1 Stručná historie součástky

V roce 1950 Willam Shockley formuloval teoretický princip funkce. O 6 let později firma General Electric provedla první konstrukci. V roce 1958 byly první návrhy ovladatelné výkonové polovodičové součástky. Další vývoj přinesl řadu produkcí ovladatelného výkonového polovodiče, které jsou dnes používány například v pohonech. [26]

3.2 Hlavní současní výrobci

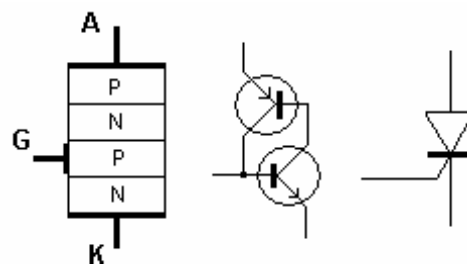
ABB www.abb.cz

SEMIKRON www.semikron.com

mitsubishi www.mitsubishichips.com

3.3 Základní struktura součástky

Tyristor je tvořen třemi přechody PN se třemi vývody. Tyto tři elektrody jsou nazvány anoda A, katoda K a hradlo G. Struktura může být NPNP nebo častější PNP. [1]



Obr. č.12 struktura tyristoru [27]

Strukturu tyristoru si lze představit jako spojení dvou tranzistorů. Impulz proudu do řídicí elektrody G způsobí sepnutý stav tyristoru. Pokud chceme tyristor rozepnout, musí nejprve dojít k zániku proudu v obvodu A-K. [27]

3.4 Technologie výroby

Tyristory jsou vyráběny celodifúzní technologií. Tato metoda je univerzální a dochází při ní k samovolnému vyrovnávání koncentrací částic různých látek. Podstata je v difúzním sycení polovodiče danou příměsí. [28]

Atomy příměsí tak pronikají pod povrch daného polovodiče v předem určených oblastech. Uspořádaný pohyb atomů snižuje koncentrační rozdíly. K difúzi je zapotřebí poměrně vysokých teplot. [29]

Další výrobní technologií je difúzně slitinová. Kombinuje již zmiňovanou difúzní technologii se slitinovou. Při ní se na základní destičku položí legující materiál a při vysoké teplotě dojde ke slití. Vychladnutím a rekrystalizací je následně část legujícího materiálu v destičce. [30]

3.5 Základní pracovní režimy činnosti

Pokud je na anodě záporné napětí, pak je tyristor polarizován v závěrném směru. Tyristor je zavřený a vykazuje velkou impedanci. Překročení určité hodnoty napětí v závěrném směru způsobí lavinový průraz uvnitř vrstev a dojde k nárůstu proudu v závěrném směru. Pokud je na řídicí elektrodě G nulové napětí, neteče tedy touto elektrodou žádný proud, chová se pak tyristor jako čtyřvrstvá dioda. [4]

Je-li na anodě kladné napětí, řídicí elektrodou teče proud I_G . Pokud je do obvodu G-K přiveden proud hradla I_G , dojde k zapnutí tranzistoru NPN. Proud prochází také ve směru emitor - báze tranzistoru PNP, který se také zapne. Tranzistory i po zániku proudu I_G jsou v sepnutém stavu, neboť se navzájem v tomto stavu udržují proudem procházejícím zátěží. K zapnutí tyristoru stačí pouze krátký impuls proudu.

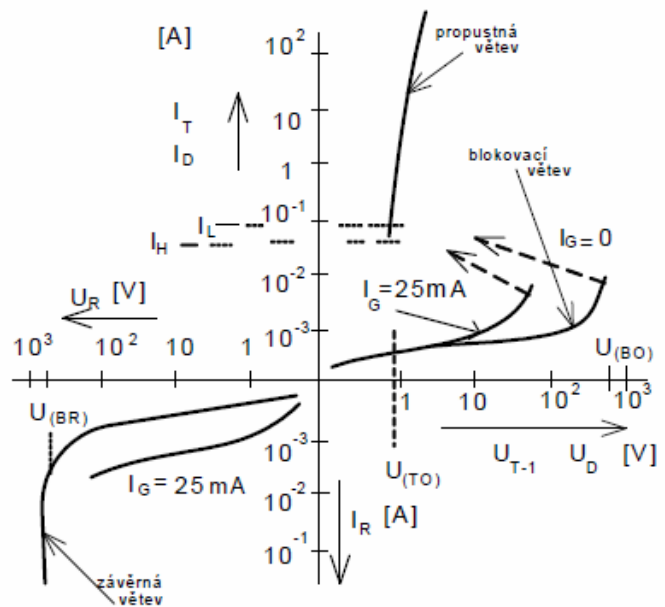
Při vypnutém tyristoru může mít anoda kladný potenciál, pak se jedná o blokovací stav, nebo záporný potenciál, pak se jedná o závěrný stav. Při přechodu z blokovacího do propustného stavu musí být splněno, že tyristor musí být v blokovacím režimu a na G-K musí být přiveden proudový impuls.

Přechod z propustného do závěrného směru probíhá jako u diody. Pokud chceme však provést přechod do blokovacího stavu, musíme zajistit zánik propustného proudu a poté nechat tyristor odpočinout aby mohl obnovit blokovací schopnost. [1]

3.6 Základní statické a dynamické parametry

Blokující oblast se vyznačuje vysokým odporem. V okolí U_{BO} je spínací oblast, ve které dochází k sepnutí tyristoru. Vodivý stav je charakterizován vodivou oblastí. V závěrné oblasti tyristorem teče nepatrný závěrný proud a vykazuje velký odpor.[4]

Závěrná větev odpovídá závěrnému stavu. Větev blokovací odpovídá blokovacímu stavu. Je zde diferenciální blokovací odpor r_D . Spínací napětí



Obr. č.13 VA charakteristika tyristoru [10]

U_{BO} způsobuje zapnutí tyristoru. Propustná větev odpovídá propustnému stavu. Je zde definován diferenciální propustný odpor r_T a prahové napětí U_{TO} . Vratný proud I_H udává minimální proud, který ještě udrží tyristor v zapnutém stavu. Přídržný proud I_L je proud při sepnutí tyristoru. [1]

Při zapínání a vypínání je důležitá doba zpoždění, doba vzrůstu a doba rozšiřování. [4]

3.7 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Mezi špičkové typy tyristorů patří Mitsubishi s napěťovou zatížitelností U_{RRM} až 7500V a proudovou zatížitelností $I_{F(AV)} = 1650A$ Popřípadě U_{RRM} až 12000V při $I_{F(AV)} = 1500A$. Firma Infineon vyrábí tyristory s napěťovou zatížitelností U_{RRM} až 6500V při proudové zatížitelnosti $I_{F(AV)} = 2650A$. Popřípadě U_{RRM} až 4 800V při $I_{F(AV)} = 5000A$.

3.8 Typické použití součástky

Tyristory slouží jako základní součástky pro měniče s fázovým řízením výkonu do zátěže. Střídavá napájecí síť napájí tyto měniče. Je tak zajištěna komutace tyristorů periodickou změnou polarity napětí. Tyto měničů bývají nazývány jako s takzvanou síťovou komutací. Sem lze zařadit především řízené usměrňovače a měniče střídavého proudu. Oba tyto typy měničů využíváme prakticky v jednofázovém i třífázovém provedení. [10]

3.9 Druhy tyristorů

3.9.1 Rychlé tyristory

V aplikacích s vyššími frekvencemi než je obvyklých 50 Hz je žádáno tyristorů s kratší vypínací dobou. Vše díky optimalizované konstrukci výhodně využívající propustných charakteristik a dynamických parametrů. [31]

3.9.2 Zpětně propustný tyristor RCT

Narozdíl od klasických rychlých tyristorů mají RCT navíc integrovanou paralelní diodu. Dioda je v propustném stavu, pokud je na tyristoru závěrná polarita napětí. Součástku lze s výhodou uplatnit v obvodech s nulovými diodami. Dioda i tyristor jsou umístěny v jednom pouzdře a nikdy nepracují současně. Ztráty jsou odváděny přes chladič. Nejčastěji jsou RCT využívány v invertorech a ve frekvenčních měničích. [32]

3.10 Tyristor GTO

GTO značí gate turn off, tedy vypínací tyristor. Proudem do řídicí elektrody lze tento tyristor zapnout i vypnout. Pro zapnutí je využito kladného impulzu a pro vypnutí záporného impulzu. [33]

3.10.1 Stručná historie součástky

První etapa 60. až 70. léta klasické výkonové tyristory. Druhá etapa koncem 80. let celořiditelné vysokonapěťové součástky. Zlepšování užitečných vlastností. Vysokonapěťové vypínatelné tyristory GTO se objevují v roce 1983. [34]

3.10.2 Hlavní současní výrobci

ABB www.abb.cz

POLOVODICE a.s. www.polvodice.cz

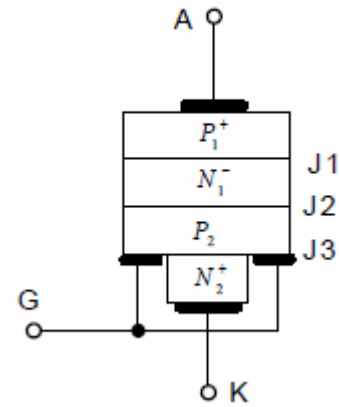
MITSUBISHI www.mitsubishichips.com

EUPEC www.eupec.com

FUJI www.fujielectric.com

3.10.3 Základní struktura součástky

Struktura GTO je obdobná struktuře triodového zpětně závěrného tyristoru. Podobný je i princip zapnutí a vedení propustného proudu. Proti klasickému tyristoru má tento složitější plošné členění vrstev na přechodu J3. Dochází k rozprostření řídicí elektrody do celého průřezu tyristoru. Proudovým impulzem do hradla lze tyristor vypnout. Vypínací impulz je mnohonásobně větší a má opačnou orientaci než impulz zapínací. [1]



Obr. č.14 struktura GTO [10]

3.10.4 Technologie výroby

Technologie výroby je obdobná, jen proces je trochu složitější, neboť řídicí elektroda musí být rozprostřena do celého průřezu. Používá se tedy slitinová technologie a epitaxně-difúzní technologie.

3.10.5 Základní pracovní režimy činnosti

Pracovní režimy jsou tři jako u klasického tyristoru, tedy propustný, závěrný a blokovací stav.

3.10.6 Základní statické a dynamické parametry

Zapínání se provádí proudový impulzem do hradla I_{FG} . Doba zapnutí t_{gt} je obdobně definována jako u klasického tyristoru. Rozdílnost zapínacích vlastností, oproti klasickému tyristoru, je dána velkým plošným členěním přechodu J3. Zapínací doba tedy je o trochu větší a prováděna vyšším proudem.

Propustný stav je také ovlivněn strukturou. Při stejné ploše čipu nám proti klasickým tyristorům vychází poloviční proudová zatížitelnost.

Vypnutí začíná nárůstem vypínacího impulzu do hradla I_{RG} . Propustný proud se menší nejprve pomalu při době přesahu t_{gs} . Rychlejší pokles je pak v době poklesu t_{gf} . Vypínací doba je tedy součtem těchto dob. [1]

3.11 Tyristor IGCT

IGCT je speciálním typem tyristoru, podobně jako GTO. Je to tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou. Ve své podstatě jde o GTO s integrovanými obvody řídicí elektrody. Může se zapínat a vypínat signálem do hradla. Má nižší ztráty a vydrží vyšší míru napětí. [38]

3.11.1 Stručná historie součástky

Tato součástka byla vyvinuta společností ABB na bázi IGBT a GTO v roce 1993. Pro vysokonapěťové aplikace byl dán kompromis mezi nákladností a složitostí konstrukce. [39]

3.11.2 Hlavní současní výrobci

ABB www.abb.cz

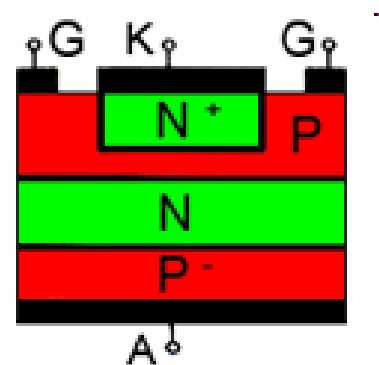
MITSUBISHI www.mitsubishichips.com

POLOVODICE a.s. www.polvodice.cz

3.11.3 Základní struktura

IGCT má čtyři polovodičové vrstvy stejné jako klasický tyristor. Principiálním východiskem je tyristor GTO. [25]

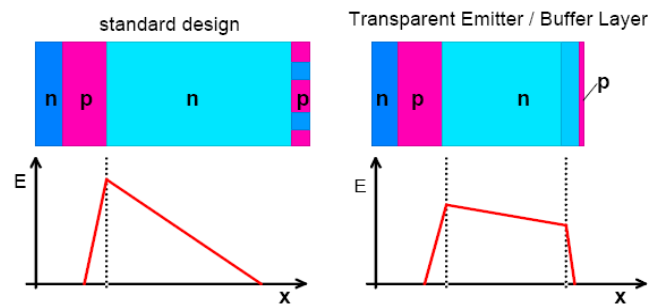
Zlepšená je struktura hradla, která umožňuje rychlé spínání. Není potřeba připojovat ochranné obvody, jako je tomu u tyristorů GTO. Součástka se skládá ze dvou částí. Tyristoru GCT a řídicího obvodu, který je těsně připojen k čipu tyristoru. Vlivem velkých proudů musí být zabezpečeno účinné chlazení. [4]



Obr. č.16 struktura IGCT [40]

3.11.4 Technologie výroby

Realizace je v pastilkovém pouzdře, které slouží i jako kontakt. Snadné je také přidělení chladiče. U pastilkových pouzder je dána vnější přítlačná síla. Elektrické a tepelné vlastnosti jsou dány přítlačnou silou. [41]



Obr. č 17 technologie Buffer layer [42]

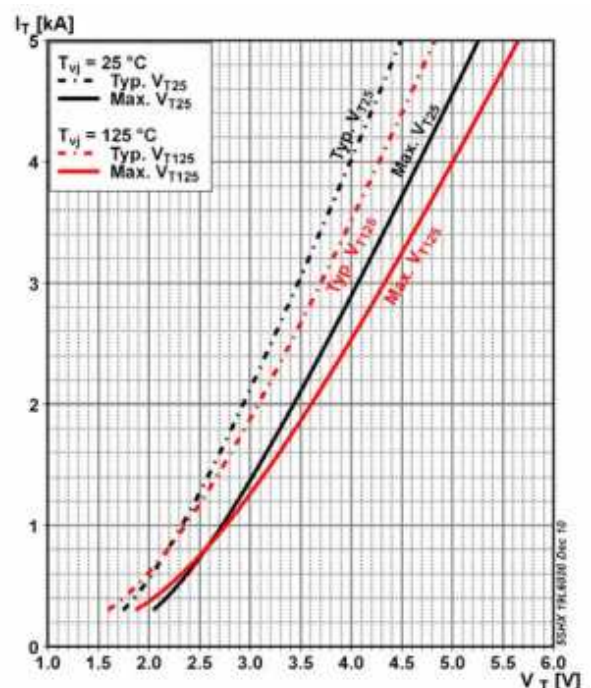
Jednou z technologických úprav je zvaná Buffer Layer Transparent Emitter. Úprava je následující: buffer layer je vrstva vložená P1 a N1, známá jako struktura PIN, a dále zúžení vrstvy P1. [42]

3.11.5 Základní pracovní režimy činnosti

Proudovým impulzem do báze, v ekvivalentním zapojení prvního tranzistoru, proběhne zapínání. Vypnutí probíhá proudovým impulzem do báze druhého tranzistoru. Při vypínání není omezena strmota nárůstu blokovacího napětí a vypínací ztráty jsou zmenšeny. Princip IGCT vychází z GTO, rozdílnost je v procesu vypínání. Požadavkem u IGCT je rychlost a tvrdost procesu vypínání. [4]

3.11.6 Základní statické a dynamické parametry

Tyristor IGCT dosahuje vysokých dynamických parametrů v režimu spínání a vypínání. Nejdůležitějším parametrem je rychlost vypínacího procesu. Dále má nízký propustný úbytek a vypínání bez odlehčovacího obvodu. Výhodou je také velká strmota nárůstu blokovacího napětí. Oproti GTO jsou sníženy vypínací ztráty a vypínací doba. [43]



Obr. č. 18 Zapínací charakteristika ABB 5SHX 19L6020 zpětně propustný IGCT

[44]

3.11.7 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Asymetrické IGCT mají optimalizaci pro nízké ztráty ve vedení. Opakovatelné špičkové napětí $V_{\text{DRM}}=6500$ V. Maximální kontrolovatelný vypínací proud $I_{\text{TGQM}}= 4000$ A. Vypínací a zapínací doba $t_{\text{on}}= 1,5\mu\text{s}$ a $t_{\text{off}}= 2\mu\text{s}$.

Zpětně vodivé IGCT s již integrovanou monolitickou nulovou diodou nepotřebují odlehčovací obvod. Dosahováno je $V_{\text{DRM}}= 5500$ V a $I_{\text{TGQM}}=2200$ A. Spínací frekvence jsou kolem 2 kHz

3.11.8 Typické použití součástky

Využití je u měničů pro střední a vyšší výkony. Dalším typickým použitím je trakce. Střídače pro asynchronní motory, pulzní měniče a kompatibilní usměrňovače. Jeví se také jako perspektivní pro vysokonapěťové aplikace pro měniče výkonů jednotek až desítek megawattů. V oblasti měničů nejvyšších výkonů jde o střídače . [25]

4 Triak

Je z anglického TRIode Alternating Current switch, což v překladu znamená triodový spínač střídavého proudu. Tato součástka je polovodičový spínací prvek, který je schopný vést proud oběma směry. Antiparalelně zapojené tyristory s propojenými řídicími elektrodami odpovídají vlastnostem triaku. Pomocí hradla však lze součástku pouze zapnout, nikoli vypnout. [45]

4.1 Stručná historie součástky

Historie triaku souvisí s vývojem tyristoru. Zapojením dvou tyristoru proti sobě získáme triak.

4.2 Hlavní současní výrobci

NTE Electronics www.nteinc.com

Central Semiconductor www.centralsemi.com

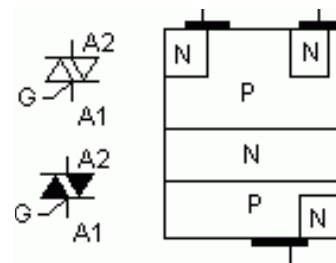
STMicroelectronics www.st.com

Littell Fuse www.littelfuse.com

MOTOROLA www.motorola.com

4.3 Základní struktura součástky

Struktura je složena z pěti polovodičových vrstev ve složení NPNPN. Funkčně lze triak nahradit dvojicí tyristorů proti sobě. Odpovídající tomu je schematická značka. Triak má dvě anody, A1 a A2, a řídicí elektrodu



G. Proud může procházet při kladné i záporné půlvlně. [46]

Obr. č. 19 struktura triaku[46]

4.4 Technologie výroby

Základem je destička typu N. Pro přidávání dalších jednotlivých vrstev se využívá difúze a iontové implementace. Na vrstvu s polovodičem typu N jsou přidány vrstvy P a do nich jsou implementovány opět vrstvy polovodiče typu N.

4.5 Základní pracovní režimy činnosti

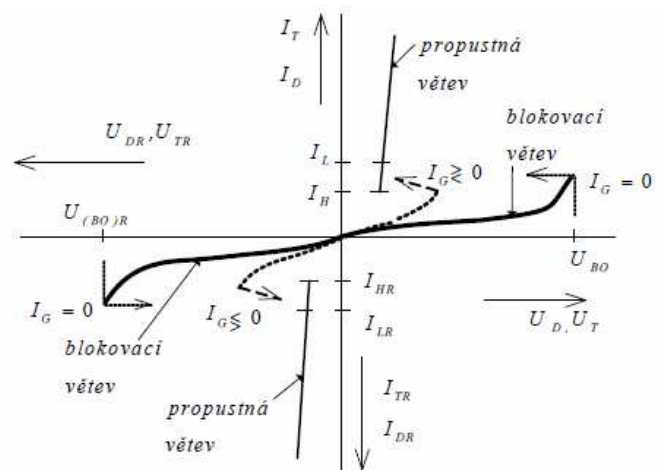
Triak je vodivý oběma směry, a proto má jen stav propustný a blokovací. Spínání triaku je stejné jako u tyristoru. Nejčastěji je prováděno pomocí řídicí elektrody. Velikost proudu I_G má stejný vliv na spínání jako je tomu u tyristoru. Spínání je možno ve všech čtyřech kvadrantech.

Vypínání triaku je zajišťováno přirozenou komutací. Z důvodu složité struktury má triak menší odolnost proti rychlé změně spínaného napětí a strmosti zmenšení proudu při vypínání.

V blokující oblasti vykazuje triak velký odpor až $10^8 \Omega$. Řízení je pomocí proudu I_G . Spínací oblast je v okolí spínacího napětí U_{BO} . Dochází při něm k lavinovému průrazu. Ve vodivé oblasti je vykazován malý odpor. Proud je při tom omezen zátěží. [4]

4.6 Základní statické a dynamické parametry

Parametry triaku jsou stejné jako v propustném směru u tyristoru a jsou symetrické při obou polaritách napětí. Dynamické parametry se často neudávají, neboť triak je určen pro střídavý proud s frekvencí 50 Hz. U triaku je kmitočtový rozsah menší, než je tomu



Obr. č.20 VA charakteristika triaku [46]

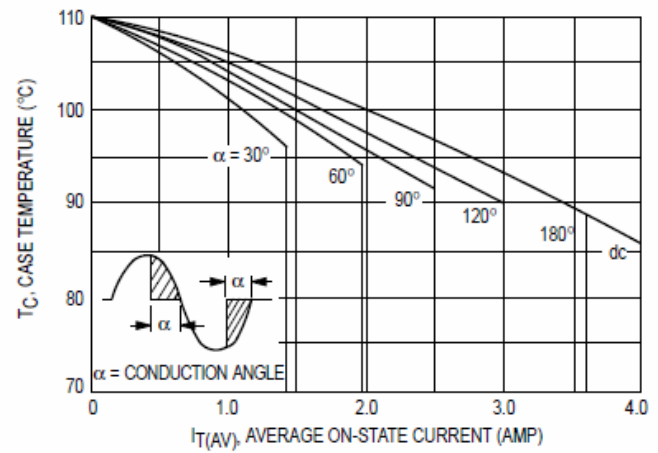
u tyristoru. Největší kmitočet pro funkci je ve stovkách Hz. Vstupní a výstupní charakteristiky jsou analogické ke klasickému tyristoru. [4]

4.7 Mezní hodnoty dosahované v současné době

Napěťová zatížitelnost je dána blokovacím špičkovým napětím, které je stejné v obou směrech. Jeho hodnota je $U_{DRM}=U_{DRRM}=1000 \text{ V}$. Proudová zatížitelnost je dána maximální efektivní hodnotou propustného proudu při sinusovém signálu a při dané teplotě pouzdra. Můžeme nalézt i $I_{TeM}=400 \text{ A}$, klasičtější je ale v řádech desítek A. Mezi dynamické parametry patří kritická strmost nárůstu blokovacího napětí $s_{Ukrit}<20\text{V}/\mu\text{s}$. [1]

4.8 Typické použití součástky

Triak lze použít při regulaci domácího osvětlení, výkonu vysavačů, otáček ručního nářadí a dalších elektrických spotřebičů o nízkých výkonech. Jsou také jako základ střídavých relé v pevné fázi. Výhodou je jednoduchost zapojení. [45]



Obr.č. 21 proudová zatížitelnost triak
Motorola 2N6071A [47]

5 Současný trend a výhled do budoucnosti

Hlavním trendem je snižování ztrát a dále tvorba integrovaných zařízení. Často používanou součástkou je výkonová dioda. Proudů jsou řádově v kiloampérech a napětí má hodnoty kilovoltů, stejně jako u tyristoru. Tyristor zahájil novou éru v oblasti nových řešení pro výkonové měniče. Pro výkonové měniče menších rozměrů, tedy do 1kA a 1kV se dnes často využívá výkonové FET. Pro zjednodušení konstrukcí střídačů a pulzních měničů jsou v dnešní době využívány GTO. Ve výkonových měničích se často využívá IGBT. Neustálým navyšováním parametrů této součástky se zdá být jako perspektivní pro výkonovou elektroniku. V sériově vyráběných měničích se poslední dobou často používá IGCT. Moderním trendem je směřování k využití součástek založených na SiC a GaN. Hlavní předností jejich využití je rychlost zapínání a vypínání. Redukovány jsou také hodnoty spínacích ztrát. [48]

Polovodičové součástky na bázi SiC byly vyvinuty pro velké výkony, vysoké teploty a dynamické aplikace. Proti těmto vlivům je SiC odolné, a proto se od něj očekává zlepšení užitečných vlastností pro různé aplikace. Vývoj není zcela ještě u konce. Nevýhodou je finanční náročnost výroby. V porovnání SiC a klasického křemíku je vykazována větší tepelná vodivost, větší průrazná napětí a šířka zakázaného pásma energií. Zmenšení energetických ztrát je vlivem menšího odporu v sepnutém stavu a větší spínací kmitočet.

Velkou perspektivu a dostupnost má Schottkyho SiC SBD dioda. Komerční dostupnost je 600 – 1200 V a 1 – 30 A. Dynamické vlastnosti jsou největší předností této součástky. Maximální pracovní teplota je 175 °C. Následkem větší dotovanosti polovodiče je větší vodivost v sepnutém stavu.

Pokud potřebujeme větší závěrné napětí, je vhodná SiC dioda s PIN přechodem. Vlivem větší šířky zakázaného pásma je nutné zvýšit difúzní napětí přechodu PN. Tato dioda má tedy větší úbytek ale menší odpor v propustném stavu.

SiC součástky byly v posledních letech dostupné jako prototypy. Spolehlivost součástek se zvýšila změnou kvality monokrystalických plátů SiC. Jako prototypy jsou vyráběny MOSFET, JFET a poslední dobou BJT. Nejvíce zainteresovaní jsou v tomto NASA Glenn, SemiSouth, GE, Rockwell Scientific. Dostupné JFET potřebují k vypnutí záporné napětí na Gate. S těmito součástkami souvisí využití kaskádních struktur, které jsou důležité pro výkonové aplikace. Ve výkonových spínačích a ochranných obvodech se využívá kaskádně spojeného SiC JFET a klasického SI MOSFET. Vysokoteplotní a vysokonapěťový JFET je ovládán MOSFETem, který je na nízkou teplotu a nízké napětí.

Prvním realizovaným SiC MOSFETem byl UMOSFET, který je na závěrné napětí až 2000 V. Tento typ se potýká s problémy souvisejícími s vertikální strukturou tranzistoru. MOSFETy jsou vyloučeny z vysokoteplotních aplikací, neboť jsou nespolehlivé při teplotě přechodu 200 °C. IGBT a GTO jsou ve fázi výzkumu. Většina těchto součástek, které jsou dostupné, je drahých a pro hromadnou výrobu nespolehlivých. [49]

Slibnou perspektivu do budoucna má také sloučenina GaN. Nabízí stejné výkony jako SiC, ale velký potenciál je ve snížení nákladů. Hlavním táhnoucím odvětvím budou zdroje, fotovoltaické solární měniče a průmyslové motorové jednotky. Průkopníky v tomto směru jsou International Rectifier a EPC. [50]

Závěr

Cílem této práce bylo udělat přehled výkonových polovodičových součástek. Celkem má pět kapitol se zaměřením na nejdůležitější součástky dnes používané, tj. diody, tranzistory, tyristory a triaky. Pátá kapitola je zaměřena na současné trendy ve výkonové elektronice a jsou zde naznačeny i výhledy do budoucna, kde jsou perspektivními sloučeninami pro výrobu součástek karbid křemíku a nitrid galia. Vlastnosti těchto sloučenin jsou lákavé, neboť slibují podstatné zvýšení výkonů.

U každé součástky byla popsána historie vzniku, hlavní výrobci, výrobní technologie, pracovní režimy součástky, maximální dosahované parametry a typická použití. Informace byly získány z knih, odborných elektronických časopisů, katalogů předních výrobců a dalších webových stran, které jsou sepsány v seznamu literatury.

Charakteristiky byly povětšinou převzaty z katalogů pro vybrané jednotlivé součástky od přednostních firem zabývajících se výrobou. Mezní parametry jsem získával porovnáváním katalogových hodnot těchto firem.

Při této práci jsem se potýkal jen s jedním problémem, a to bylo dodržení požadovaného rozsahu této práce. Ke každé součástce by se dalo najít další množství zajímavých informací, které by mohlo dát vzniku samostatné práce ke každé součástce. Některé části kapitol jsem se snažil zkrátit, ačkoliv by možná zasloužily větší prostor. Doufám že i na úkor místa je práce srozumitelná, pochopitelná a přehledná.

Nicméně úkolem bylo udělat přehled výkonových součástek, který si myslím, že byl splněn. Shrnutím lze tedy snad konstatovat, že vytyčených cílů definovaných v zadání práce bylo dosaženo.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994, 73 s. ISBN 80-708-2136-1.
- [2] Microelectronics journal 32. K. SHENAI. *Elsevier* [online]. 2001 [cit. 2011-20-11]. Dostupné z: <http://144.206.159.178/ft/745/37597/651037.pdf>
- [3] *Elektrorevue: Výkonové elektronické součástky* [online]. 2000 [cit. 2011-20-11]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00014/index.html>
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 2.: Polovodičové prvky a elektronky*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-161-6.
- [5] Diode. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2011-21-11]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Diode>
- [6] Electrapk: Diode Structure and Symbol. ADMINISTRATOR. *Electrapk electronics world* [online]. 2011 [cit. 2011-02-12]. Dostupné z: <http://electrapk.com/diode-structure-and-symbol/>
- [7] Výuka KEV. In: *Prezentace dioda* [online]. 2008 [cit. 2011-02-12]. Dostupné z: http://vyuka.fel.zcu.cz/kev/SOV/Prezentace/AE_kombi/
- [8] BENDA, Vítězslav a Václav PAPEŽ. *Výroba silnoproudých zařízení 2*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 236 s. ISBN 80-010-2490-3.
- [9] ETE výukové materiály: Technologie výroby přechodů PN. STOKLASA, František. *Elektrotechnologie* [online]. 2011 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=22683&instance=1>
- [10] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R [cit. 2011-07-12]. ISBN 978-80-248-1485-8. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/VE1/Polovodicove%20soucastky.pdf>
- [11] ABB. *ABB katalog produktů: Diody* [online]. 2012 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db004291/c125739900722305c125738e002044f0.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [12] DANYK. Web Danyk. *Katalog CKD* [online]. 2011 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://danyk.wz.cz/ckd.html>
- [13] History of the transistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor
- [14] KABAT, T. Elektronika: klopne obvody. *Bipolární tranzistor* [online]. 2010 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://klopneobvody.hys.cz/transistory.html>
- [15] REICHL, J. a M. VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. *Výroby tranzistorů* [online]. 2008 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/344-vyroba-tranzistoru>
- [16] MORYST. Bipolární tranzistory. *Moryst.sweb* [online]. 2001 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt013.htm>
- [17] ABB. ABB datasheet. In: *IGBT 5SMY 12G 1721* [online]. 2012 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=5SYA%201324-01&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [18] SEDLÁK, Josef. MOSFET. *Zesilovače* [online]. 2003 [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocianku=2003060202>
- [19] Alldatasheet. In: *International Rectifier. datasheet* [online]. 2012 [cit. 2012-14-01]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68158/IRF/IRF510.html>
- [20] Mosfet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011 [cit. 2012-14-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/MOSFET>
- [21] DESORT, Jiří. IGBT tranzistory. GLYN. *Mitsubishi tranzistory* [online]. 2007 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/soucastky/nova-rada-1700v-igbt-tranzistoru-od-mitsubishi.html>
- [22] IGBT: History. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Insulated_gate_bipolar_transistor#History
- [23] DEMUTH a WINTERHOLLER. SKiM: technical explanations. In: *IGBT modules* [online]. 2011 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.semikron.com/skcompub/en/SID-1E404697-918211D2/SKiM_3.pdf

- [24] IGBT SKM 800GA176D. In: *Datasheet Semikron* [online]. 2012 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM800GA176D_22890435.pdf
- [25] NOVÁK, Jaroslav. Elektro 06/2003. *Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti* [online]. 2003, č. 06 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25453
- [26] Scribd. *Tyristor* [online]. 2008 [cit. 2012-15-02]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/6818000/Thyristor-Diac-und-Triac>
- [27] Dmaster: Polovodičové součástky. *Tyristory* [online]. 2006 [cit. 2012-15-02]. Dostupné z: <http://www.dmaster.wz.cz/teorie/polovodice/polovodice.htm#tyristory>
- [28] Soprase: ELG. In: *Vlastnosti lektrotechnických materiálů* [online]. 2009 [cit. 2012-15-02]. Dostupné z: soprase.nhx.cz/ELG/ELG.doc
- [29] ŠVESTKA, Jakub. Výroba PN přechodů. In: *Technologie výroby* [online]. 2008 [cit. 2012-15-02]. Dostupné z: lenklaubrova.xf.cz/Prace_studentu/VyrPNpre.doc
- [30] VYLEGALA, Pavel. Elektronika. In: *Tyristory* [online]. 2006 [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektronika.pdf
- [31] ABB. *Datasheet ABB: Tyristory* [online]. 2012 [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/db0003db004291/11e090bbd5d7f889c12578650046e11e.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [32] ABB. *Datasheet ABB: Tyristory RCT* [online]. 2012 [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/db0003db004291/c559fce6c3f80408c125786500460b3a.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [33] JJOHNYK. Elektronika. *Tyristory, Triaky* [online]. 2003 [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektronika/04.htm>
- [34] Ústav mechatroniky a technické informatiky. *Tyristor GTO* [online]. 2005 [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/vke/menice_rozdeleni_teplo.pdf
- [35] GTO 5SGS 16H4500. In: *Datasheet ABB* [online]. 2012 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/edf5d024d838285ec1257760004b27e2/\\$file/5sgs_16h4500.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/edf5d024d838285ec1257760004b27e2/$file/5sgs_16h4500.pdf)
- [36] ABB. *Datasheet ABB: Symmetric GTO* [online]. 2012 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db004291/c125739900722305c1257399001e7909.aspx?productLanguage=cz&country=CZ>
- [37] Thyristor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: en.wikipedia.org/wiki/Thyristor
- [38] Integrated gate-commutated thyristor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-28-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_gate-commutated_thyristor#Manufacturers
- [39] IGCT. In: *ABB* [online]. 2012 [cit. 2012-28-03]. Dostupné z: http://www.vecgroup.com/files/rew/4/ABB_ACS5000.pdf
- [40] PAVLÍČEK, Jiří. IGCT. *EDUCON* [online]. 2005 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz/rservice.php?akce=tisk&cislomodulu=2005022501>
- [41] Vypínací IGCT. *ABB: Datasheet* [online]. 2012 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/cz/9AAC30200135.aspx>
- [42] BARTOŠ, Stanislav. IGCT. *Elektro* [online]. 2000, č. 06 [cit. 2012-20-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23818
- [43] Tyristory IGCT. *Polovodiče ČKD* [online]. 2008 [cit. 2012-8-05]. Dostupné z: http://www.ckdpoel.cz/_files/soubory/igct.cz.0805113.pdf
- [44] IGCT 5SHX 19L6020. In: *Datasheet ABB* [online]. 2012 [cit. 2012-08-05]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/5f04833312406024c12579c9002f5def/\\$file/5shx%2019l6020_5sya1250-00feb%2012.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/5f04833312406024c12579c9002f5def/$file/5shx%2019l6020_5sya1250-00feb%2012.pdf)
- [45] Triak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-013-05]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Triak>
- [46] Triak. *Vícevrstvé polovodiče* [online]. 2004 [cit. 2012-17-05]. Dostupné z: http://www.edunet.souepl.cz/EZO/vv_tri.htm

- [47] Motorola 2N6071A. In: *Datasheet Motorola* [online]. 2012 [cit. 2012-17-05]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2840/MOTOROLA/2N6071A.html>
- [48] CHLEBIŠ, ŠIMONÍK, OSMANČÍK a MORAVČÍK. Trendy výkonové elektroniky. In: *Výkonová elektronika* [online]. 2010 [cit. 2012-26-05]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2007/07/Simonik.pdf>
- [49] KŘEČEK, Tomáš. Součástky na bázi SiC. In: *Elektronika* [online]. 2010 [cit. 2012-28-05]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2007/03/Krecek.pdf>
- [50] GaN semiconductor. *Semiconductor today* [online]. 2012 [cit. 2012-28-05]. Dostupné z: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/MAR/IMS_130312.html