

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTROTECHNIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled výkonových polovodičových součástek

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Martin RÖDL**
Osobní číslo: **E15B0025K**
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. Uveďte krátký vstup do oblasti výkonové polovodičové techniky.
2. Zpracujte přehled současných polovodičových prvků používaných ve výkonové elektronice (stručná historie, hlavní současní výrobci, základní struktur-a/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 kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, svazek I., ZČU v Plzni, 1994.
2. Benda, V., Papež, V.: Výroba silnoproudých zařízení 2, ČVUT, 2002.
3. Katalogy předních výrobců výkonových polovodičových prvků.
4. Elektronické zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Fořt, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na přehled výkonových polovodičových součástek. Práce je strukturovaná od součástek s jednodušší strukturou až po ty složitější. Každá kapitola popisuje funkci součástky, základní parametry a jejich použití. U každé jsou uvedeni vybraní zástupci z aktuálních katalogů výrobců součástek s maximálním možným napěťovým a proudovým zatížením.

Klíčová slova

Výkonové polovodičové součástky, dioda, tranzistor, MOSFET, IGBT, tyristor, IGCT triak.

Abstract

This bachelor thesis is focused on an overview of power semiconductor devices. The thesis is structured from a component with a simpler structure to the more complex ones. Each chapter describes the function of the component, the basic parameters and its use. Each component is selected from current catalogs of component manufacturers with maximum possible voltage and current loads.

Key words

Power semiconductor components, diode, transistor, MOSFET, IGBT, thyristor, IGCT, triac.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto 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.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2018

Martin Rödl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Fořtovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1.	Výkonová polovodičová technika	12
1.1.	Výkonové elektronické součástky	12
1.2.	Historie výkonové elektroniky	13
2.	Výkonové diody	14
2.1.	Historie součástky	14
2.2.	Hlavní současní výrobci	14
2.3.	Základní PN struktura	14
2.4.	Struktura PN přechodu výkonové diody	15
2.5.	Základní pracovní režimy činnosti	16
2.5.1.	Propustný stav	16
2.5.2.	Závěrný směr	17
2.6.	Základní statické a dynamické parametry	18
2.6.1.	Statická VA charakteristika	18
2.6.2.	Dynamická charakteristika	18
2.7.	Provozní parametry	19
2.8.	Mezní hodnoty dosahované v současné době	19
2.8.1.	Standartní diody	19
2.8.2.	Lavinové diody	19
2.8.3.	Rychlé diody	20
Schottkyho dioda		20
2.9.	Typické použití	20
2.9.1.	Diody s krátkou dobou zotavení	20
2.9.2.	Usměrňovací diody	20
2.9.3.	Svařovací diody	20
2.9.4.	Lavinové diody	20
2.10.	Schottkyho diody	20
3.	Tranzistory	21
3.1.	Stručná historie součástky	21
3.2.	Hlavní současní výrobci	22
4.	Biopolární tranzistor	22
4.1.	Základní struktura – biopolární tranzistor	22
4.2.	Technologie výroby biopolárního tranzistoru	23
4.2.1.	Planární metoda	23
4.3.	Základní pracovní režimy činnosti	24
4.4.	Mezní hodnoty dosahované v současné době	24

5.	Unipolární tranzistor.....	24
5.1.	Technologie výroby.....	25
5.2.	Základní statické parametry	25
5.3.	Dynamické parametry	26
5.4.	Provozní parametry	27
5.5.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	27
5.6.	Typické použití.....	27
6.	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem	28
6.1.	Stručná historie součástky	28
6.2.	Hlavní současní výrobci	28
6.3.	Základní struktura.....	28
6.4.	Technologie výroby.....	29
6.5.	Statické parametry	29
6.6.	Dynamické parametry	30
6.7.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	31
6.8.	Typické použití.....	31
7.	Tyristor	31
7.1.	Stručná historie součástky	31
7.2.	Hlavní současní výrobci	31
7.3.	Základní struktura.....	31
7.4.	Technologie výroby.....	32
7.5.	Základní pracovní režimy činnosti	33
7.6.	Základní statické a dynamické parametry	33
7.7.	Dynamické parametry	33
7.8.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	35
7.9.	Typické použití.....	35
8.	Vypínací tyristor.....	35
8.1.	Hlavní současní výrobci	35
8.2.	Základní struktura.....	35
8.3.	Technologie výroby.....	36
8.4.	Základní pracovní režimy činnosti	36
8.5.	Základní statické a dynamické parametry	36
8.6.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	37
8.7.	Typické použití.....	37
9.	Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou.....	37
9.1.	Stručná historie součástky	38
9.2.	Hlavní současní výrobci	38

9.3.	Základní struktura.....	38
9.4.	Statické a dynamické parametry.....	39
9.5.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	39
9.6.	Typické použití.....	39
10.	Triak	40
10.1.	Stručná historie součástky	40
10.2.	Hlavní současní výrobci	40
10.3.	Základní struktura.....	40
10.4.	Technologie výroby.....	41
10.5.	Statická charakteristika.....	41
10.6.	Dynamické parametry	41
10.7.	Mezní hodnoty dosahované v současné době.....	41
10.8.	Základní charakteristiky	42
10.9.	Typické použití.....	42
11.	Současný trend a výhled do budoucnosti	43
11.1.	Karbid křemíku.....	43
11.2.	Nitrid Gália.....	44
	Závěr.....	46
	Citace.....	47

Úvod

Elektrická energie se stala součástí našeho každodenního života a nelze si bez ní dnešní svět představit. Přitom ještě před sto lety po prvním světové válce bylo elektrifikováno v Československu jen něco více než 10 % měst, které obsahovali kolem třetiny obyvatelstva. Teprve po druhé světové válce se elektrifikovali poslední obce. Dnes využíváme elektrickou energii na každé kroku. Lidé si to často neuvědomují, protože nepoužívají samotnou elektrickou energii, ale její aplikace jako je komunikace, světlo, topení, nebo na mechanickou práci atd. To že jí můžeme používat v různých aplikacích od velkých motorů po domácí mini přístroje, je díky tomu, že jsme schopni měnit její parametry. Pochopením a porozuměním změn jednotlivých parametrů energie se zabývá výkonová elektronika.

Výkonová elektronika stále nabírá více na významu, a to díky tomu, že do naší energetické soustavy stále přidáváme různé zdroje elektrické energie a máme větší nároky na spolehlivost. Přenášíme elektrickou energii stále na větší a větší vzdálenosti. Zvětšujeme nároky na její co nejefektivnější využití. Snažíme se neustále využívat prostředí kolem nás a nacházet další zdroje. Je důležité si uvědomit, že různé formy energie mají různé parametry. S tím se zvětšují nároky rozvoj, management a přeměny elektrické energie. A tyto přeměny se provádí pomocí elektrických zařízení.

Pravděpodobně nejpovědomější příklad elektrického zařízení na změnu parametrů elektrické energie je usměrňovač, který mění střídavý elektrický proud na stejnosměrný. Naopak pokud potřebujeme přeměnit stejnosměrný proud na střídavý, nazýváme takové zařízení střídač. Pokud bychom tyto zařízení, rozebrali na jednotlivé obvody a součástky, zjistili bychom, že hlavní princip přístroje plní výkonové polovodičové součástky. Rozvoj polovodičových součástek má vliv na celkový rozvoj civilizace. Tím, jak se rozvíjí jejich parametry a zlepšují se metody výroby, tím se součástky stávají rozšířenější a levnější. Toto má další efekt na jejich rozšiřování a díky tomu se objevují další aplikace, kde se dají polovodičové součástky využít.

Tato práce se zabývá se právě přehledem současných polovodičových výkonových součástek. Každé součástce je věnována samostatná kapitola. Jednotlivé kapitoly jsou řazeny od složitosti polovodičové struktury od diody, polovodiče s jedním PN přechodem až po triak součástku se složenou strukturou několika PN přechodů. Každá kapitola popisuje stručně princip součástky, její historii, statické a dynamické parametry až po její využití a v současnosti dosahované parametry. Závěr práce nastiňuje trendy do budoucna, které vychází z aktuálního výzkumu a možností, které se jeví progresivně.

Kapitoly jsou strukturovány tak že, každá kapitola začíná základní vysvětlením součástky, popsáním její funkce, vysvětlením její vnitřní struktury a její historií vzniku. Dále je popsána charakteristika součástky a parametry, které jsou významné při jejím použití. Povrchně je také popsána technologie výroby součástky. Jsou napsány příklady použití dané součástky a její současné parametry, které dosahuje. Parametry jsou zjištěny z aktuálních katalogů výrobců a distributorů výkonové polovodičové techniky.

1. Výkonová polovodičová technika

K realizaci změny silové elektřiny na požadované charakteristiky nám pomáhá právě výkonová polovodičová technika. V širokém pojetí je úkolem výkonové techniky kontrolovat a zajistit přenos elektrické energie pomocí napětí a proudu, tak abychom jí mohli využívat v optimálních parametrech dle našich požadavků.

V domácnostech v České republice máme v zásuvkách fázové napětí 230V s kmitočtem 50Hz, ale ne každá aplikace či spotřebič si může vystačit s touto charakteristikou. Navíc výroba elektrické energie probíhá při jiných parametrech, než jsou vhodné pro přenos a už existuje řada stejnosměrných přenosů. Pro změnu střídavého napětí na stejnosměrné se používají měničky.

Ne však každá aplikace spotřeby elektrické energie si vystačí s charakteristikou běžného síťového napětí. Z tohoto důvodu se využívají měniče, které poskytují možnost řídit napětí na vstupu spotřebiče a měnit jeho kmitočet. Je-li hodnota přenášeného výkonu větší než hladina řídicích a informačních signálů, nazýváme tento měnič výkonový. Základními jednotkami výkonových měničů jsou výkonové elektronické součástky.[1]

1.1. Výkonové elektronické součástky

V sobě zahrnují součástky polovodičové a, dnes již historii patřící, součástky iontové – výbojky. Výkonové elektronické součástky mají vlastní spínací režimy – zapnuto a vypnuto. Tyto součástky dále dělíme na řízené a neřízené. Neřízené součástky se spínají v závislosti na napětí přiloženém na součástku. Řízené součástky mají spínání určitým způsobem ovladatelné a to prostřednictvím zvláštní, tzv. řídicí, elektrody.

Kromě měničů se v praxi často používají elektronické výkonové spínače. Elektronické spínače tvoří náhradu kontaktních klasických mechanických spínačů. Elektronické spínače umožňují spínat bezkontaktně a bez vnější mechanické síly a díky tomu, pomocí vhodného algoritmu lze měnit parametry elektrické energie. Pro jednotlivé přeměny se používá specifický název zařízení – např. změna kmitočtu – frekvenční měnič atd. Elementární přeměny jsou zakresleny na v tabulce č. 1. [1]

vstup \ výstup	Stejnospměrný proud (DC)	Střídavý proud (AC)
Stejnospměrný proud (DC)	Stejnospměrný měnič (DC converter)	střídač (inverter)
Střídavý proud (AC)	usměrňovač (rectifier)	střídavý měnič (AC converter)

Tab. č. 1[2]

1.2. Historie výkonové elektroniky

Počátky výkonové elektroniky začínají v 80. letech minulého století, kdy byl vyroben první selenový usměrňovač, který se používal k dobíjení telefonních baterií. Tento usměrňovač byl složen z diod, které byly vyrobeny jako přechod mezi selenovou a kovovou vrstvou. Problém byl, že jejich proudová i napěťová zatížitelnost byla velmi malá. Přesto se používali až do 60. let tohoto století.

Dalším významným milníkem byl objev nelineárních vlastností elektrického oblouku ve rtuťové páře. Tento objev se datuje v roce 1902, kdy Američan Cooper Hewit zveřejnil svoji práci o usměrňovacích vlastnostech rtuťové výbojky. Hned rok na to byl první skleněný rtuťový usměrňovač prezentován firmou Westinghouse na průmyslové výstavě v Londýně. S výrobou ve větším měřítku se začalo o 10 později a první rtuťový usměrňovač byl u nás vyroben v roce 1928.[3]

První rtuťové výbojky byly vyrobeny ze skleněné vakuové nádoby, kde byla umístěna jedna anoda a jedna katoda, která byla ve formě tekuté rtuti. Problém byl, že před začátkem provozu se katoda musela zažehnout, aby vznikla tzv. katodová skvrna. Tato katodová skvrna dosahovala přibližně 3000°C. Proud výbojky procházel přes oblouk mezi katodou a anodou tvořeným plazmatem ze rtuťových par, které umožňovaly emisi z katody, a tím byl vytvořený usměrňovací efekt. Jak pokračoval vývoj rtuťových usměrňovačů, tím se postupně vylepšovala i jejich konstrukce. Místo skleněných nádob se začali používat kovové a k jedné katodě bylo přiřazeno až 24 kovových anod. Postupně vývoj rtuťových usměrňovačů dospěl až k proudovému zatížení 10kA při napětí 10kV, a v některých případech bylo dosahováno napěťového zatížení až 150kV. Takové usměrňovače byly použity především v měničích železniční a městské dopravy, a byly také použity na první stejnosměrné energetické přenosy.

Vedle rtuťových usměrňovačů lze ještě zmínit jednu historickou součástku, kterou je tyatron. Tyatrony se začali vyvíjet od půlky 20. let, ale k jejich masivnějšímu rozšíření došlo až po druhé světové válce. Tyatron byl typ elektrické výbojky, která byla naplněna inertním plynem, a to nejčastěji argonem. K jednostranné emisi se používala žhavená katoda, která zároveň bránila ke zlepšení proudové zatížitelnosti. Řízení bylo prováděno pomocí mřížky nacházející se blízko anody. Při kladné půl vlně vznikl elektrický oblouk, který bych schopen vést až 20A při napěťové zatížitelnosti až 15kV.

Problémem všech těchto výbojek bylo, že bylo potřeba hodně energie jen na udržení samotné zapnuté výbojky. Napětí na udržení oblouku bylo až 20V. Navíc ztrátová energie se přeměňovala v teplo a výbojky bylo potřeba chladit. Např. nejvýkonovější rtuťový usměrňovač s vodním chlazením vážil dohromady až 10t. Další velkou nevýhodou byla neschopnost okamžitého používání. Nezahřátá výbojka nemohla být ihned zatížena plným výkonem. I přesto se výroba rtuťových usměrňovačů v Československu realizovala až do roku 1965.

Dalším významným objevem bylo objevení nelineárních vlastností P-N přechodu a jeho využití v diodě a tranzistoru. Jejich využití bylo nejdříve ve slaboproudé technice. První silnoproudé germaniové diody (200A, 200V) byly objeveny v roce 1953. Postupně vznikaly další výkonové součástky jako tyristory, tranzistory a jejich různé modifikace. V Československu první germaniová dioda byla postavena v roce 1957, křemíková dioda o dva roky později a s výrobou tyristorů se začalo až v roce 1966.

Souběžně s vývojem součástek docházelo k vylepšování výkonových obvodů. Vylepšovali se schémata elektronických měničů, jejich komutačních obvodů a ochrana součástek. Díky tomu se výkonová elektronika rychle rozšířila a kromě měření městské hromadné dopravy, elektrické trakce a stejnosměrných přenosů se začali používat regulované pohony čerpadel kompresorů a dalších průmyslových technologií. Dále se s postupným rozvojem v 90. letech

začaly velmi rychle rozšiřovat vypínatelné součástky, a to především GTO tyristory a IGBT tranzistory.[1]

2. Výkonové diody

Výkonová polovodičová dioda je součástka, která je schopna přenést určité množství výkonu a tím se liší od klasických signálních diod. Výkonové diody dokáží vést proudy v propustném směru o velikosti několika kA a v závěrném směru blokovat napětí v řádech kV. Abychom dostali tyto provozní charakteristiky, je potřeba upravit také vnitřní strukturu výkonové diody od klasické signální diody. Jednotlivé strukturální modifikace jsou v obecném smyslu aplikovány na všechny výkonové prvky, které mají PN přechod, pro zvýšení výkonových schopností.

2.1. Historie součástky

Princip chování krystalu diody byl objeven v roce 1874 německým vědcem K.F. Braunem. Braun si nechal patentovat krystalový usměrňovač v roce 1899.

V roce 1906 americký inženýr G.W.Pickard objevil nový typ diody, který byl založen na tom, že určitý typ křemíkového krystalu je schopen vést elektrický proud pouze jedním směrem. Přidáním krystalu křemíku mezi železnou základnu a správně umístěný tenký drát, Pickard zjistil, že takto je možné křemíkový krystal použít jako detektor rádiových vln. V roce 1906 získal G.W.Pickard patent na krystalový detektor.

První výkonová polovodičová dioda byla přestavena v roce 1952 R.N.Hallem. Tato germaniová dioda byla schopna v závěrném směru blokovat napětí 200V a byla schopna vést až 35A. Protože tato dioda byla velmi levně vyrobitelná, a proto přesto velice rychle rozšiřovat. Hned několik let na to se povedla výroba čistého křemíku, která vedla k masivní výrobě křemíkových diod, které převzaly dominantní pozici.[4]

2.2. Hlavní současní výrobci

Podle katalogového vyhledávače lze dohledat až 1100 firem, které se zabývají výrobou výkonových diod. Ne však každá firma má celé portfolio diod. Spousta firem je zaměřena pouze na určitý segment, a proto níže uvádím pouze tři velké výrobce, kteří mají kompletní portfolio výkonových diod.

ABB Group - <https://new.abb.com/>

Mitsubishi Electric - <http://www.mitsubishielectric.com>

Infineon Technologies - <https://www.infineon.com>

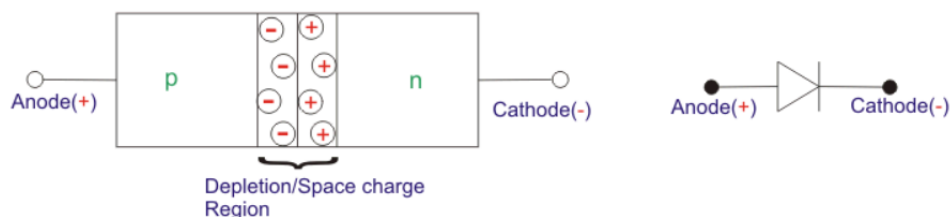
2.3. Základní PN struktura

Dioda představuje jednodušší polovodičovou součástku se dvěma vrstvami a dvěma vodivými kontakty spolu s jedním přechodem. Klasické signálové diody mívají přechod z polovodiče typu P a z polovodiče typu N. Přechod je tvořen kontaktem polovodičů P a N.

Polovodič typu P je vytvořen tak, že do krystalu křemíku se vloží prvek, který má tři valenční elektrony (např. bór). Tento prvek ukořistí z okolí jeden potřebný elektron. V příměsi vzniknou tzv. díry, které jsou velmi pohyblivé a dokáží nést náboj. Náboj děr je kladný a oblast, která je spojena s konektorem se nazývá anoda.

Polovodič typu N je vytvořen tak, že do krystalu křemíku se vpraví příměs prvku, který má pět valenčních elektronů (např. fosfor). Tento prvek uvolní jeden valenční elektron, a takto uvolněné elektrony jsou nositeli záporného náboje. Konektor, který je spojen s touto oblastí se nazývá katoda.

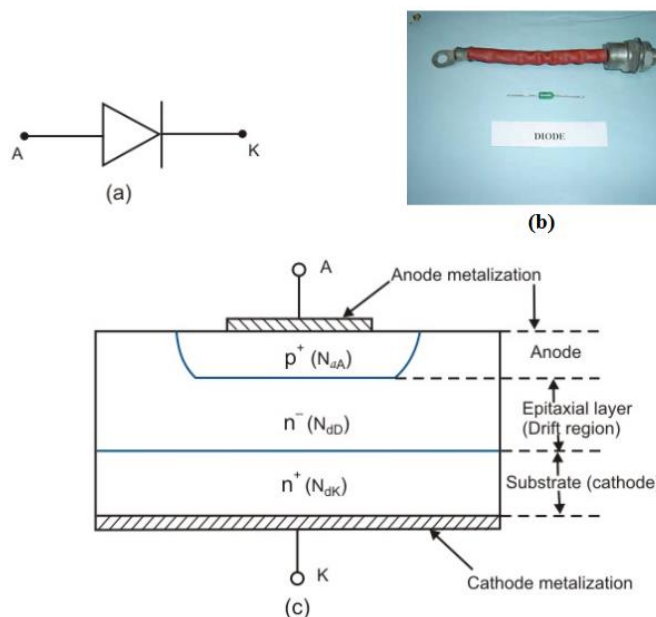
PN přechod je tvořen stykem polovodiče typu P a N. V místě styku difundují díry za volnými elektrony a naopak, díky tomu se oblast přechodu stane nevodivou. Pokud připojíme na PN přechod napětí, tak že na anodě bude záporné napětí a na katodě kladné napětí, pak jsou volné díry přitahovány k zápornému napětí a volné elektrony přitahovány ke kladnému napětí. Tím se zvětší přechodová oblast a PN přechod je závěrně polarizován. Zapojí-li se napětí opačným způsobem, kladné napětí na anodu a záporné napětí na katodu, a bude-li napětí narůstat přes určitou hodnotu (křemíková dioda – 0,8V), tak dojde k posunu volných nosičů nábojů směrem k přechodu natolik, že nevodivá oblast zanikne a přes PN přechod může procházet proud.[5]



Obr. č. 1 [5]

2.4. Struktura PN přechodu výkonové diody

Požadavek na strukturu výkonové diody je vést, co největší množství proudu v propustném směru s nejmenšími možnými ztrátami a zároveň v závěrném směru blokovat, co největší možné napětí. Blokace velkého napětí vyžaduje širokou vyčerpanou oblast, tak aby zabránila přes intenzitu elektrického napětí průrazu v PN přechodu. Hustota náboje vyčerpané oblasti by měla být nízká, aby se dosáhlo vyčerpání pro maximální elektrickou pevnost. Tyto dva požadavky se dají řešit jednoduše dotovaným P-N přechodem a dle toho přizpůsobit i šířku vyčerpané oblasti. Tato konstrukce by způsobila, že by přechod měl vysoký odpor v propustném směru a v důsledku toho by výkonová ztráta byla nepříjemně vysoká. Na druhou stranu, odpor by se snížil zvýšením úrovně dotace, ale tím by se snížila pevnost blokace závěrného napětí. Tento zřejmý odpor dvou přístupů se dá vyřešit zavedením jednoduše dopované driftové vrstvy N⁻ v požadované tloušťce mezi hodně dotovanými vrstvami jako je zobrazeno na obrázku níže.[6]



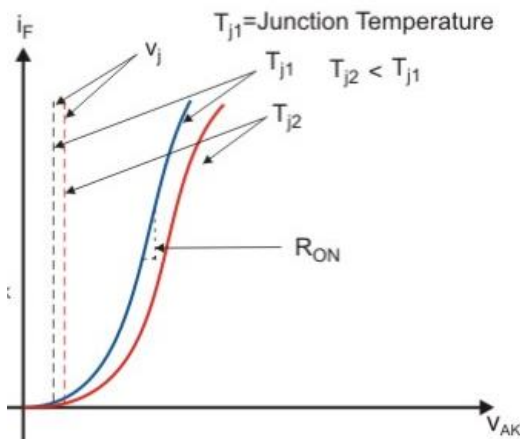
Obr. č. 2 a) symbol diody b) příklad diody c) schéma řezem diody [6]

Vrstva N- je důležitou vlastností polovodičové diody, která ji dělá vhodnou pro přenášení daleko většího výkonu. Díky malé koncentraci náboje se zvýší tloušťka přechodu. Tato zvětšená vrstva pomáhá diodě blokovat větší zpětné napětí a odolat většímu průrazu. Nevýhodou je, že N- vrstva zvyšuje ohmickou rezistivitu diody, která vede k většímu zahřívání při procházení proudem propustným směrem, a je proto potřeba vzniklé teplo odvést. Z tohoto důvodu se dělá mnoho různých pouzder diod.[6]

2.5. Základní pracovní režimy činnosti

2.5.1. Propustný stav

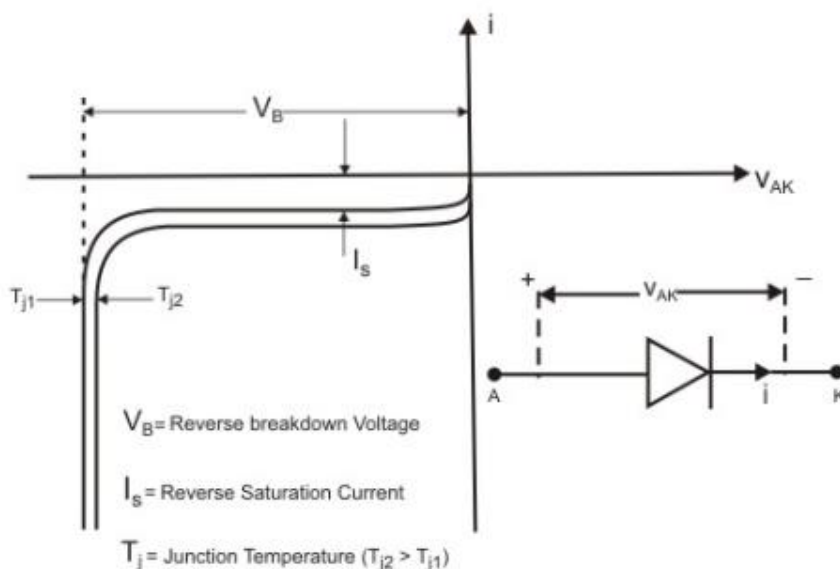
Výkonová dioda má velmi podobnou voltampérovou charakteristiku jako signální dioda. Při překročení propustného napětí začne vést dioda proud. Čím vyšší proud, tím více se zvyšuje ohmický odpor, díky kterému se dioda začne ohřívat. Vzniklé teplo se musí odvést z přechodu pryč. Pokud je teplo nedostatečně odváděno, tak dojde ke zničení diody. To je také limitující důvod při stavbě a možnostech diody, a i z tohoto důvodu jsou výkonové diody vyráběny v různých pouzdech, tak aby se dal zvolit nejvhodnější způsob odvodu tepla při daném použití. Na obrázku č. 3 je zobrazena charakteristika závislosti teploty přechodu na průchozím proudu a napětí diody. Při překročení dovolené teploty dojde, jak již bylo zmíněno dříve, ke zničení diody. Proto je dovolená teplota přechodu důležitá informace pro konstruktéra, aby případně mohl navrhnout účinný odvod tepla. [7]



Obr. č. 3 Charakteristika závislosti teploty přechodu na průchozím [7]

2.5.2. Závěrný směr

Závěrný směr funguje stejně jako u signálové diody. Pokud je dioda připojena v závěrném směru, jsou polovodiče P přitahovány k zápornému zdroji a polovodiče typu N ke kladnému pólu a dojde ke zvětšení vyčerpané oblasti. Šířka vyčerpané oblasti se dá vhodně volit pomocí driftovací oblasti. Existují proto dva typy diod. První typ je ten, který drží závěrné napětí a u druhého typu dochází při překročení napětí k tzv. tunelování, kdy jsou díky silnému elektrickému poli vytrhnuty elektrony, které začínají procházet přes vyčerpanou oblast, a v této chvíli se začne zvyšovat vodivost diody. Při dalším zvyšování příkonu by se klasická i tunelová dioda začala rychle oteplovat a přechod by se zničil. I přes to, že bude dioda zapojena v závěrném směru a napětí nedosáhne průrazové hodnoty poteče přes diodu malý proud, tzv. saturační, který dosahuje jednotky mA a lze ho ve většině aplikací zanedbat. Příklad charakteristiky závěrné diody je zobrazen na obrázku č. 4. [7]

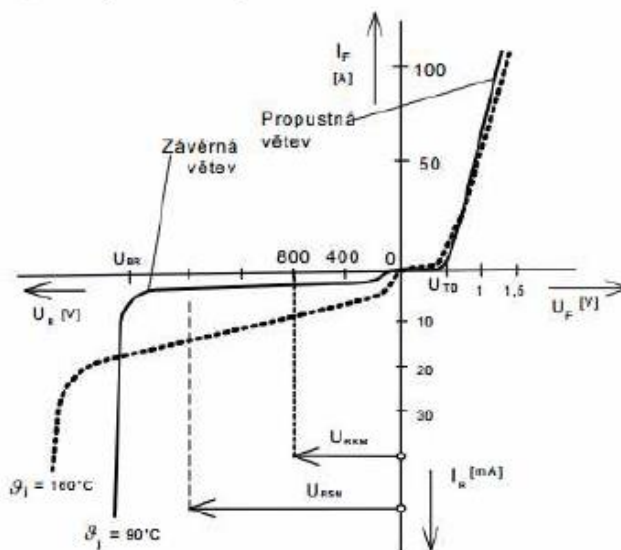


Obr. č. 4 Závěrná charakteristika lavinové diody [7]

2.6. Základní statické a dynamické parametry

2.6.1. Statická VA charakteristika

Statická charakteristika popisuje závislost procházejícího proudu diodou a jejími elektrodami. Popisuje časově neproměnné veličiny. Statická charakteristika diody se nachází ve dvou kvadrantech. První kvadrant popisuje propustnou charakteristiku. Jejími důležitými parametry jsou propustné prahové napětí a diferenciální odpor. Druhý kvadrant popisuje závěrnou charakteristiku. Jejími důležitými parametry jsou závěrný diferenciální odpor a závěrné průrazné napětí. Po jeho překročení se diferenciální odpor mnohonásobně zmenší a velikost proudu je závislá na velikosti odporu v obvodu. Pokud odpor v obvodu neovlivní velikost proudu po průrazu, tak proud začne strmě narůstat a dojde k destrukci diody.[8]

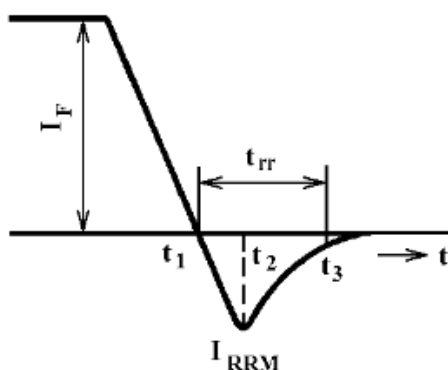


Obr. č. 5 Příklad voltampérové charakteristiky [8]

2.6.2. Dynamická charakteristika

Z dynamických jevů má důležitý význam vypnutí diody. Při zániku propustného proudu nedopovídá vypnutí statické VA charakteristice. Při změně polarity napětí dioda přechází z propustného do závěrného, v tomto okamžiku nastává tzv. zotavení. Při poklesu průchozího proudu I_F na nulu, proud nezaniká, přejde do opačného směru se stejnou strmostí. Vodivost se v dané chvíli z propustného směru závěrného skoro nezmění a po krátké

Statická charakteristika popisuje závislost procházejícího proudu diodou a jejími elektrodami. Popisuje časově neproměnné veličiny. Statická charakteristika diody se nachází ve dvou kvadrantech. První kvadrant popisuje propustnou charakteristiku. Jejími důležitými parametry jsou propustné prahové napětí a diferenciální odpor. Druhý kvadrant popisuje závěrnou charakteristiku. Jejími důležitými parametry jsou závěrný diferenciální odpor a závěrné průrazné napětí. Po jeho překročení se diferenciální odpor mnohonásobně zmenší a velikost proudu je závislá na velikosti odporu v obvodu. Pokud odpor v obvodu neovlivní velikost proudu po průrazu, tak proud začne strmě narůstat a dojde k destrukci diody.[8]



Obr. č. 6 Komutace diody [8]

2.7. Provozní parametry

V_{RRM} - Opakovatelné špičkové závěrné napětí – Maximální hodnota dovoleného periodicky se opakujícího napětí na diodě.

I_{FRMS} – Efektivní maximální propustný proud - Tato hodnota určuje maximální hodnotu efektivního proudu v propustném směru.

I_{FAVm} - Střední propustný proud – Dioda je často používána v zesilovacích stejnosměrných obvodech. V takovém případě průměrný zátěžný proud a proud v propustném směru obvykle mají jednoduchý vzájemný vztah.

P_F - Ztrátový výkon diody – Důležitý parametr pro konstrukční úpravu chlazení.

T_j – Rozsah pracovních teploty diody. Tento parametr bývá v katalozích uvedený u jednotlivých hodnot.

T_{rr} - Zotavovací doba diody – Doba, po které dioda po komutaci obnoví svoji funkci. [1]

2.8. Mezní hodnoty dosahované v současné době

2.8.1. Standartní diody

Ze standardních diod byly vybrány zástupci od několika společností, které jsou dostupné v katalozích a provozují se při normálních podmínkách:

DynexDioda DRD560G9 $V_{RRM} = 9000$ V, $I_{FAVm} = 557$ A, $I_{FSM} = 10$ kA

Dynex Dioda DRD4690H8 $V_{RRM} = 8500$ V, $I_{FAVm} = 4690$ A, $I_{FSM} = 74.5$ kA

DynexDioda DRD8880H22 $V_{RRM} = 2200$ V, $I_{FAVm} = 8000$ A, $I_{FSM} = 125$ kA

HVP Dioda HV07-12B $V_{RRM} = 35000$ V, $I_{FAVm} = 60$ A, $I_{FSM} = 100$ A

EDI Dioda KHP50 $V_{RRM} = 50000$ V, $I_{FAVm} = 2.25$ A, $I_{FSM} = 82$ A, [9], [10], [11]

2.8.2. Lavinové diody

ABB Dioda 5SDA 14F5007 $V_{RRM} = 5000$ V, $I_{FAVm} = 1410$ A, $I_{FSM} = 17.5$ kA

ABB Dioda 27F2002 $V_{RRM} = 2000$ V, $I_{FAVm} = 2700$ A, $I_{FSM} = 33,1$ kA [12]

2.8.3. Rychlé diody

ABB Dioda DSF11060SG $V_{RRM} = 6000 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 400 \text{ A}$, $I_{FSM} = 4.2 \text{ kA}$ $T_{rr} = 3000 \text{ nS}$

ABB Dioda DSF215445SV $V_{RRM} = 4500 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 3200 \text{ A}$, $I_{FSM} = 20 \text{ kA}$ $T_{rr} = 3000 \text{ nS}$

Vishay 78-VS-305URA250P4 $V_{RRM} = 2500 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 300 \text{ A}$, $I_{FSM} = 6 \text{ kA}$ $T_{rr} = 10 \text{ nS}$ [12], [13]

2.8.4. Schottkyho dioda

GeneSiC Semiconductor GAP3SLT33-214 $V_{RRM} = 3300 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 4 \text{ A}$, $I_{FSM} = 10 \text{ A}$

Cree C4D20120H $V_{RRM} = 1200 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 54 \text{ A}$, $I_{FSM} = 130 \text{ A}$

Cree C3D25170H $V_{RRM} = 1700 \text{ V}$, $I_{FAVm} = 25 \text{ A}$, $I_{FSM} = 117 \text{ A}$ [18]

2.9. Typické použití

2.9.1. Diody s krátkou dobou zotavení

Diody s krátkou dobou zotavení se vyznačují velmi malými hodnotami T_{rr} . Velmi často bývají součástí střídače, tzn. u zdroje napětí a proudu. Důvodem je jejich vysoká spínací rychlost, která pomáhá zlepšit účinnost takovýchto zdrojů. Dále se často používají v radarech k přijímání vysokofrekvenčních signálů. Jejich použití také je v převodnících analogového signálu na digitální. [1]

2.9.2. Usměrňovací diody

Usměrňovací dioda umožňuje průtok elektrického proudu pouze jedním směrem. Tyto diody umožňují vést vyšší proudy než ostatní typy diod. Nejčastěji se používají pro změnu střídavého proudu na stejnosměrný. Jsou tak použity v obvodech regulující výkon, v nabíječkách akumulátorů a v napájecích zdrojích. Nejčastěji jsou vyrobeny z křemíku. Vyznačují se větší oblastí PN přechodu, a proto jejich vlastností bývá velká kapacita. Existuje mnoho druhů usměrňovacích diod, které se dle jejich parametrů dělí na: diody s maximálním proudem v propustném směru, diody s maximálním závěrným napětím, diody s maximálními špičkovými proudy. [1]

2.9.3. Svařovací diody

Jak už název napovídá, svařovací diody jsou navrženy pro svařecí zařízení. Ty se vyznačují vysokými proudy ve frekvenčních oblastech od jednotek až po desítky kilohertzů. V této oblasti se vyznačují vysokou proudovou zatížitelností s nízkými komutačními ztrátami. PN přechod dokáže pracovat s teplotami až 180°C a bývají v uzavřeném pouzdru, které dokáže efektivně odvádět teplo. [1]

2.9.4. Lavinové diody

Lavinové diody jsou určeny pro nízké spínací kmitočty. Pracovní bod lavinové diody se pohybuje v oblasti průrazného napětí v závěrném směru, které nezpůsobí poškození diody ani při opakujícím se průrazu. Lavinová dioda se používá v zapojení v závěrném směru k zemi a při překročení povoleného napětí se proud svede do země, čímž se ochrání ostatní obvody. Je tedy používána v obvodech jako ochranný prvek proti přepětí. [1]

2.10. Schottkyho diody

Schottkyho diody se používají ve výkonové elektronice z důvodu jejich vlastnosti mít nízké propustné napětí, které umožňuje nižší výkonovou ztrátu než u klasické diody s PN přechodem.

Schottkyho diody měli v minulosti jednu nevýhodu, a to malou napěťovou zatížitelnost. Tato nevýhoda byla částečně odstraněna pomocí schottkyho diod na bázi karbidu křemíku.

Schottkyho dioda navíc umožňuje spínat daleko větší rychlosti. Rozdíl je v tom, že klasická dioda disponuje zotavovacím časem při přechodu z vodivého stavu do nevodivého a naopak. Klasické diody mají zotavovací čas okolo stovek nanosekund, kdežto schottkyho dioda nemá žádný zotavovací čas, protože nemá PN přechod. Spínací čas se tak pohybuje v jednotkách nanosekund. [27]

Výkonová schottkyho dioda se vyrábí tak, že na povrch struktury NN⁺ se napaří příslušný kov a vznikne tak polovodičový kontakt. Struktura NN⁺ se vytváří epitaxní technologií a proud je veden majoritními nosiči. Tyto vlastnosti umožňují, že schottkyho dioda může pracovat ve frekvenčním pásmu od 200kHz do 2MHz, a proto je užitečná ve spínacích napájecích zdrojích, například u tenkých ultrabooků.

V posledních letech se schottkyho diody parametrově zdokonalily a to díky použití nových materiálů, kterými jsou karbid křemíku a nitrid galia. Klasické schottkyho diody na bázi křemíku se dali použít maximálně do několika set voltů. V roce 2011 byly k dispozici již schottkyho diody na bázi karbidu křemíku do 1700V a v současné době, jak již bylo zmíněno, lze pořídit schottkyho diody přes více než 3kV. [27]

3. Tranzistory

Tranzistor je polovodičová součástka používaná ve výkonové elektronice hlavně jako spínač elektrické energie. Je složena z polovodičového materiálu a má obvykle tři vývody pro zapojení do elektrického obvodu. Mezi dvěma vývody prochází hlavní elektrický výkon a třetím vývodem je tranzistor ovládán. Tento 3. vývod je nazýván hradlo.

Základní druhy tranzistorů, které rozeznáváme:

- Biopolární
- Unipolární
- Biopolární s izolovaným hradlem [1]

3.1. Stručná historie součástky

První patent napětím řízeného tranzistoru byl podán v Kanadě a to 22. října 1925 rakousko-uherským fyzikem Juliusem Edgarden Lilienfeldem. Lilienfeld ale bohužel nezveřejnil žádnou detailní zprávu o tranzistoru a tak byla jeho práce patentovacím úřadem ignorována. Až v roce 1934 patentoval tranzistor řízený napětím německý fyzik Dr. Oskar Heil. Do současnosti ale neexistuje žádný důkaz, že takový tranzistor byl ve skutečnosti kdy sestrojen. V minulosti však byly nalezeny dokumenty Bellových laboratoří, které dokazují, že jejich tranzistor byl sestrojen na základě Lilienfeldova patentu.

Klíčem k vývoji tranzistoru bylo pochopení procesu mobility elektronů v polovodiči. Vědcům bylo jasné, že pokud existuje nějaký způsob, jak řídit tok elektronů z emitoru na kolektor, tak by mohl být sestrojen tímto způsobem efektivní zesilovač. 16. prosince 1947 se podařilo Williamu Schokleymu, Johnu Bardennovu a Walteru Brattainovi vyrobit první tranzistor. Za to úspěch byl celý tým oceněn Nobelovou cenou za fyziku, a to pro jejich výzkum polovodičů a za objevení tranzistorového efektu.

Brattain a H. R. Moore předvedli demonstraci fungování tranzistoru v laboratořích Bell Labs odpoledne 23. prosince 1947 několika odběratelům a manažerům. Tento den je často označován

jako datum narození tranzistoru. "PTN bodový kontaktní germaniový tranzistor" fungoval jako hlasový zesilovač.

Z počátku byl tranzistor používán jako samostatná součástka, která ale zabírala hodně místa. V roce 1958 přišli Jack Kilby a Robert Noyce s myšlenkou, že místo spojování mnoho součástek, může být velké množství součástek jednou samostatnou součástkou a tím vznikl první integrovaný obvod. Se zlepšováním technologií výroby tranzistorů se téměř zdvojnásoboval počet součástek na ploše obvodu, a to přesně tak, jak dříve popisoval Gordon Moore.[14]

3.2. Hlavní současní výrobci

Mouser Electronics – www.mouser.com

STMicroelectronics - www.st.com

Toshiba - www.toshiba.semicon-storage.com

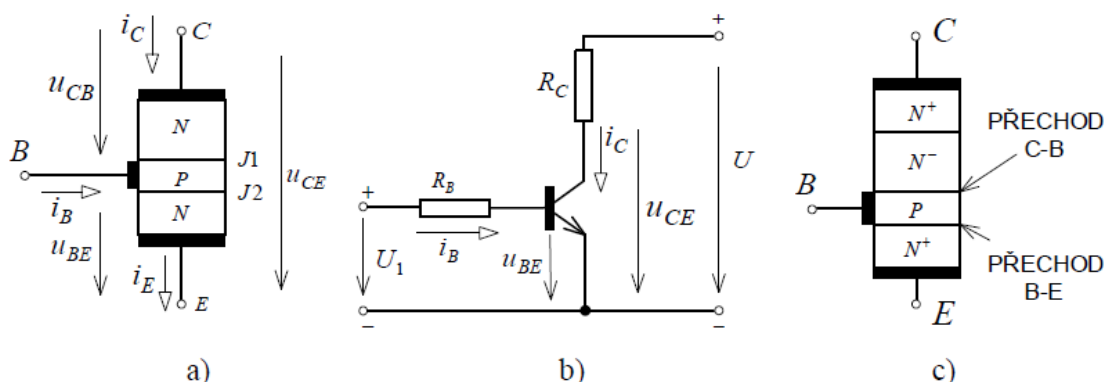
Vishay Intertechnology (Siliconix) - www.vishay.com

Infineon Technologies - www.infineon.com

4. Bipolární tranzistor

4.1. Základní struktura – bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je polovodičová součástka, která obsahuje dva PN přechody. Dle typu přechodů se dělí na NPN nebo PNP tranzistory. Princip vodivosti je podobný jako u diody, kde je proud veden nosiči u typu N elektrony a u typu P dírami. Tranzistor oproti diodě má tři vývody. Výstupními elektrodami jsou kolektor s emitorem a vstupní elektrodou je báze. Pro výkonné aplikace se používají tranzistory typu NPN v zapojení se společným emitorem, kdy je řídicí elektroda zapojena s emitorem viz obrázek č. 7. Podobně jako u diody, aby došlo ke zvýšení napěťové pevnosti tranzistoru, je přidána nízkodotovaná oblast N^- . Oblast N^- má silnější vrstvu a určuje saturační napětí tranzistoru. Vrstva P tvořící bázi tranzistoru má především vliv na jeho dynamické vlastnosti. Ve spínacích aplikacích se tranzistor víceméně nepoužívá, ale jejich použití občas nalezneme u měničů menších výkonů.[8]



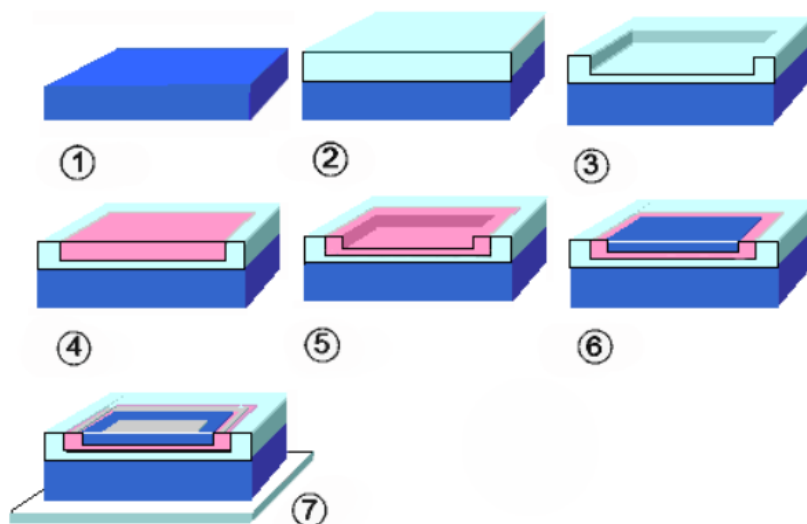
Obr. č. 7 Struktura a princip bipolárního tranzistoru [8]

4.2. Technologie výroby biopolárního tranzistoru

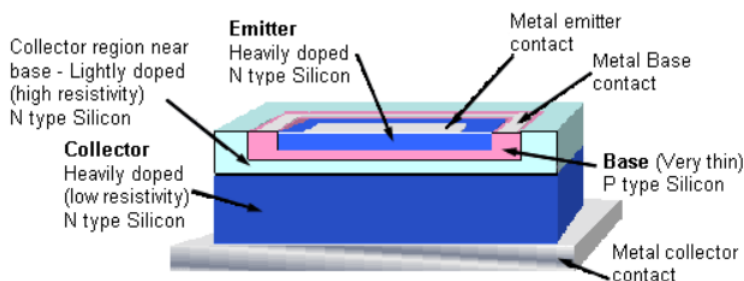
Původní technologií tranzistorů je slévání. Na povrch základní destičky se přiloží maska s otvorem, do kterého se vloží materiál s opačným typem vodivosti, než je báze. Poté se celá část zahřeje a materiály se slijí. V současnosti existuje celá řada technologií pro výrobu tranzistorů, kdy každá metoda má svá specifika a ovlivňuje výsledné vlastnosti tranzistoru. Pro výrobu výkonových tranzistorů je využívána planární metoda výroby.[15]

4.2.1. Planární metoda

Proces výroby pomocí planární metody je zobrazen na obrázku č. 8. Principem této metody je skládání jednotlivých vrstev na křemíkovou destičku, která je vysoce dotovaná (N+). Na základní destičku se nanese další vrstva lehce dotovaného křemíku, která vytvoří N- vrstvu. Z této vrstvy se odleptá část a do odstraněné části je vložena vrstva typu P. Část z této vrstvy se opět odleptá a ponechá se pouze velmi tenká destička, která představuje bázi. Do odstraněné části se vloží vysoce dotovaná N+ vrstva a nakonec se nanesou kovové vrstvy. K těmto vrstvám se přibondují vývody. Konečná struktura tranzistoru vyrobeného pomocí planární metody je zobrazena na obrázku č- 9. [15]



Obr. č. 8 Jednotlivé kroky výroby tranzistoru planární metodou [15]



Obr. č. 9 Struktura tranzistoru vyrobeného planární metodou [15]

4.3. Základní pracovní režimy činnosti

U bipolárního tranzistoru evidujeme čtyři základní pracovní režimy. Tyto rozlišujeme dle polaroty napětí mezi emitorem a kolektorem. Jsou jimi:

1. závěrný režim - stav, při kterém je tranzistor nevodivý a oba přechody polarizovány v závěrném směru,
2. normální aktivní režim – stav, při kterém se nejčastěji tranzistor využívá, kolektorový přechod je v závěrném směru a emitorový přechod v propustném směru,
3. inverzní aktivní režim – stav, při kterém je emitorový přechod polarizován závěrně a kolektorový přechod je polarizován v propustném směru
4. saturační režim - stav, při kterém je kolektorový i emitorový přechod polarizován v propustném směru [1]

4.4. Mezní hodnoty dosahované v současné době

ST tranzistor - BUL742C $U_{CE}=1500$ V $I_C=21$ A

ST tranzistor STP03D200 $U_{CE}=2000$ V $I_C=0,1$ A [16]

5. Unipolární tranzistor

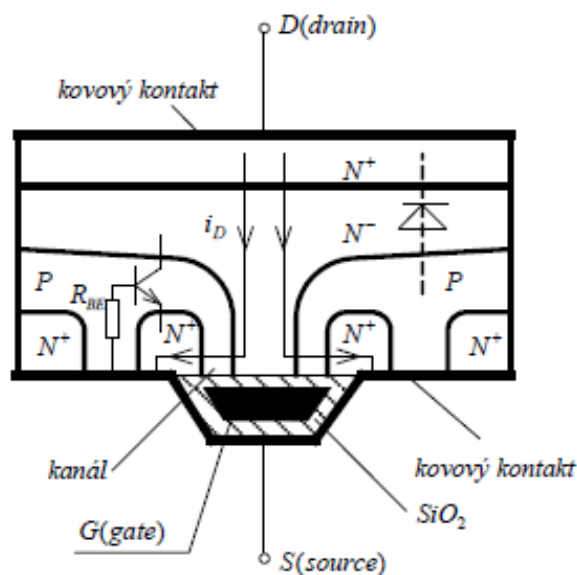
Unipolární výkonové tranzistory hrají důležitou roli v konstrukci výkonových polovodičových měničů. Jejich funkce je známa již od 50. let 19. století, ale ve výkonové technice se začali využívat až v 80. letech, kdy byla potřeba větší spínací rychlosti.

Unipolární tranzistor se liší od bipolárního tranzistoru způsobem řízení vodivosti. Bipolární tranzistor používá k řízení oba typy nosičů a průchozí proud, zatímco unipolární tranzistor využívá jen jeden typ nosičů a jejich vodivost je řízena velikostí elektrického pole. Z tohoto důvodu nese název FET z ang. Field Effect Transistor. [1]

Dle způsobu působení na proudový kanál rozeznáváme dva typy unipolárního tranzistoru:

- J FET tranzistor – Junction Field Effect Transistor – unipolární tranzistory s přechodovým hradlem a
- IG FET- insulatedgate FET – unipolární tranzistor s izolovaným hradlem, nejčastěji SiO_2 známé pod zkratkou MOFSET (Metal Oxide Semiconductor FET) [1]

V současné době se ve výkonových měničích nejvíce používají tranzistory typu MOFSET s kanálem typu N, viz obrázek č. 10. Dotovaná vrstva N^+ je připojena ke kolektoru D (drain) a emitoru S (source). Důležitá je vrstva N^- , která prakticky utváří napěťové vlastnosti tranzistoru. Vrstva P tvoří průchodný kanál mezi kolektorem a emitorem. Přiložíme-li na hradlo G kladné napětí, tak se začne náboj hromadit na straně oxidu v blízkosti rozhraní oxid - polovodič. Velikost náboje závisí na přiloženém napětí a je-li tento dostatečně velký, tak dochází k vytvoření kanálu typu N, který umožňuje vést proud z kolektoru k emitoru. Velikost odporu kanálu je možné řídit velikostí napětí na řídicí elektrodě.[8]



Obr. č. 10 – Základní struktura tranzistoru typu MOFSET [8]

5.1. Technologie výroby

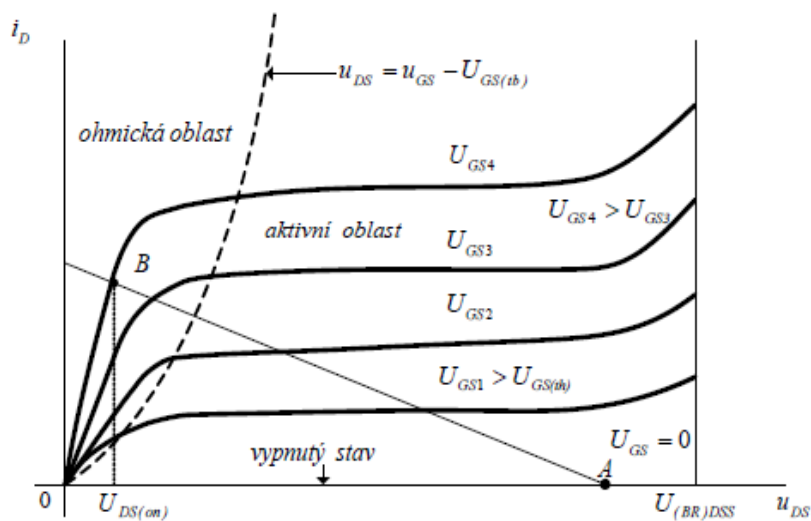
I když princip unipolárního tranzistoru byl znám od 20. let 20. století, tak zatím neexistoval účelný způsob jeho výroby. Jeho rozšíření pomohla litografie, která představovala relativně cenově dostupný způsob výroby. Litografie umožnila vytvářet na monokrystalu křemíku jednotlivé vrstvy oxidů (nitridů), které tvořili masku a umožňovaly leptat obraz potřebných struktur a vkládat dotovaný křemík, čímž docházelo k vytvoření polovodičové struktury.

Výroba tranzistorové struktury na křemíkovém monokrystalu se dá zjednodušeně rozdělit do několika kroků:

- vymezení jednotlivých oblastí tranzistoru,
- vytvoření hradla z dotovaného křemíku,
- vytvoření dotované oblasti elektrod S a D pomocí difúze a odkrytí jednotlivých míst pro kontakty jednotlivých elektrod,
- pokrytí tranzistoru vrstvou kovu a leptáním propojit jednotlivé prvky [17]

5.2. Základní statické parametry

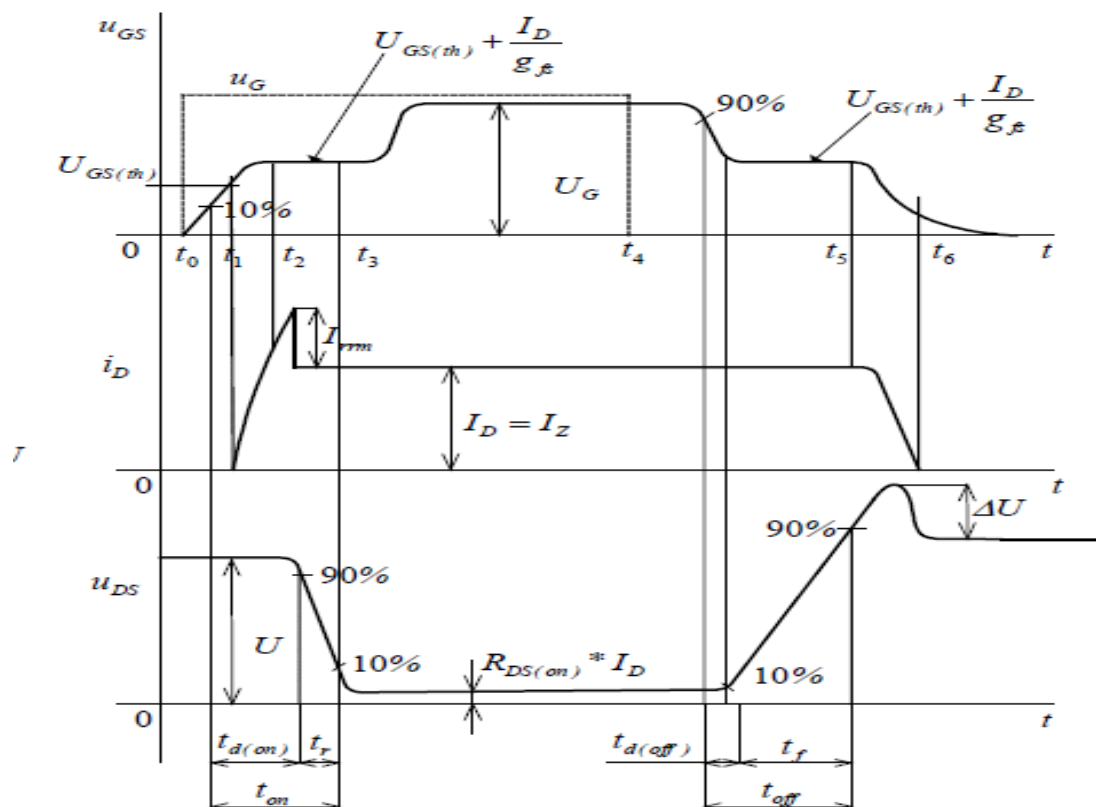
Základní statické parametry jsou popsány níže uvedeným obrázkem, kde je zobrazena voltampérová charakteristika MOFSETu. V závislosti na velikosti napětí na elektrodě G je zobrazen průchod proudu kolektorem i_D . Pokud je napětí na U_g rovno nule, tak tranzistorem neprochází žádný proud a jeho odpor mezi elektrodami S a D je roven téměř nekonečnu a zároveň nedochází k propuštění proudu do průrazné hodnoty napětí U_{DDS} . Při zvyšování napětí U_g přechází tranzistor do vodivého stavu a úbytek napětí na tranzistoru se rovná $U_{DS} = R_{DS} \times I_D$. Kde R_{DS} je odpor tranzistoru, který dosahuje hodnot řádově desetin ohmu. Snahou výrobců je tento odpor co nejvíce snižovat. [8]



Obr. č. 11 – Výstupní charakteristika MOFSETu [8]

5.3. Dynamické parametry

Poměry při spínání obvodu jsou naznačeny na obrázku č. 12. Z tohoto obrázku je patrné, jak jsou definovány zapínací čas - t_{on} a vypínací čas - t_{off} a další parametry jako je: doba zpoždění při zapnutí $t_{d(on)}$, doba nárůstu t_r , doba přesahu $t_{d(off)}$ a doba poklesu t_f . Dynamické vlastnosti jsou dané strukturou MOFSETu, kdy jednou z nejvýznamnějších charakteristik je také parazitní kapacita. Při připojení tranzistoru do obvodu se nejdříve nabije vstupní kapacita a nějaký čas trvá, než napětí dosáhne prahové hodnoty $U_{GS(th)}$. Dynamické vlastnosti unipolárního tranzistoru jsou v porovnání s bipolárním tranzistorem lepší. Zapínací a vypínací doba je menší než několik mikrosekund a výhodou je také daleko menší ztrátový výkon.



Obr. č 12. – Časová charakteristika při zapnutí a vypnutí MOFSETu [8]

5.4. Provozní parametry

Mezi nejdůležitější parametry unipolárního tranzistoru patří napěťová a proudová zatížitelnost. Napěťová zatížitelnost je parametr, který udává maximální možné napětí U_{DS} . Maximální hodnoty napěťové zatížitelnosti lze docílit pouze na úkor proudové zatížitelnosti. Proudová zatížitelnost je parametr, který popisuje trvalý maximální přípustný kolektorový proud I_D , který je v katalogích výrobců udáván společně s teplotou pouzdra T_C a s příslušným napětím.[1]

5.5. Mezní hodnoty dosahované v současné době

MOFSET IXTL2N470 $V=4700, I=2A$

IXYS IXTL2N450HV $V_{DSS} = 4500 V I_{Ds}=3A$

MOFSET IXTX20N150 $V=1500V, I=20A$

IXYS IXTN660N04T4 $V_{DSS} = 40 V I_{Ds}=660A$ [18]

5.6. Typické použití

Výkonový MOSFET má široké využití ve spínacích aplikacích, a to zvláště ve výkonových zdrojích jako jsou měniče nebo kontroléry pro nízkonapěťové motory. Výhodou výkonových MOFSETů je, že mají velmi nízké ztráty v sepnutém stavu, což pomáhá zvyšovat účinnost ve spínacích aplikacích.

6. Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem

Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem je označován jako IGBT tranzistor, což je zkratka z anglického názvu insulated gate bipolar transistor. IGBT tranzistor v sobě kombinuje bipolární tranzistor i tranzistor s izolovaným hradlem. Jedná se o součástku výkonové elektroniky, která kombinuje výhody bipolárního (vyšší proudová zatížitelnost) a MOSFET (vysoké výkonové zesílení, dobré kmitočtové spínací charakteristiky, napěťové řízení) tranzistoru. [6]

6.1. Stručná historie součástky

Izolovaný bipolární tranzistor (IGBT) byl vyvinut na základě potřeby odstranit nedostatky bipolárního tranzistoru a IG FETu. Princip IGBT tranzistoru byl popsán v patentu, který podal Yamagami v roce 1968. Je nutné však podotknout, že první IGBT tranzistor vznikl až v 80. letech.

Jedním z hlavních nedostatků bipolárního výkonového tranzistoru bylo jeho nízké proudové zesílení, i přesto že byl navržen pro vysoko napěťové aplikace. Pro tyto aplikace bylo zároveň potřeba tranzistor zvětšit tak, že nakonec se stal z hlediska velikosti a s tím souvisejících nákladů nepraktický pro tyto aplikace. Bipolární tranzistor navíc vyžadoval vyrovnávací obvod, aby se charakteristika pohybovala v jeho pásmu bezpečného zatížení.

IGBT představoval kombinaci výkonového MOSFETu a bipolárního tranzistoru v jednom. Signál na svorku Gate, byl navržen stejně jako ve struktuře MOFSETu, což poskytovalo výhodu kompaktnosti, nízkých nákladů a umožnil lehce složit obvod s vysokou vstupní impedancí a napětím řízeným přechodem.

V posledních letech se IGBT tranzistory používají pro většinu výkonových elektronických aplikací, a to zejména pro středně velké a vysokoenergetické zařízení jako jsou frekvenční měniče pohonů, záložní zdroje UPS, v aplikacích pro obnovitelné energie a v mnoha dalších aplikacích. V poslední desetiletí hraje IGBT stále významnější úlohu v řízení výkonové elektroniky.[20]

6.2. Hlavní současní výrobci

ABB Group - <https://new.abb.com/>

DANFOS - <https://www.danfoss.com>

HITACHI - <http://pdd.hitachi.eu>

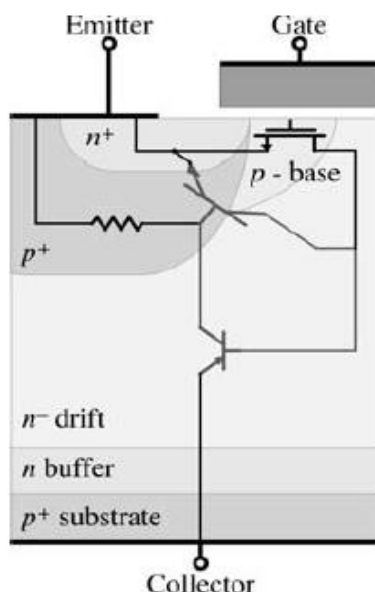
Mitsubishi Electric - <http://www.mitsubishielectric.com>

Vincotech - <https://www.vincotech.com/>

6.3. Základní struktura

Na obrázku č. 13 je zobrazen řez jednotlivých buněk N-kanálového IGBT tranzistoru, který má podobnou strukturu jako výkonový MOSFET s výjimkou P vrstvy ve spodní části. Tato vrstva tvoří kolektor tranzistoru IGBT a PN přechod s N driftovou oblastí, kde dochází k vodivosti pomocí minoritních vodičů. Šířka driftovací oblasti je podobná jako u MOSFETu a díky tomu je IGBT schopen vydržet větší napětí. P oblast, N driftovací oblast a P oblast u emitoru je shodná s principem bipolárního tranzistoru. Proto také může být proudová hustota daleko větší než u MOSFETu a pokles napětí na IGBT je daleko menší. Princip PNP oblasti je tedy stejný jako u bipolárního tranzistoru a zároveň je řízen přiváděným napětím na konektor G jako u MOSFETu.

Pro jednodušší vysvětlení principu fungování IGBT tranzistoru se předpokládá, že konektor emitoru je připojen k zemnímu potenciálu. Přivedením záporného napětí na kolektor je přechod PN zapojen v závěrném směru, což zabraňuje jakémukoliv průtoku proudu a celý tranzistor je v závěrném směru. Pokud je na kolektoru kladné napětí a na konektoru G nulové napětí, tak je tranzistor uzavřený. Pokud přivedeme na G kladné napětí, které překročí prahové napětí, vytvoří se N kanál, který zajišťuje průchod driftovací oblasti. Přechod P a N je v tomto směru otevřen a může jimi procházet proud mezi emitorem a kolektorem.[6]



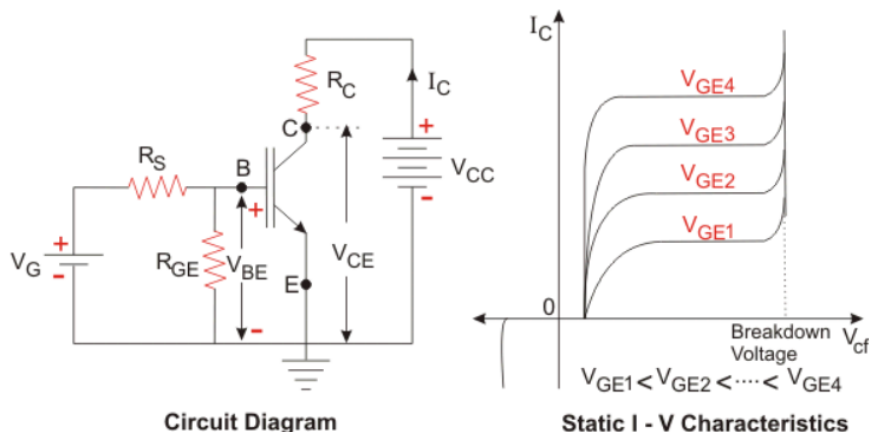
Obr. č. 13 Struktura IGBT tranzistoru [6]

6.4. Technologie výroby

Technologie výroby je podobná jako u všech složitějších polovodičových součástek, kdy se na základní destičku dotovanou na potřebný typ polovodiče nanáší jednotlivé vrstvy, které se zakryjí, vyleptá se místo pro druhý typ polovodiče a to se opakuje až do doby, kdy se poskládá konečná struktura součástky a následuje pokovení částí, ke kterým se přibondují jednotlivé vývody.

6.5. Statické parametry

Níže uvedený obrázek ukazuje statickou V-I charakteristiku IGBT tranzistoru s vyznačenými parametry. Graf je velmi podobný V-I charakteristice bipolárního tranzistoru s rozdílem, že napětí V_{GE} je v určitém rozmezí konstantní, protože IGBT je na rozdíl od bipolárního tranzistoru řízen napětím. Vypnutím V_{GE} dojde k přerušení průchodnosti tranzistoru. V opačném směru je tranzistor v nepropustném stavu.[6]



Obr. č. 14 – Statická charakteristika IGBT [6]

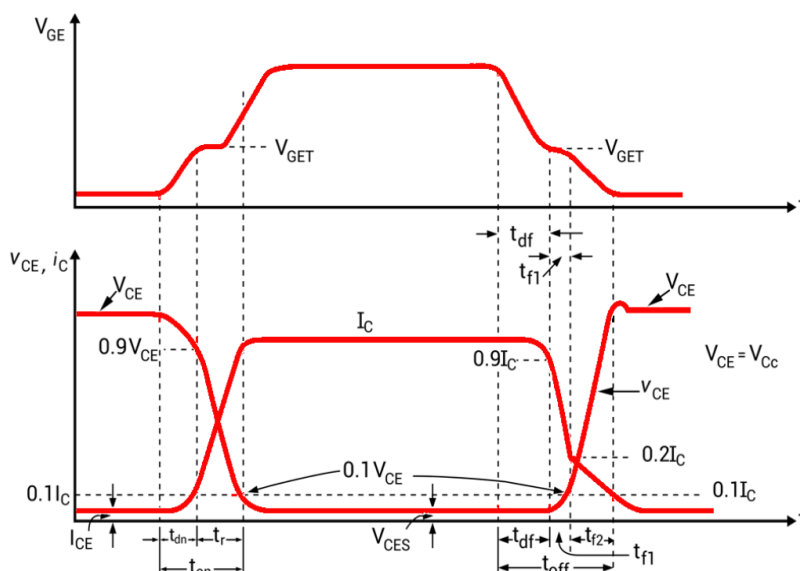
6.6. Dynamické parametry

Zapínací čas t_{on} se skládá ze dvou složek - zpoždění t_{dn} a náběhový čas t_r . Zpoždění je definováno jako čas, který se zvyšuje od saturačního proudu I_{CE} k $0,1 I_C$ (konečný kolektorový proud) a nakonec dojde k tomu, že napětí mezi kolektorem a emitorem se zmenší o 10%. Náběhový čas je definován tak, že kolektorový proud I_C naběhne od $0,1 I_C$ k plné hodnotě a napětí mezi emitorem a kolektorem spadne na $0,1 V_{CE}$.

$$t_{on} = t_{dn} + t_r$$

Vypínací čas t_{off} se skládá ze tří složek - zpoždění t_{df} , počátek klesání t_{f1} , a konečné klesnutí t_{f2} . Zpoždění definuje klesnutí kolektorového proudu od 10 % a začátek změny napětí mezi emitorem a kolektorem V_{CE} . Počáteční klesání je definováno jako zmenšení protékaného proudu k $0,9 I_C$ a tím, že napětí mezi kolektorem a emitorem je $0,1 V_{CE}$. Konečné klesnutí je definováno jako změna protékaného proudu k 10 % I_C , kdy napětí V_{CE} se zvýší na konečnou hodnotu V_{CE} . [6]

$$t_{off} = t_{df} + t_{f1} + t_{f2}$$



Obr. č. 15 – Spínací charakteristika IGBT [6]

6.7. Mezní hodnoty dosahované v současné době

ABB 5SNA 1000G650300 ABB 6500V/1000A

ABB 5SNA 3600E170300 1700/3600A [13]

Infineon DD750S65K36500V/750A

Infineon FZ1200R45HL3 4500V/1200A [21]

6.8. Typické použití

IGBT má celou řadu použití. Používá se v elektrických pohonech jako usměrňovač nebo jako střídač. Z tohoto důvodu ho najdeme v elektrických lokomotivách, tramvajích nebo trolejbusích. Dále se používá ve zdrojích elektrického proudu jako střídač, usměrňovač nebo v pulsních měničích. IGBT jsou vhodné v aplikacích, která vyžadují propouštění velkého proudu a blokování vysokého závěrného napětí.

7. Tyristor

Tyristor je čtyřvrstvá řízená polovodičová součástka, která má 3 PN přechody a 3 elektrody: G – Gate, A- Anoda, K - Katoda. Tyristor nemá usměrňovací účinky jako dioda, ale lze ho ovládat pomocí impulsů elektrodou G. Používá se k řízení výkonu.[8]

7.1. Stručná historie součástky

V roce 1921 modifikovali inženýři ze společnosti General Electric elektrickou výbojku s inertním plynem, kterou nazvaly tyatron. Ten obsahoval dvě mřížky a při kladném jmenovitém napětí došlo k zapálení oblouku mezi katodou a anodou. Tento oblouk byl schopen vést proud. Rozdíl od elektronky byl takový, že tyatron nemohl zesilovat signál, ale používal se pouze jako spínač a řízený usměrňovač. V roce 1957 další inženýři z General Electric vyvinuli silikonový řízený usměrňovač, kterému později dali obchodní název tyristor. Protože se tento název velice rychle rozšířil, tak byl v roce 1963 přijat organizací IEEE jako oficiální název této součástky.[23]

7.2. Hlavní současní výrobci

Vishay – www.vishay.com

ABB Group – www.abb.com

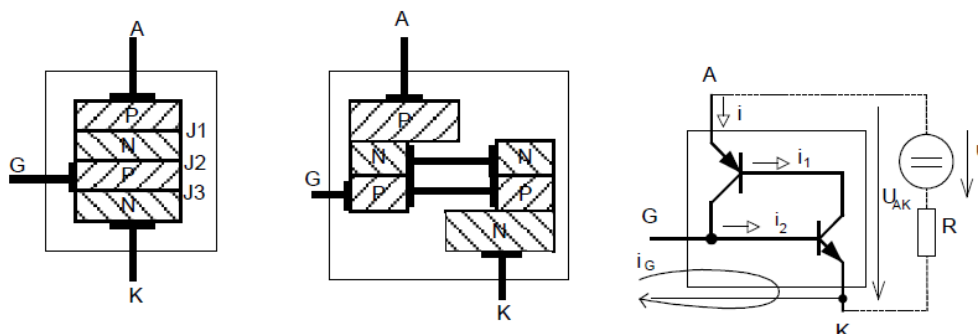
Electronicon – www.electronicon.com

7.3. Základní struktura

Struktura tyristoru je zobrazena na obrázku č. 16. Tyristor má, jak již bylo dříve zmíněno, tři PN přechody a tři konektory. Jedná se o anodu, katodu a hradlo G. Na obrázku je zobrazena struktura PNP, ale je nutné podotknout, že stejně tak existuje tyristor o struktuře NPN, jejíž použití není tak časté.

Tyristor má dva základní stavy - sepnuto a vypnuto. Pro řízení tyristoru je nejdůležitější struktura J3, která je zobrazena na obrázku 16. Tato struktura je stejná jako struktura NPN tranzistoru. Pokud je uvedena do vodivosti, tak dojde k sepnutí celé struktury. V případě, že je nevodivá, tak je tyristor v blokovacím stavu.

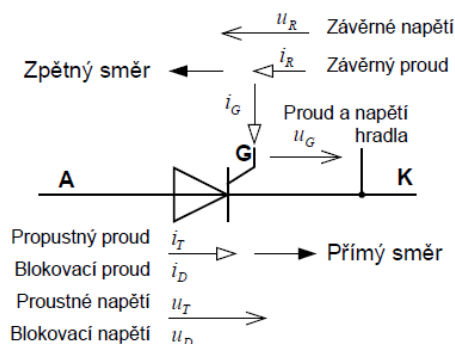
Pokud je závěrné napětí $U_{AK} < 0$, tak se nachází tyristor, především díky struktuře J1, v závěrném stavu. Stejně jím ale prochází malý závěrný proud.[8]



Obr. č. 16 – Schéma a struktura tyristoru [8]

Přivedeme-li proud do obvodu G-K tyristoru, tak přejde tyristor z blokovacího stavu do stavu sepnutého a podobně jako u tranzistoru je umožněn průchodu proudem obvodem???? NECHÁPU. Přestože proud poté I_G zanikne, tak je tyristor stále v zapnutém stavu. Vysvětlení je naznačeno v náhradním schématu tranzistoru na obrázku níže. Tento stav je dán tím, že tranzistory NPN a PNP se průchodem proudem navzájem udržují v sepnutém stavu. Stačí tedy jen krátký impuls k zapnutí tranzistoru. V případě sepnutého stavu je na tranzistoru malý úbytek napětí dle jeho parametrů.

Na obrázku č. 17 je zobrazena orientace tyristoru. Je-li na anodě kladné napětí vůči katodě, nachází se tyristor v blokovacím stavu. Je-li napětí opačné, nachází se tyristor v závěrném směru. [8]



Obr. č. 17 – Schématická značka tyristoru [8]

Vypnout tyristor nelze pomocí řídicí elektrody, ale vypnutí nastane až po zániku propustného proudy, kdy má tyristor opět blokovací schopnost.

7.4. Technologie výroby

Tyristor se skládá ze čtyř polovodičových vrstev. Jako většina složitější polovodičových součástek lze ho vyrobit pomocí planární technologie. Ta se využívá u tyristorů pro aplikace vhodné pro menší napětí. Pro vysoko výkonové tyristory se spíše používá technologie skládání vrstev, kdy vnitřní přechody jsou vytvořeny pomocí difuze a dva vnější přechody vytvořeny pomocí technologie slinování. Ke krajním vrstvám jsou připevněny wolframové nebo molybdenové destičky, které poskytují větší mechanickou pevnost. Jedna z těchto desek je napájena s měděným vývodem, který má na sobě závit pro připojení chlazení. [23]

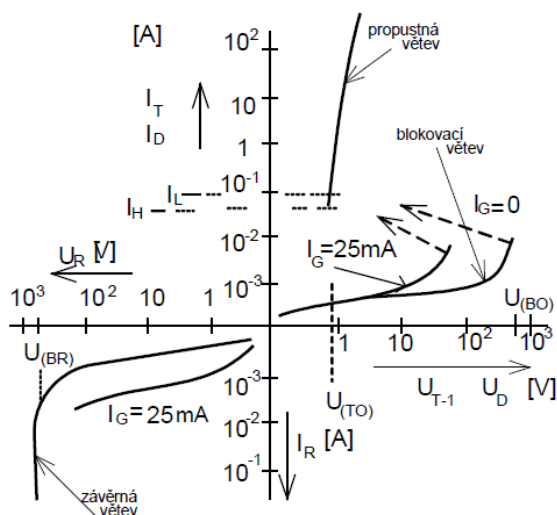
7.5. Základní pracovní režimy činnosti

Tyristor má dva základní pracovní režimy, kdy buď je sepnut a prochází jím proud nebo je vypnut a v tomto stavu blokuje průchod proudem. Sepnutí se realizuje zapnutím tyristoru pomocí řídicí elektrody. Na anodě je kladné napětí oproti katodě a v daném čase dojde k impulsu na řídicí elektrodu a tyristor se sepne.

Pokud procházející proud klesne pod hranici vratného proudu, tak se tyristor vypne. Pokud je na anodě kladné napětí oproti katodě, tak je tyristor v blokovacím režimu. V případě otočení polarity je tyristor v závěrném režimu. Při vypínání tyristoru do závěrného směru stačí zánik proudu, podobně jako u diody. Při vypínání tyristoru do blokovacího režimu je potřeba po zániku proudu nechat tyristor bez proudu nějakou dobu než si obnoví blokovací schopnost. [1]

7.6. Základní statické a dynamické parametry

Výstupní charakteristika tyristoru je zobrazena na obrázku č. 18 a vztahuje se k výstupním elektrodám - anodě a katodě. Příklad výstupní charakteristiky je zobrazen na obrázku. Výstupní charakteristika má tři základní větve - závěrnou, blokovací a propustnou. Závěrná větev odpovídá tyristoru v závěrném režimu a kopíruje tvar charakteristiky diody v závěrném směru. Blokovací větev popisuje stav, kdy je tyristor v blokovacím režimu při $I_G=0$ a při překročení U_{BO} nedochází k průrazu, ale k zapnutí tyristoru. Tento způsob zapínání se nedoporučuje. Propustná větev popisuje stav, kdy je tyristor ve stavu sepnuto. Napětí U_{TO} představuje prahové napětí tyristoru. Propustná větev nezačíná od nuly, ale teprve až od hodnoty vratného proudu I_H . Vratný proud je minimální proud tyristoru, který udrží tyristor ve stavu sepnuto. Při jeho klesnutí je otevřen tyristor jen v blokovacím stavu. V případě zaniknutí proudu I_G , pokud chceme, aby zůstal tyristor ve stavu sepnuto, tak musí být proud na minimální hodnotě přídržného proudu I_D . [1]



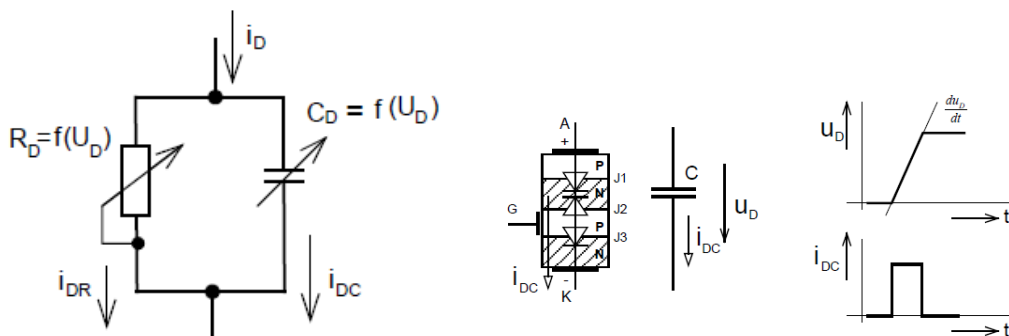
Obr. č. 18 – Statická výstupní VA charakteristika tyristoru [1]

7.7. Dynamické parametry

Dynamické vlastnosti tyristoru mají význam při připojení blokovacího napětí, zapnutí a vypnutí. Připojení blokovacího napětí je zobrazeno v náhradním schématu na obrázku níže. Odpor R_D v blokovacím režimu představuje průchod zbytkového proudu. Nelineární kapacita C_D , která je především tvořena N vrstvou mezi J1 a J2, představuje riziko nežádoucího sepnutí

tyristoru. Z tohoto důvodu se definuje tzv. dovolená strmost nárůstu napětí S_{Ukrit} , která se vypočte dle vzorce uvedeného níže. [8]

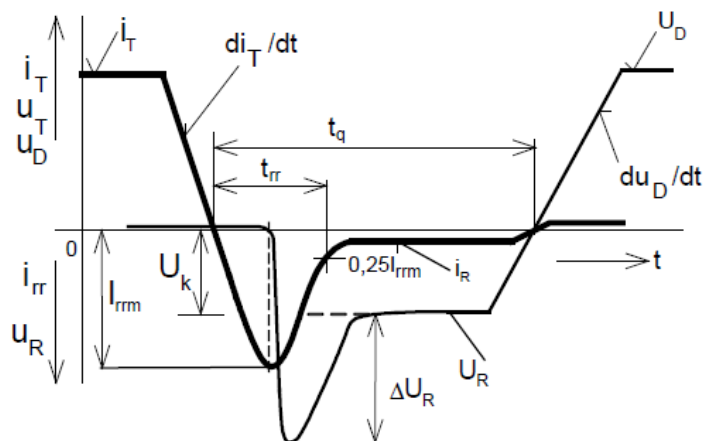
$$S_{Ukrit} = \left(\frac{du_D}{dt} \right)_{krit}$$



Obr. č. 19 Náhradní schéma a vznik kapacitního proudu při změně polarity napětí [8]

Zapínací čas t_{gt} se skládá ze dvou časů, které jsou definovány jako doba zpoždění a doba poklesu. Doba zpoždění t_D je doba, při které se vytváří proudový kanál, který vzniká v blízkosti řídicí elektrody. Doba poklesu t_P je čas, při kterém poklesne anodové napětí na 10 % své hodnoty a jedná se o čas šíření vodivosti v tyristoru.[8]

Vypnutí tyristoru lze jen po odčerpání vodivosti z polovodičové struktury a pouze pomocí vnějšího obvodu připojeného k anodě a katodě. Charakteristika vypnutí tyristoru je zobrazena na obrázku č. 19. Pro obnovení závěrné funkce je definována tzv. zotavovací doba t_{tt} . Obnovení blokovací struktury je definováno jako vypínací čas t_q , který představuje dobu mezi průchodem propustného proudu nulou a okamžikem, kdy má tyristor opět blokovací schopnost.[8]



Obr. č. 19 Charakteristika vypínání tyristoru [8]

7.8. Mezní hodnoty dosahované v současné době

ABB 5STP 45Y8500 U_{RRM} až 8500V při $I_{F(AV)} = 4240A$

MITSUBISHI FT1500AU-240 U_{RRM} až 12000V při $I_{F(AV)} = 1500A$ [24], [13]

7.9. Typické použití

Tyristory se používají nejvíce v zařízeních, kde je potřeba kontrolovat vysoký výkon a kde se požaduje vysoké napětí. Tyristor je tak hodně rozšířený ve vysokonapěťových zařízeních se střídavých napětí jako například ovládání světel, výkonové regulátory nebo kontroléry pro motory. Tyristor se používá jako vysoko výkonový usměrňovač střídavého napětí ve stejnosměrných přenosech. Dále jsou používány ve svářecích zdrojích a v dalších spínaných zařízeních.

8. Vypínací tyristor

Vypínací tyristor je součástka, která na rozdíl od klasického tyristoru má možnost ovládání přechodu z propustného do blokovacího režimu pomocí řídicí elektrody. Vypínací tyristor má, jako klasický tyristor, hradlo a sepnutí probíhá také stejným způsobem. Je zde pouze navíc možnost vypnutí pomocí opačného signálu, než je použit při sepnutí.[1]

Z hlediska typu můžeme vypínací tyristory rozdělit na symetrické a asymetrické. Symetrický typ vypínacího tyristoru má velikost závěrného napětí a blokovacího napětí stejnou, kdežto asymetrický typ má v závěrném směru mnohem menší napěťovou zatížitelnost, ale jejich výhodou je, že mají o 30-50% menší vypínací dobu. [1]

8.1. Hlavní současní výrobci

ABB Group www.abb.cz

Dynex www.dynexsemi.com

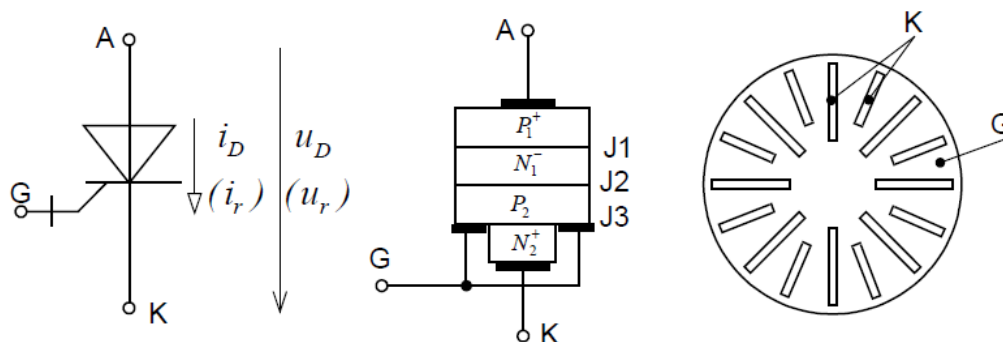
IXYS www.westcode.com

EUPEC www.eupec.com

Mitsubishi Semiconductor <http://www.mitsubishichips.com/>

8.2. Základní struktura

Struktura vypínacího tyristoru je zobrazena na obrázku č. 8. Základní struktura je shodná s klasickými tyristory. Princip zapnutí je také podobný, ale vypínací tyristor má složitější plošné členění vrstev, které tvoří přechod J3. Řídicí elektroda je rozprostřena v celém průřezu tyristoru, a díky tomu lze pomocí proudového impulsu do hradla tyristor vypnout. Tento impuls má opačný smysl než zapínací impuls a je několikanásobně větší.



Obr. č. 20 Značka, struktura a uspořádání řídicí elektrody v GTO [8]

8.3. Technologie výroby

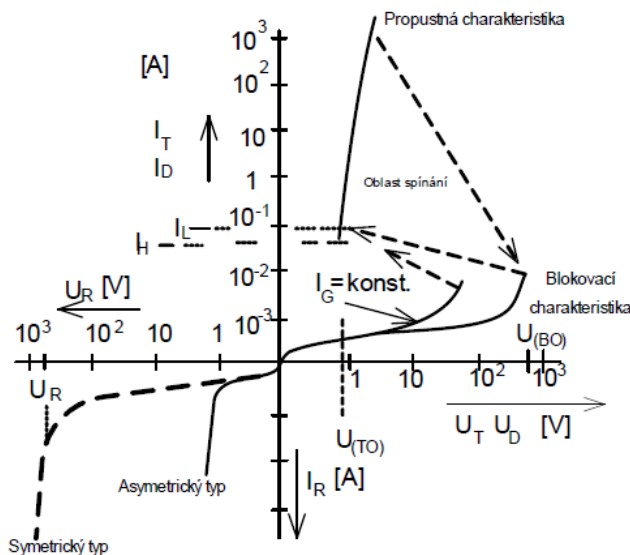
Technologie výroby je velmi podobná výrobě klasického tyristoru. Je však o něco komplikovanější, protože řídicí elektroda musí být rozprostřená v celém průřezu.

8.4. Základní pracovní režimy činnosti

Pracovní režimy jsou stejně jako u klasického tyristoru tři, tzn. propustný, závěrný a blokovací stav.[1]

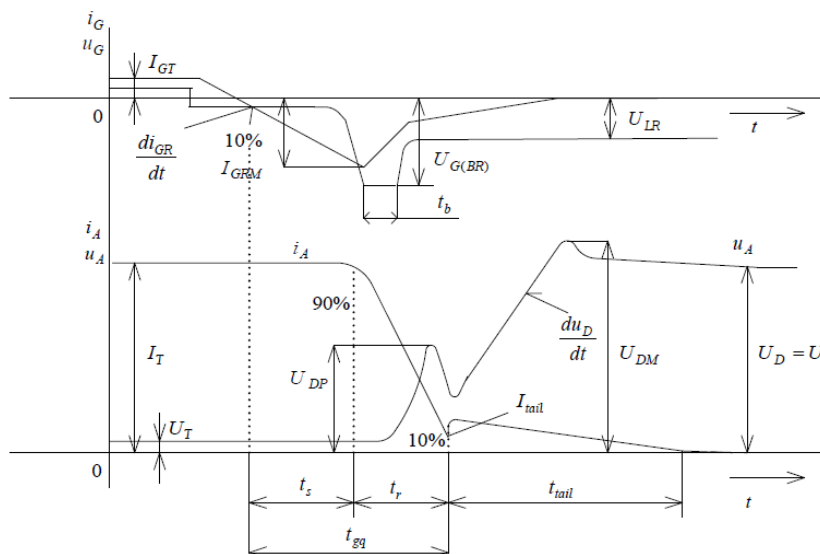
8.5. Základní statické a dynamické parametry

Statická voltampérová charakteristika vypínacího tyristoru je zobrazena na obrázku č. 21. V-A charakteristika rozlišuje symetrický a asymetrický typ vypínacího tyristoru. Tato charakteristika je obdobná jako u klasického tyristoru. [1]



Obr. č. 21 Statická charakteristika GTO tyristoru

Při vypínání GTO tyristoru narůstá nejprve hradlový impuls I_G . Poté nastává doba přesahu t_s , kdy začne propustný proud klesat a poté následuje rychlejší pokles v čase t_r . Celková doba vypínání představuje čas t_{gq} . [8]



Obr. č. 22 Průběh napětí a proudu při vypnutí GTO [8]

8.6. Mezní hodnoty dosahované v současné době

Asymetrické tyristory:

ABB 5SGA 40L4501 $V_{DRM} = 4500$ V. $I_{TGQM} = 4000$

Mitsubishi FG4000GX-90DA $V_{DRM} = 4500$ V. $I_{TGQM} = 4000$ [24], [13]

Symetrické tyristory:

ABB 5SGS 16H4500 $V_{DRM} = 4500$ V. $I_{TGQM} = 1600$

IXYS S1000NC36D $V_{DRM} = 3600$ V. $I_{TGQM} = 1000$ [13], [26]

8.7. Typické použití

Výhodou GTO tyristoru jsou jeho excelentní spínací charakteristiky, a proto má tento tyristor dominantní postavení v mnoha aplikacích. Jedná se především o frekvenční měniče, regulátory stejnosměrných motorů, stabilizační zdroje nebo aplikacích indukčního ohřevu.

9. Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou

Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou je polovodičová součástka známá pod zkratkou IGCT tyristor z anglického názvu Integrated gate commuted thyristor. IGCT tyristor vychází z podstaty GTO tyristoru a je mu velmi podobný. Umožňuje stejně jako GTO tyristor spínat a vypínat proud pomocí elektrody Gate. Rozdíl oproti GTO tyristoru je v tom, že IGCT tyristor má v sobě již zabudovanou řídicí elektroniku. Tato elektronika je umístěná, co nejbližší k samotné součástce a díky tomu má daleko menší indukčnost než klasický GTO. Z tohoto důvodu je schopná se vypínat až 5krát rychleji než GTO tyristor. Protože IGCT je navržen pro výkonové měniče do výkonů stovek MW, kde i malá parazitní indukčnost má takovou velikost, že strmost proudu je tak velká, že její špičky vypínání je potřeba omezit zachycovacím obvodem.

9.1. Stručná historie součástky

Tyristor IGCT byl vyvinut společně společnostmi Mitsubishi a ABB v roce 1993. První výrobek byl uveden na trh až v roce 1997 společností ABB.

9.2. Hlavní současní výrobci

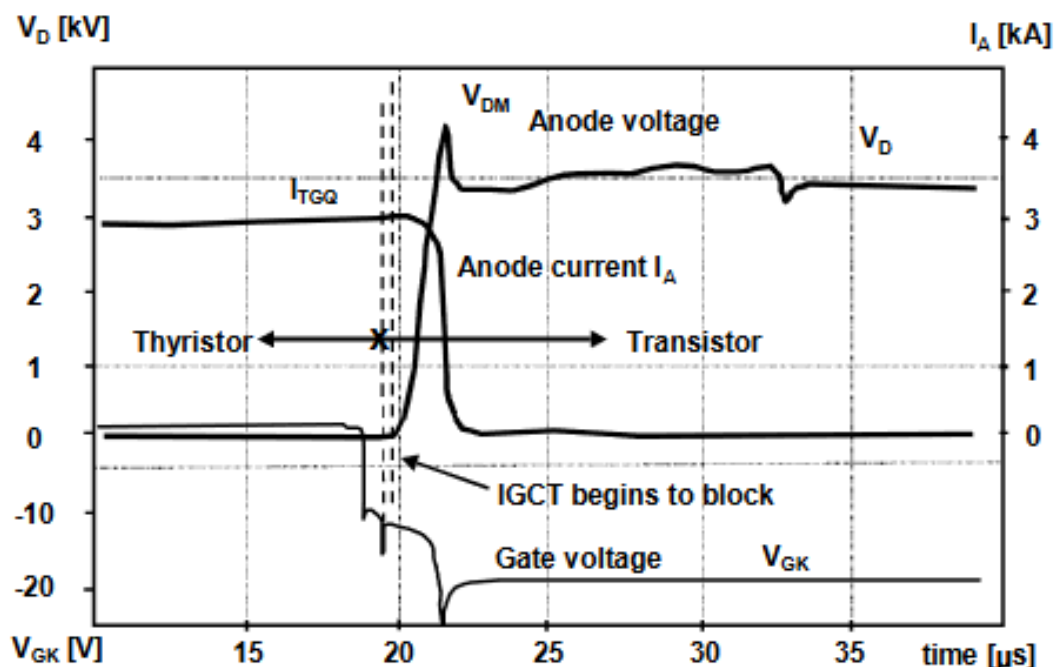
ABB Group www.abb.cz

Infineon <https://www.infineon.com/>

9.3. Základní struktura

Struktura IGCT a GTO se v podstatě neodlišuje. IGCT tyristor je také jako GTO tvořen dvěma PN přechody, rozdíl je však v tom, že se vypínací proud I_{RG} zvyšuje tak rychle, že než se stačí změnit rozložení nábojů v jednotlivých přechodech tyristoru, tak anodový proud I_A přechází do řídicí elektrody G a vypnutí je převedeno do horní PNP struktury. Jinak řečeno extrémní strmost nárůstu řídicího vypínacího proudu di_{RG}/dt způsobí, že vypínaná tyristorová struktura IGCT je nejdříve převedena na tranzistorovou strukturu ($P_1N_1P_2$) a poté následuje vypnutí tranzistoru, jak je zobrazeno na obrázku č. 21.

Výhodou struktury IGCT oproti GTO je to, že je vyloučena tzv. filamentace a problémy s ní spojené, není omezena strmost nárůstu blokovacího napětí (parametr dV_D/dt), není zapotřebí odlehčovacího kondenzátoru, jsou zmenšeny vypínací ztráty a je také zkrácena vypínací doba. Součástka IGCT slučuje hlavní výhodu tyristoru, kterou je malý propustný úbytek, a výhodu tranzistoru, kterou je výhodný způsob spínání. [28]



Obrázek č. 21 – Vypínání IGCT tyristoru [29]

9.4. Statické a dynamické parametry

Mezi základní parametry této součástky patří maximální vypínatelný proud I_{TGQM} a blokovací napětí V_{DRM} . Protože IGCT je určen pro aplikace s rychlým spínáním, je důležitým parametrem také doba vypnutí a zapnutí. Oproti klasickým GTO tyristorům je IGCT až 5 krát rychlejší. Má také další parametry, které představují výhodu oproti GTO např. již zmíněný nízký propustný úbytek anebo rychlost nárůstu blokovacího napětí.

9.5. Mezní hodnoty dosahované v současné době

Asymetrické IGCT

ABB 5SHY 42L6500 $V_{DRM}=6500$ V. $I_{TGQM}=3800$ A

Infineon D1131SH65T $V_{DRM}=4500$ V. $I_{TGQM}=4780$ A [13], [26]

Zpětně propustné IGCT

ABB 5SHX 19L6020 $V_{DRM}=5500$ V. $I_{TGQM}=1800$ A

ABB 5SHX 26L4520 $V_{DRM}=4500$ V. $I_{TGQM}=2200$ A [13]

9.6. Typické použití

IGCT tyristor je navrhnut pro výkonové spínací aplikace, proto se často používá v řízených usměrňovačích a střídavých měničích napětí hlavně ve vyšších spínacích frekvencích než GTO tyristor. Dále se často používají v aplikacích obnovitelných zdrojů, jako jsou měniče větrných elektráren nebo bateriové úložné systémy energie. [28]

10. Triak

Triak je polovodičová spínací součástka, která je schopná vést proud oběma směry. Její název je zkratka z anglického názvu Triode Alternating Currentswitch. Triak vznikla spojením protisobě zapojeným spínacích tyristorů. Ovládání tyristoru se provádí pomocí hradla, ale tím lze triak pouze zapnout.[6]

10.1. Stručná historie součástky

První Triak součástka byla sestavena jako dva tyristory, které byly připojeny paralelně s jedním konektorem GATE, který je spojoval dohromady. To vedlo k tomu, že vznikla nová součástka, která byla schopna spínat vedení proudu v obou směrech. Triak byl vyvinut v laboratořích firmy General Electric panem Gutzwillem a jeho kolegou Gentry.[25]

10.2. Hlavní současní výrobci

Motorola www.motorola.com

Mouser cz.mouser.com

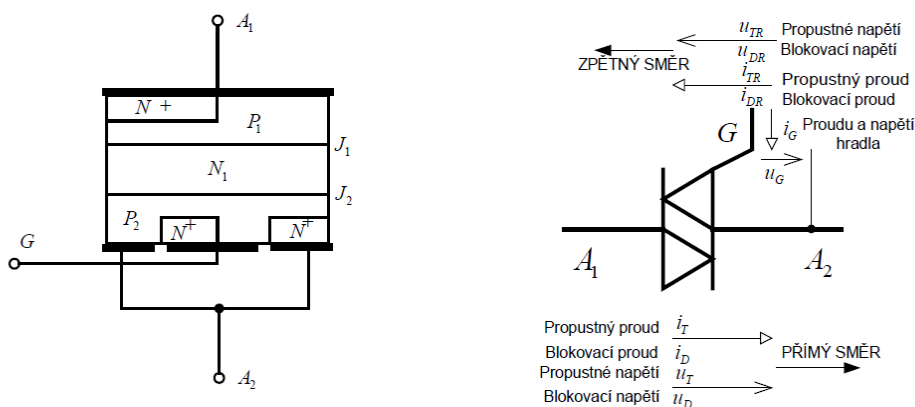
Central Semiconductor www.centalsemi.com

Littell Fuse <http://www.littelfuse.com/>

NTE <http://www.nteinc.com/>

10.3. Základní struktura

Triak má pětivrstvou strukturu, která je vodivá v obou směrech zapojení. Struktura triaku je zobrazena na obrázku č. 23. Jedna krajní struktura je zapojena v propustném a druhá v závěrném směru ovládanou jedním hradlem. Plošná krajní struktura je vytvořena tak, že krajní PN přechod je polarizován v propustném směru a na ovládání hradla nemá tak vliv polarita napětí. Oba okrajové přechody jsou plošně omezené, a to proto, aby při spojení s přívodní elektrodou byl odpor při zapnutí minimální. [8]



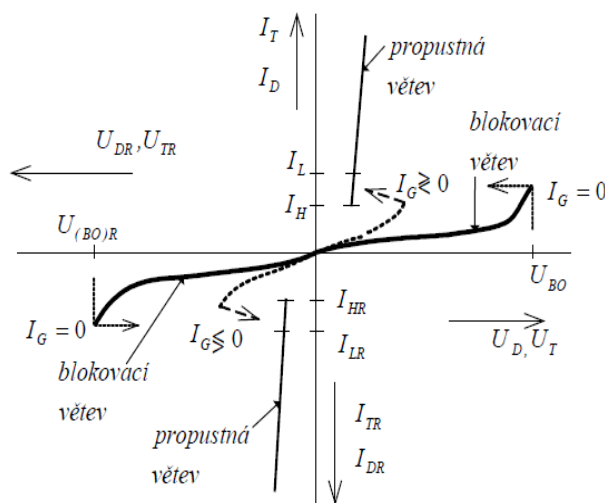
Obr. č. 23 Struktura Triaku a schématická značka [8]

10.4. Technologie výroby

Podobně jako ostatní polovodičové součástky je základní struktura většinou z křemíku, který dnes dominuje u polovodičů jako základní materiál. A to především z důvodu zvládnutí technologie jeho výroby. Tato masivní výroba vedla k tomu, že je tento materiál levný, a tím i velice rozšířený.

10.5. Statická charakteristika

Na obrázku níže je zobrazena voltampérová charakteristika. Charakteristika triaku je obdobná jako u tyristoru. Triak nemá závěrný stav, ale ve 3. kvadrantu má obdobnou charakteristiku jako v prvním. Přechod z blokovacího stavu do propustného je řízen pomocí hradla. Protože součástka vykazuje obousměrnou vodivost, existují u ní pouze blokovací a propustný stav. [1]



Obr. č. 24 Statická charakteristika Triaku [1]

10.6. Dynamické parametry

Dynamické parametry jsou podobné stejně jako statické parametry u tyristoru. Z dynamických parametrů je důležitá zapínací doba, kterou ovlivňuje polarita silového a řídicího napětí. Z dalších vypínacích parametrů se definuje vypínací doba.

Rozdíl mezi tyristorem a triakem, je v tom, že triak nemá závěrné napětí. Z toho také vyplívají problémy při jeho vypínání. Pokud po přerušení proudu narůstá napětí v opačné polaritě větší než kritickou rychlostí, může nastat nekontrolované sepnutí. Z tohoto důvodu se zapojuje k triaku paralelně RC ochranný článek.[8]

10.7. Mezní hodnoty dosahované v současné době

Mitsubishi TPDV1225RG $U_{DRRM}=1200\text{ V}$ $I_{TeM}=25\text{ A}$

STMicroelectronics 511-T2550-12T $U_{DRRM}=1200\text{ V}$ $I_{TeM}=25\text{ A}$

WeEn Semiconductors BTA445Z-800BTQ $U_{DRRM}=800\text{ V}$ $I_{TeM}=45\text{ A}$ [18]

10.8. Základní charakteristiky

Jedním ze základních parametrů je napěťová zatížitelnost, která udává maximální napětí $U_{DRM}=U_{DRRM}$. Toto napětí je pro oba směry stejné. Dalším důležitým parametrem je proudová zatížitelnost, která se značí I_{TeM} . Ta udává maximální efektivní hodnotu průchozího proudu. Tato hodnota je v katalogích většinou společně s teplotou pouzdra. Dalším parametrem je proudová přetížitelnost. Z dynamických parametrů má důležitý význam strmost nárůstu blokovacího napětí S_{Ukrit} . [8]

10.9. Typické použití

Triak se používá často v domácích spotřebičích pro regulaci výkonu. Najdeme ho zejména v ovladačích na jas světla, v ovladačích na rychlosti otáček ve fěnu a v dalších zařízeních, kde je potřeba řídit elektrické motory. Triak je velmi levný a proto se často využívá v regulátorech nízkého napětí do 1000 V se zátěží do jednotek KW. [1]

11. Současný trend a výhled do budoucnosti

První generace polovodičů byla založena na bázi germania a selenia, které byly rychle nahrazeny součástkami z křemíku. A to proto, že křemík měl daleko lepší vlastnosti a postupně, s rozšiřováním jeho výroba a zvyšováním jeho spotřeby, se zlepšoval jeho výrobní proces a snižovala se cena křemíku. Součástky na bázi křemíku, ale už v dnešní době dosahují teoretického limitu a jejich vylepšování se výrazně zpomalilo. Pro další inovace a zlepšení vlastností výkonových polovodičových součástek je potřeba použít jiné materiály. Jedním z perspektivních materiálů je karbid křemíku SiC a nitrid galia GaN. SiC a GaN jsou polovodičové materiály, které nabízejí tři hlavní výhody v energetických aplikacích ve srovnání s křemíkem, a to vyšší účinnost při vyšším napětí, vyšší provozní teploty a spínání vyšších frekvencí. To umožňují především fyzikální vlastnosti těchto materiálů, které jsou porovnány s křemíkem v tabulce č. 1.

Vlastnosti	Si	SiC	GaN
Energetický pásový odstup atomu (eV)	1.1	3.2	3.4
Tepelná vodivost (W/cm ² K)	1.5	5	1.3
Dialektrická konstanta	11.7	9.7	9
Pohyblivost elektronů (cm ² /V-sec)	1450	900	2000
Průrazové elektrické napětí 10 ⁶ V/cm	0.3	3	3.5
Saturační rychlost (10 ⁶ cm/sec)	10	22	25
Maximální provozní teplota relativně k Si	1	5,2	5,3

Tabulka č. 2 – Porovnání vlastností Si, SiC, GaN [30]

GaN a SiC mají výhodu oproti křemíku v tom, že jejich energetický pásový odstup atomu je skoro třikrát větší než u Si. SiC má navíc ještě velmi dobrou tepelnou vodivost, což umožňuje pracovat s ním při daleko vyšších teplotách. SiC a GaN mají také oproti křemíku až desetkrát větší průrazové elektrické napětí, a díky tomu může být základní vrstva daleko menší a tím lze vytvořit menší součástky při stejných parametrech oproti Si s menším odporem a daleko menší ztrátou energie při spínání. [30]

11.1. Karbid křemíku

Od 90. let kdy se začalo s vývojem součástek na bázi karbidu křemíku. Existuje řada aplikací, kde se tento materiál používá. Jeho vlastnosti slibovali v minulosti především úsporu energie v řadě aplikací, a proto se řada firem pustila do jeho výzkumu. V současné době už najdeme u většiny předních výrobců součástky založené na jeho bázi. Pro lepší představu - vlastnosti je lepší porovnat u konkrétní součástky, která je jak na bázi Si, tak i SiC. Níže jsou vybrány dvě součástky se shodnými provozními vlastnostmi od dvou rozdílných výrobců.

- Semikron
 1. SKM500MB120SC SiC MOSFET
 2. SKM400GB126D Si IGBT
- Infineon
 1. FF600R12ID4F Si-SiC IGBT
 2. FF600R12KE3 Si IGBT)

	Semikron		Infineon		Unit
	Si	SiC	Si	Si-SiC	
V_{CE}	1200	1200	1200	1200	V
I_C	300	500	600	600	A
$t_{d(ON)}$	330	270	660	200	ns
$t_{d(OFF)}$	650	400	960	550	ns
t_r	50	70	70	70	ns
t_f	110	65	80	80	ns
E_{ON}	29	10.3	120	20	mJ
E_{OFF}	48	4.7	95	40	mJ
E_{loss}	104	15	232	70	mJ
R_{th}	0.08	0.07	0.0044	0.034	K/W

Tabulka č. 3 – Porovnání součástek na bázi Si a SiC [31]

Když porovnáme hodnoty součástek z tabulky č. 2, tak nejdůležitější rozdíl mezi Si a SiC technologií najdeme v energetických ztrátách. Dále je patrné, že MOSFET tranzistory mají menší čas vypnutí a zapnutí, a proto jsou vhodnější při použití na vyšší spínací frekvence. Zároveň mají menší odpor a vytvářejí méně tepla při průchodu proudem. To umožňuje, že můžeme v menších provedeních spínat daleko větší výkony při stejných ztrátách a při použití menšího množství součástek než na bázi Si. To je velice výhodné zejména v aplikacích, kde jsme omezeni prostorem, jako jsou lodě nebo ponorky. [31]

V dnešní době součástky na bázi SiC najdeme ve velkém množství aplikací. Například ve fotovoltaických usměrňovačích, v záložních zdrojích nebo v hybridních automobilech. Přesto výzkum stále pokračuje nejenom v soukromých společnostech, ale i na univerzitách. Tyto instituce si totiž uvědomují budoucí přínos součástek na bázi SiC. Přesto ještě zbývá pro plné využití vyřešit řadu výzev, a to především:

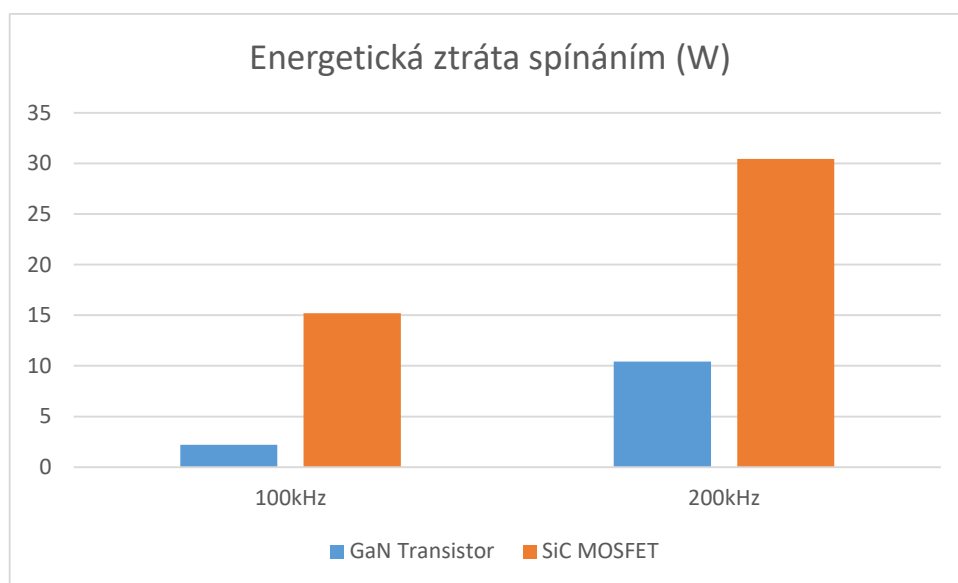
- vyvinutí vysoko napěťových součástek 1200V – 10 000V,
- najít vhodný způsob zapouzdření a vyvedení konektorů,
- stabilizovat a zjednodušit výrobní proces.

11.2. Nitrid Gália

Nitrid Gália je druhý z perspektivních materiálů, který se v některých výkonových polovodičových aplikacích již prosazuje na trhu. Nitrid Gallia byl popsán už v roce 1937, ale teprve v roce 1971 z něho byla vyrobena první dioda. Poté na dlouhou dobu zmizel ze zřetele

jako neperspektivní materiál. Až v roce 1993 byla představena modrá dioda a GaN začal být znovu v popředí pozornosti. Od té doby se součástky z tohoto materiálu dokázali prosadit na trhu. Zatím se ale jedná jen o určité segmenty jako např. výkonové vysokofrekvenční tranzistory nebo laserové modré diody. Tento materiál je však ještě v počátku svého vývoje. První součástka na bázi nitridu gália byla představena v roce 2004. První výkonové tranzistory na bázi gália byly předvedeny v roce 2008. A s postupným vývojem dalších aplikací se rozšiřuje jeho použití. V roce 2015 dokonce došlo k tomu, že některé srovnatelné součástky na bázi GaN byly levnější než klasické součástky na bázi Si.

Nitrid Gallia má oproti křemíku velkou výhodu v tom, že jeho energetický pásmový odstup 3,4 eV je v porovnání s křemíkem (1,1 eV) a má daleko větší průrazné napětí, což umožňuje součástkám být vyroben v menších rozměrech a spínat při stejných rozměrech daleko větší napětí. V současné době se na trhu prosazují GaN tranzistory, které spínají proudy o několika desítkách ampér a při napětí v rozmezí od 100 do 600V. Ty mají oproti součástkám na bázi Si daleko menší odpor v propustném stavu, rychlejší rychlost spínání a díky možnosti menších rozměrů je možno na jeden čip vložit daleko více součástek na bázi GaN než na bázi Si. Přestože nemá GaN tak dlouho pozornost jako SiC, tak i přesto je při srovnání obdobných součástek při určitých parametrech na tom GaN lépe. Můžeme to pozorovat například v grafu č. 1, kde se porovnávají spínací ztráty dvou podobných součástek. Jedna je na bázi GaN a druhá na bázi SiC. Z grafu je zřejmé, že při spínání při frekvenci 100kHz má SiC MOSFET až 7,5 krát větší ztráty než GaN tranzistor.



Graf č. 1 Porovnání energetický ztrát GaN tranzistoru SiC MOSFETU [32]

Porovnávané součástky:

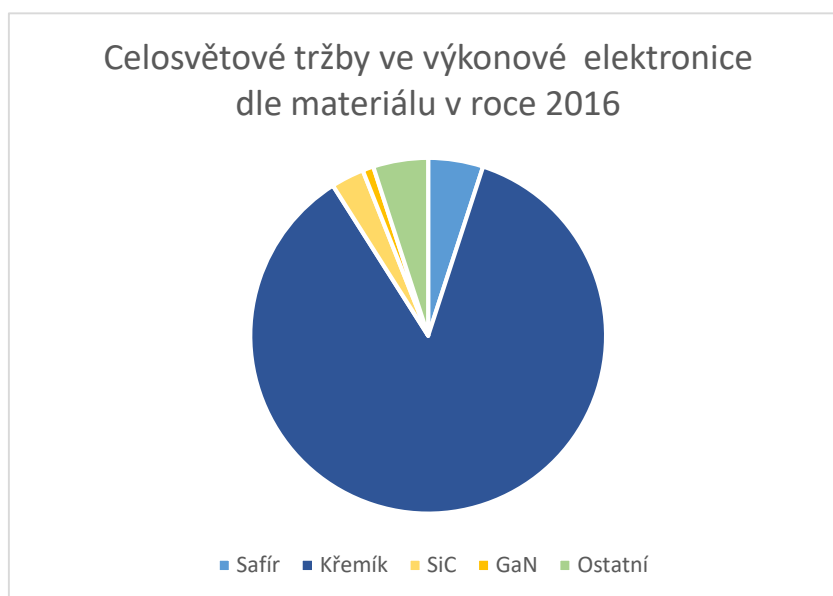
GS66508T E-HEMT and Cree's (Wolfspeed's)

C3M0065090J SiC MOSFET

Závěr

Tato práce shrnuje součástky používané ve výkonové elektronice. U každé součástky je popsána základní struktura, historie a základní parametry, které ji definují. U každého druhu je vyhledaný konkrétní příklad součástky na současném trhu, která je schopna pracovat s maximálním možným proudovým a napěťovým zatížením. Součástky jsou vybrány z aktuálních katalogů výrobců, a proto zde nejsou uváděna žádná fiktivní čísla, ale jsou zde nastíněny současné výkonové možnosti. Nakonec se práce věnuje materiálům další generace, které mají v budoucnosti potenciál nahradit součástky na bázi křemíku. Jedná se především o karbid křemíku a nitrid galia. Oba dva tyto materiály zmiňuje NASA v jedné ze svých zpráv jako důležitý milník, který umožní vylepšení polovodičových součástek pro let na Mars. Jedním z důležitých hledisek těchto materiálů je zvýšení spolehlivosti polovodičových součástek v extrémních podmínkách, zvýšení účinnosti polovodičových zařízení, zmenšení ztrát, zmenšení velikosti a větší integrace součástek do menšího prostoru. [33]

Přestože SiC a GaN jsou označovány jako prvky nové generace, tak pokud se podíváme na graf č. 2, můžeme vidět, že z celosvětového obchodu s polovodičovými součástkami má v nynějším světě dominantní postavení křemík, který zaujímá více než 90 % celosvětového obchodu v roce 2016. Součástky na bázi karbidu křemíku zaujímají 3 % a jsou na tom o něco lépe než součástky na bázi GaN, které zaujímají pouhé 1 % celosvětového obchodu. Z ekonomického hlediska je největší výzvou u těchto součástek snížení nákladů na jejich výrobu. S postupným zvyšováním poptávky po těchto součástkách dojde k rozšiřování výrobních kapacit a zefektivňování jejich procesu výroby. V tomto ohledu jsou na to lépe součástky na bázi SiC než GaN, které už jsou na trhu několik let a mají tak zvládnutou infrastrukturu prodeje, a díky tomu se nabízejí už u většiny větších prodejců polovodičů, kdežto u součástky na bázi GaN se tato infrastruktura teprve vytváří.



Graf. č. 2 Procentuální rozdělení tržeb dle materiálu v roce 2016 [34]

Zařízení vyrobené na bázi SiC a GaN vykazují lepší účinnost a menší spínací ztráty, které jsou potřebné pro energeticky šetrnější zařízení. S tlakem společnosti šetřit životní prostředí, využívat, co nejlépe obnovitelné zdroje a zbavit se závislosti na fosilních palivech, určuje trend, že tyto prvky si budou stále více ukrajovat z tržního koláče a budou se hledat další možnosti využití těchto součástek ve výkonové elektronice.

Citace

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika Svazek I*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-136-1.
- [2] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk a Rudolf GRIC. *Výkonová elektronika I*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN isbn80-01-00723-5.
- [3] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *Výkonová elektronika*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02094-0.
- [4] Diode. "The Constituents of Semiconductor Components". 2010-05-25. Archived from the original on 2011-07-10. Retrieved 2010-08-06. [online]. [cit. 2018-05-27].
- [5] Power diodes. <https://www.electrical4u.com/power-diodes/> [online]. [cit. 2018-05-27].
- [6] ROZANOV, П. А., Sergey RYVKIN, E. E. CHAPLYGIN a Pavel VORONIN. *Power electronics basics: operating principles, design, formulas, and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 1482298791.
- [7] *Power Semiconductor Device* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: [http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-2\(DK\)\(PE\)%20\(\(EE\)NPTEL\).pdf](http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Power%20Electronics/PDF/L-2(DK)(PE)%20((EE)NPTEL).pdf)
- [8] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2018-05-27]. ISBN 978-80-248-1485-8.
- [9] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: https://www.dynexsemi.com/assets/downloads/dynex_product_guide.pdfconductors/rectifier-diodes
- [10] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.hvproducts.de/files/8-2cl2-hv37.pdf>
- [11] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.hvproducts.de/files/8-2cl2-hv37.pdf>
- [12] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://new.abb.com/semiconductors/Diodes/standard-recovery-diodes>
- [13] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <https://new.abb.com/semiconductors/>
- [14] History of the transistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor
- [15] *How Transistors Are Made* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.learnabout-electronics.org/Semiconductors/bjt_02.php
- [16] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/power-transistors/power-bipolar.html>
- [17] *MOS fabrication process* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <http://www.iaa.ncku.edu.tw/~aeromems/MEMSDesign/Ch2.pdf>
- [18] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com>
- [19] Insulated-gate bipolar transistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Insulated-gate_bipolar_transistor

- [20] *IGBT History* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7851003/>
- [21] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules/igbt-modules-up-to-4500v-6500v/>
- [22] *Short History on the Thyristor* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <http://www.tdworld.com/hvdc/short-history-thyristor-valve>
- [23] BHATTACHARYA, S.K. *Basic electrical engineering*. Delhi: Pearson, 2011. ISBN 9788131754566.
- [24] *Online katalog* [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/eTypeNoProfile.php?TYPENO=FT1500AU-240&FOLDER=/product/highpdevice/thyristor/general>
- [25] Triak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/TRIAC>
- [26] *ISYS GTO Catalog* [online]. [cit. 2018-06-03]. Dostupné z: <http://www.westcode.com/gto.html>
- [27] *Schottky Diodes* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <http://www.powerselectronics.com/discrete-power-semis/schottky-diodes-old-ones-are-good-new-ones-are-better>
- [28] *Výkonová elektronika*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-160-3.
- [29] *IGCT* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/rshambhu/three-level-igctbased-npc-converters>
- [30] *Gallium Nitride (GaN) versus Silicon Carbide (SiC)* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: http://www.richardsonrfd.com/resources/RelDocuments/SYS_26/Microsemi-A-Comparison-of-Gallium-Nitride-Versus-Silicon-Carbide.pdf
- [31] *Si vs SiC devices* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.switchcraft.org/learning/2016/12/9/si-vs-sic-devices>
- [32] *SiC and GaN vs. IGBT* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <http://www.powerselectronics.com/automotive/sic-and-gan-vs-igbts-imminent-tug-war-supremacy>
- [33] *BODY OF KNOWLEDGE FOR SILICON CARBIDE POWER ELECTRONICS* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://nepp.nasa.gov/files/27644/NEPP-BOK-2016-GRC-Boomer-SiC-TN35760.pdf>
- [34] *Power Electronics Market Analysis By Material* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/power-electronics-market>