

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody charakterizace organických tranzistorů

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na organické tranzistory a jejich metody charakterizace. První část práce je zacílena na seznámení s tranzistory, v dalších částech jsou uvedeny metody charakterizace a jejich postupy, tím jsou myšleny zejména statické a dynamické charakteristiky jak anorganických, tak i organických tranzistorů. V poslední části práce jsou implementovány znalosti z předcházejících kapitol práce do praxe.

Klíčová slova

Tranzistor, bipolární tranzistor, unipolární tranzistor, organické materiály, OTFT, OECT, EGOFET, EDLT, OFET

Abstract

This bachelor thesis focuses on organic transistors and their characterization methods. The first part of the thesis is focused on introduction to transistors, in other parts there are presented ways of characterization and their procedures, especially static and dynamic characteristics of both inorganic and organic transistors. In the last part of the thesis the knowledge from the previous chapters of the work is implemented.

Key words

Transistor, bipolar transistor, unipolar transistor, organic materials, OTFT, OECT, EGOFET, EDLT, OFET

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Tadeáš Pech

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukášovi Mračkovi za cenné profesionální rady, připomínky, nápady a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	13
1 TRANZISTORY	14
1.1 OBECNÉ VLASTNOSTI	14
1.2 ROZDĚLENÍ BĚŽNÝCH TRANZISTORYŮ	14
1.2.1 Bipolární tranzistor	14
1.2.2 Unipolární tranzistory	16
1.2.3 IGBT Tranzistory	19
1.2.4 Použití konvenčních tranzistorů	20
1.3 MATERIÁLY NA VÝROBU TRANZISTORYŮ	20
1.3.1 Materiály na výrobu běžných tranzistorů	20
1.3.2 Materiály na výrobu organických tranzistorů	21
1.4 ORGANICKÉ TRANZISTORY	23
1.4.1 OFET tranzistory	23
1.4.2 OTFT Tranzistory	25
1.4.3 OECT tranzistory	25
1.4.4 EGOFET tranzistory	26
1.4.5 EDLT tranzistory	26
1.4.6 Použití nejběžnějších organických tranzistorů	27
2 METODY CHARAKTERIZACE BĚŽNÝCH TRANZISTORYŮ	29
2.1 MĚŘENÍ BIPOLÁRNÍCH TRANZISTORYŮ	29
2.1.1 Statické charakteristiky bipolárních tranzistorů	29
2.1.2 Dynamické vlastnosti bipolárních tranzistorů	31
2.1.3 Linearizované modely bipolárního tranzistoru	34
2.2 MĚŘENÍ UNIPOLÁRNÍCH TRANZISTORYŮ	35
2.2.1 Statické charakteristiky unipolárních tranzistorů	35
2.2.2 Dynamické vlastnosti unipolárních tranzistorů	37
2.2.3 Linearizovaný model MOSFET tranzistoru	38
2.3 PROBLÉMY A CHYBY MĚŘENÍ	39
3 METODY CHARAKTERIZACE ORGANICKÝCH TRANZISTORYŮ	41
3.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ	41
3.2 POŽADOVANÁ MĚŘENÍ	41
3.3 DOPLŇUJÍCÍ MĚŘENÍ	41
3.4 DŮVODY A VÝSLEDKY KAŽDÉHO TYPU MĚŘENÍ	42
3.4.1 Měření přenosové charakteristiky	42
3.4.2 Měření výstupní charakteristiky	42
3.4.3 Měření svodového proudu a jeho vliv na odtokový proud	42
3.5 ODCHYLKY MĚŘENÍ	43
3.6 URČENÍ A ZHODNOCENÍ POHYBLIVOSTI ZAŘÍZENÍ	43
3.7 URČENÍ A ZHODNOCENÍ POMĚRU ON/OFF	44
3.8 URČENÍ A ZHODNOCENÍ DIELEKTRICKÉ KONSTANTY	44
3.9 ZPRACOVANÁ DATA	44
3.10 PROBLÉMY	45
4 VLASTNÍ NÁVRH CHARAKTERIZACE ORGANICKÝCH TRANZISTORYŮ	47
4.1 MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK	47
4.2 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK	48
4.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE PRO CHARAKTERIZACI ORGANICKÝCH TRANZISTORYŮ	48
4.3.1 Měřicí přístroje	48
4.3.2 Software	49
4.3.3 Přístroj na ukotvení	49

5 ZÁVĚR.....	51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	52

Seznam symbolů a zkratek

B	Báze
C	Kolektor
E.....	Emitor
du/di.....	Derivace napětí podle proudu
f.....	Frekvence
VF.....	Vysokofrekvenční
NZ.....	Nízkofrekvenční
SB	Zapojení se společnou bází
SE	Zapojení se společným emitorem
SC	Zapojení se společným kolektorem
G	Hradlová elektroda, gate, hradlo
D	Odtoková elektroda, drain
S.....	Zdrojová elektroda, source
FET	Unipolární tranzistor (řízený el. polem)
IGFET	Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem
JFET	FET tranzistor, hradlo izolováno záporně polarizovaným PN přechodem
MESFET.....	Unipolární tranzistor fungující na principu kov-polovodič
MISFET	Unipolární tranzistor s kovovým gate izolovaným od polovodiče
TFT	Tenkvrstvý tranzistor
MNSFET	Unipolární tranzistor
MNOSFET	Unipolární tranzistor
MOSFET	Unipolární tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič
U_{GS}	Napětí mezi gate a source
U_P	Prahové napětí
U_{DS}	Napětí mezi drain a source
U_T	Prahové napětí (v anglicky psaných literaturách)
IGBT.....	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
BJT	Bipolární tranzistor
PEDOT:PSS	Poly-3,4-ethylendioxythiophen
P3HT.....	Poly(3-hexylthiophen)
PPV.....	Poly-fenylénvinylén

LED	Dioda emitující světlo
OLED	Organická dioda emitující světlo
OFET	Organický tranzistor řízený el. polem
UV	Ultrafialové záření
Si.....	Křemík
SiO ₂	Oxid křemičitý
TC/BG	Horní kontakty, spodní gate
BC/BG	Spodní kontakty, spodní gate
BC/TG	Spodní kontakty, horní gate
TC/TG.....	Horní kontakty, horní gate
L.....	Délka kanálu
OTFT	Organický tenkovrstvý tranzistor
OEFT.....	Organický elektrochemický tranzistor
EGOFET.....	Organický tranzistor řízený elektrickým polem s řídicí elektrodou oddělenou elektrolytem
EDLT	Organický tranzistor s elektrickou nábojovou dvojvrstvou
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
P _{max}	Hodnota maximálního výkonu tranzistoru
U _{max}	Hodnota maximálního napětí tranzistoru
I _{max}	Hodnota maximálního proudu tranzistoru
U _{BE}	Napětí mezi bází a emitorem
U _{CE}	Napětí mezi kolektorem a emitorem
I _B	Proud před bází
C _{BE}	Kapacita mezi bází a emitorem
R _{BE}	Odpor mezi bází a emitorem
DR.....	Dynamický rozsah
A _u	Napěťové zesílení
P	Výkon
C _{CE}	Kapacita mezi kolektorem a emitorem
C _{CB}	Kapacita mezi kolektorem a bází
I _C	Proud přes kolektor
I _G	Proud generátoru, proud před hradlo
I _D	Proud přes drain
I _{Dsat0}	Saturační proud přes drain

W	Šířka kanálu
μ	Pohyblivost nosičů
C_i	Vstupní kapacita na jednotku plochy
C_{is}	Vstupní kapacita
C_{oss}	Výstupní kapacita
C_{DS}	Kapacita mezi drain a source
C_{GD}	Kapacita mezi gate a drain
C_{GS}	Kapacita mezi gate a source
G_d	Výstupní vodivost
G_m	Strmost hradla, transkonduktance
μ_g	Napět'ový zesilovací činitel
G_{msat}	Strmost hradla v saturačním režimu
U_{ss}	Stejnoseměrná složka napětí
THD	Činitel harmonického zkreslení
THD+N	Činitel harmonického zkreslení + šum
SINAD	Poměr celkového signálu ku nežádoucím složkám
IEEE	Mezinárodní nezisková profesní organizace usilující o vzestup technologie související s elektrotechnikou
RH	Relativní vlhkost
T	Teplota
d	Tloušťka dielektrika
SMU	Měřicí přístroj
ACS Basic	Software pro charakterizaci organických zařízení
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
F_β	Mezní kmitočet pro pokles o 3 dB pro zapojení SE
F_t	Tranzitní kmitočet
H_{11}	Statická vstupní impedance
H_{21}	Statický proudový zesilovací činitel
H_{12}	Statický zpětný napět'ový činitel
H_{22}	Statická výstupní admittance
Y_{11}	Vstupní admittance
Y_{12}	Zpětná převodní admittance
Y_{21}	Převodní admittance

Y_{22}	Výstupní admitance
U_1	Vstupní napětí
U_2	Výstupní napětí
I_1	Vstupní proud
I_2	Výstupní proud
LMS	Přístroj pro ukotvení s jehličkovými sondami
MATLAB	Software pro zpracování dat
LABview	Software pro zpracování dat

Úvod

Slovo tranzistor pochází ze spojení dvou anglických slov **Transfer resistor**. Tranzistory jsou aktivní polovodičové součástky, jejich historie sahá až do roku 1947, kdy byl objeven tranzistorový efekt a vynalezen první tranzistor zásluhou Williama Shockeého, Johna Bardeena a Waltera Brattaina. Díky tomuto objevu jim byla v roce 1956 udělena Nobelova cena za fyziku. Tento objev byl velmi významný a vedl k obrovskému převratu v elektrotechnice. Tato součástka vedla k miniaturizaci a pozdější implementaci v integrovaných obvodech.

Zpočátku se tyto součástky používaly zejména v tranzistorových rádiích, postupem doby se tyto polovodičové prvky implementovaly do mikroprocesorů (společnost Intel). V dnešní době jsou tranzistory nezbytnou součástí v oblasti elektrotechniky. Jejich používání je velmi rozsáhlé, přes zesilovače, spínače až po snímání některých veličin v bioelektronice.

Organické tranzistory, které jsou stěžejním tématem této práce, se vynalezly o několik desetiletí déle po experimentech s organickými polymery. Tento závratný objev přispěl ke zlepšení miniaturizace a k rozšíření obzorů použití. Jejich vlastnosti jsou postupně charakterizovány ve větší části této práce.

Tato práce se zaměřuje na návrh charakterizace organických tranzistorů, podle kterých by se daly tyto polovodičové součástky testovat, srovnávat a získávat podle nich informace, které by vedly k vytvoření jednotlivých tabulek a tudíž vytvoření jednoduchého katalogového listu z něhož by bylo možné pozorovat vlastnosti organických tranzistorů.

1 Tranzistory

V první kapitole této bakalářské práce jsou popsány obecné vlastnosti tranzistorů, jejich rozdělení, funkce, použití a materiály, které jsou použity na jejich výrobu.

1.1 Obecné vlastnosti

Tranzistory jsou polovodičové součástky se dvěma PN přechody, jsou jedním z nejzákladnějších prvků dnešní elektroniky. Jsou schopny zesilovat proud i napětí, záleží na jejich zapojení, přičemž malé změny proudu nebo napětí na vstupu dokáží vyvolat velké změny napětí, popřípadě proudu na výstupu.

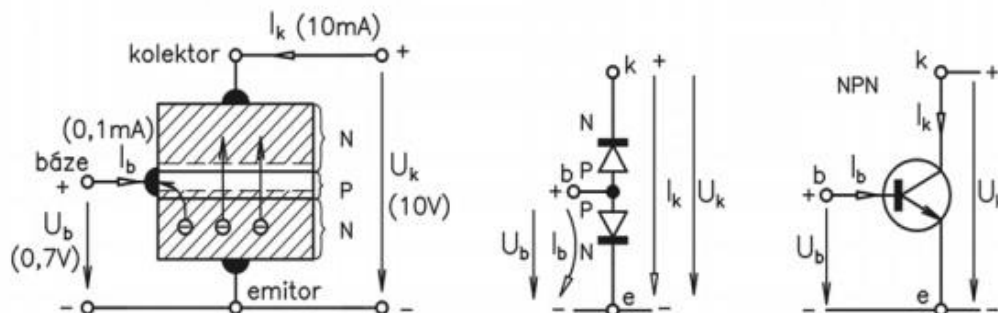
1.2 Rozdělení běžných tranzistorů

Tranzistory se dělí na: bipolární, unipolární a IGBT.

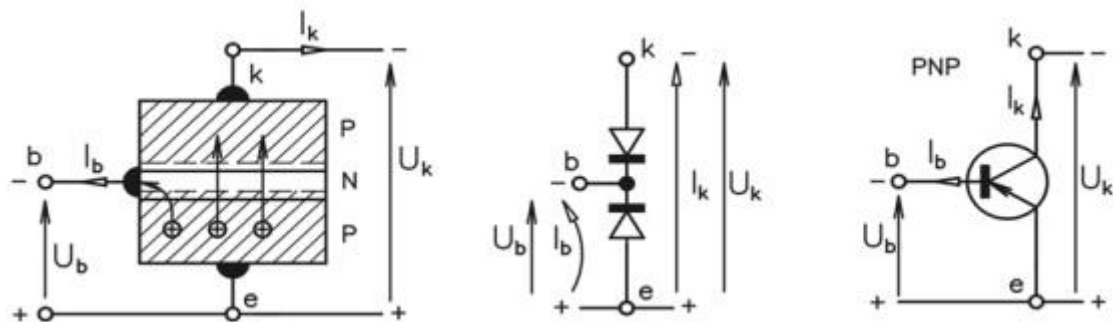
1.2.1 Bipolární tranzistor

Pojmem bipolárnost u uvedených tranzistorů znamená, že přenos náboje je způsoben majoritními i minoritními nosiči.

Bipolární tranzistor je aktivní polovodičová součástka skládající se ze tří elektrod: báze, kolektoru a emitoru (dále v textu jen B, C, E). Fungují na základě dvou PN přechodů a setkáváme se s nimi v provedení NPN (*obr.1.1*) nebo PNP (*obr.1.2*). [1] Podstatou činnosti bipolárního tranzistoru je řízená injekce minoritních nosičů emitorem do oblasti báze a následná extrakce těchto nosičů kolektorem, přičemž rekombinace minoritních nosičů v bázi musí být co nejmenší. Proto musí být hloubka báze (t.j. vzdálenost obou depletičních vrstev) mnohem menší, než difúzní délka minoritních nosičů. Důležitou podmínkou je i nutnost vytvoření silně nesymetrického emitorového přechodu. Pro dobré zesilovací účinky tranzistorů je nutné, aby plocha kolektorového přechodu byla větší než plocha emitorového přechodu.[1-2]



Obr. 1.1 Schématická značka bipolárního tranzistoru NPN, jeho struktura a vnitřní zapojení. [2]



Obr. 1.2 Schématická značka bipolárního tranzistoru PNP, jeho struktura a vnitřní zapojení.

[2].

U bipolárních tranzistorů záleží na zapojení. Známe 3 druhy zapojení, se společným emitorem (SE), se společným kolektorem (SC) a se společnou bází (SB), jelikož každé zapojení má jiné vlastnosti, jak je popsáno v tabulce 1.1.

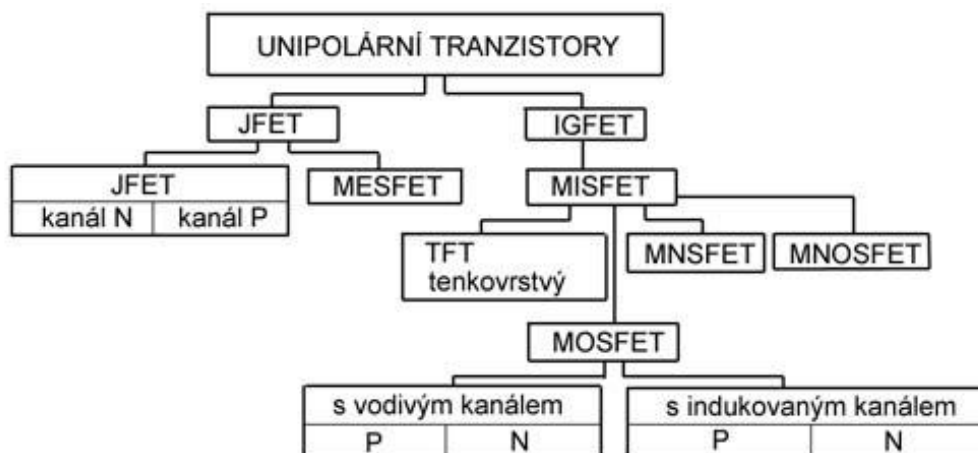
Tab. 1.1 Zapojení a vlastnosti bipolárních tranzistorů.[3]

Druh zapojení	SE	SC	SB
Tranzistor PNP			
Tranzistor NPN			
Zesílení proudové napěťové výkonové	10 až 200 10 až 100 100 až 2000	10 až 200 0,9 až 0,99 10 až 200	0,9 až 0,995 10 až 100 10 až 100
Impedance vstupní výstupní	10 Ω až 1 kΩ 10 kΩ až 100 kΩ	10 kΩ až 100 kΩ 100 Ω až 1 kΩ	10 Ω až 100 Ω 100 kΩ až 1 MΩ
Fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím - proudem	180° 0°	0° 180°	0° 0°
Výhody	nejlepší přizpůsobení velké zesílení	vhodný jako měnič impedance	nejvyšší f_{mez} vhodný jako měnič impedance

1.2.2 Unipolární tranzistory

Pojmem unipolárnost u uvedených tranzistorů, kterými se práce zabývá v této podkapitole, znamená, že přenos náboje je způsoben pouze majoritními nosiči.

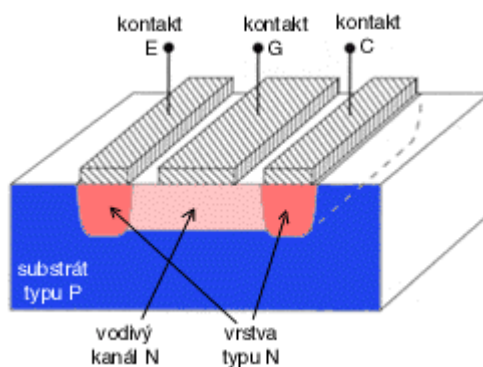
Unipolární tranzistor je polovodičová součástka skládající se z polovodičů typu N a P stejně jako bipolární tranzistor. Elektrody unipolárního tranzistoru se nazývají hradlová (G, gate), odtoková (D, drain) a zdrojová (S, source). Tyto tranzistory jsou známé pod názvem FET (Field Effect Transistor). Již z názvu vyplývá, že jsou řízeny elektrickým polem. Základně se dělí tak, že pokud je řídicí hradlo izolováno tenkou vrstvou izolantu, jedná se o tranzistor IGFET (Insulated-Gate Field Effect Transistor), je-li hradlo izolováno záporně polarizovaným přechodem, jedná se o tranzistory typu JFET (Junction Field Effect Transistor). Speciálním druhem JFET tranzistorů jsou MESFET (Metal-semiconductor Field Effect Transistor), který funguje na principu kov-polovodič. MISFET (Metal-Insulated Field Effect Transistor) jsou podskupina IGFET tranzistorů a dále se dělí na TFT (Thin-Film Transistor) čili tenkovrstvý tranzistor, MNSFET (Metal-Nitride Semiconductor Field Effect Transistor), MNOSFET (Metal-Nitride Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) a nejpoužívanější MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), který je níže podrobněji popsán. Rozdělení unipolárních tranzistorů je vidět na obr. 1.3.



Obr.1.3 Rozdělení unipolárních tranzistorů. [4]

- **JFET Tranzistory**

JFET je druh tranzistoru, kde je hradlo izolováno záporně polarizovaným přechodem. Princip činnosti je takový, že přechod P+N mezi hradlem a emitorem je polarizován v závěrném směru a potenciál (napětí) hradla ovládá proud i_D tekoucí kanálem mezi emitorem a kolektorem. Je-li přechod polarizován vnějším napětím (zde např. U_{GS}) v závěrném směru, rozšiřuje se oblast prostorového náboje do méně dotovaného polovodiče, tj. N, tj. kanálu. Tím dochází ke změně tloušťky uvažovaného vodivého kanálu (oblast prostorového náboje má odpor mnohem větší než odpor polovodiče N). Struktura JFET tranzistoru je uvedena na obr. 1.4. [5]



Obr. 1.4 Struktura tranzistoru JFET. [6]

- **MOSFET tranzistory**

Tranzistory typu MOSFET jsou nejrozšířenějším typem v oblasti tranzistorů s izolovaným hradlem. V tomto tranzistoru je struktura, ve které je kovová elektroda G oddělena od polovodiče vrstvou oxidu, nejčastěji oxidu křemičitého SiO_2 . Elektrody hradla bývají tvořeny hliníkem.

V konstrukci integrovaných obvodů se dnes používá dotované polykrystalického křemíku, protože umožňuje výrobu tranzistorů s větší hustotou integrace a s menšími parazitními kapacitami než bipolární tranzistory. [5][7]

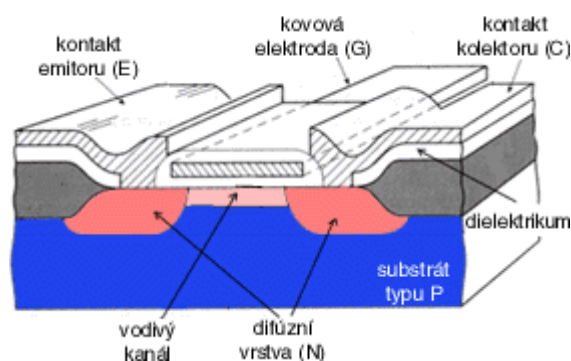
Tranzistory typu MOSFET se vyrábí ve čtyřech základních provedeních:

- Vodivý kanál (typu N a typu P)

Přivedeme-li napětí záporné polarity mezi G a S, je v zabudovaném kanálu indukovanán přes kapacitu hradla kladný náboj. Kladný náboj způsobí vyprázdnění kanálu od volných nosičů náboje, které jsou v něm majoritními nosiči. Kanál se při dostatečně velkém záporném napětí stává nevodivým. Jestliže bude napětí $U_{GS} \geq 0$, indukuje se v kanálu záporný (u typu-P kladný) náboj, zvýší se koncentrace majoritních elektronů a kanálem protéká proud. [7]

- Indukovaný kanál (typu N a typu P)

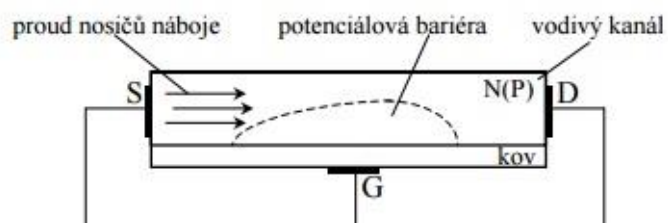
Pokud přiložíme mezi G a S kladné napětí U_{GS} , indukuje se v substrátu mezi elektrodami S a D kanál typu N, proto název MOSFET s indukovaným kanálem. Napětí U_{GS} , při kterém začne být indukovaný kanál vodivý, se nazývá prahové napětí U_P a jeho typické hodnoty pro nejčastěji používané tranzistory jsou od 1 do 5V. Pokud je napětí $U_{GS} < U_P$ (prahové napětí, v zahraničních literaturách označováno jako U_T), vodivý kanál nevznikne. [7]



Obr. 1.5 Struktura tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem. [6]

- **MESFET tranzistory**

Tento tranzistor využívá usměrňující přechod kov-polovodič, který je (podobně jako Schottkyho dioda) schopen pracovat na velmi vysokých frekvencích (desítky GHz). Principiálně pracuje stejně jako JFET. Struktura MESFET je zobrazena na obr. 1.6. [5]



Obr. 1.6 Struktura tranzistoru MESFET. [8]

1.2.3 IGBT Tranzistory

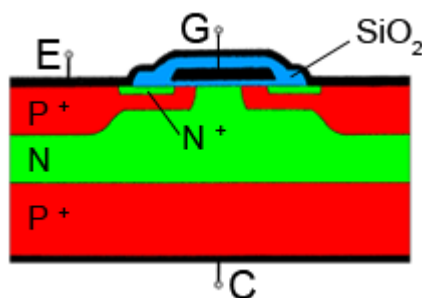
IGBT tranzistor je spojení unipolárních a bipolárních tranzistorů, za účelem využití výhod obou již zmíněných druhů tranzistorů (*obr. 1.7*). IGBT je zařízení s menšinovým nosičem s vysokou vstupní impedancí a velkým rozsahem výkonu. Mnoho konstruktérů vidí IGBT jako zařízení s charakteristikami vstupu MOS a bipolární výstupní charakteristikou. IGBT je napěťově řízené bipolární zařízení. Je to funkční integrace zařízení MOSFET a BJT (v zahraničních literaturách zkratka pro bipolární tranzistor) v monolitické podobě. [9] Kombinuje nejlepší atributy obou pro dosažení optimálních vlastností zařízení. Bezpečná pracovní zóna IGBT tranzistoru je většinou omezena tepelnými ztrátami a frekvencí.

- **Hlavní výhody IGBT oproti MOSFET a BJT jsou:**

- Má velmi nízkou hladinu poklesu napětí kvůli modulaci vodivosti a má vynikající proudovou hustotu. Takže je možné zvolit menší velikost čipu, a také nižší náklady.
- Má nízké ztráty díky vstupní bráně MOS struktury. Snadno se ovládá ve srovnání s běžně řízenými zařízeními (Tyristor, bipolární tranzistor) v aplikacích vysokého napětí a vysokého proudu.
- Má vynikající proudovou vodivost ve srovnání s bipolárním tranzistorem. Má také vynikající blokovací schopnosti.
- Rychlost spínání je vyšší než rychlost bipolárního tranzistoru. [9]

- **Hlavní nevýhody jsou:**

- Rychlost spínání je nižší než rychlost MOSFET.
- Existuje možnost zablokování díky vnitřní struktuře PNPN tyristoru. [9]



Obr. 1.7 Struktura IGBT tranzistoru. [10]

1.2.4 Použití konvenčních tranzistorů

Unipolární tranzistory ve většině oblastí vytlačily klasické bipolární tranzistory. Používají se nejen v signálových digitálních a analogových obvodech, ale také ve výkonové elektronice, kde bylo jejich využití donedávna limitováno díky křemíkové technologii napětím zhruba 600 V. Tranzistory typu MOSFET jsou často používány v integrovaných obvodech s velkou hustotou integrace, kde jejich vysoká vstupní impedance umožňuje dosáhnout velmi nízké výkonové spotřeby na součástku. [7]

IGBT se používají jako měniče statických i mobilních zdrojů napájení elektrických pohonů, kde jsou důležité rychlé spínání a blokování napětí. [9]

Bipolární tranzistor zůstává zařízením, které vyniká v některých aplikacích, jako je návrh diskretních obvodů, kvůli velmi širokému výběru dostupných typů tranzistorů a díky své vysoké transkonduktanci a výstupní odolnosti ve srovnání s MOSFET. Tato součástka je také volbou pro náročné analogové obvody, zejména pro aplikace s velmi vysokou frekvencí, jako jsou například radiofrekvenční obvody pro bezdrátové systémy.

1.3 Materiály na výrobu tranzistorů

V této kapitole jsou popsány materiály na výrobu tranzistorů, jejich vlastností a struktury.

1.3.1 Materiály na výrobu běžných tranzistorů

Konvenční tranzistory jsou vyrobeny z chemických prvků ve skupině IV. v periodické tabulce prvků. Nejčastěji se používá křemík, germanium je méně časté. Tyto prvky tvoří krystaly takovým způsobem, že čtyři valenční elektrony každého atomu jsou sdíleny mezi "sousedy". Pak každý atom má na svém vnějším plášti osm valenčních elektronů. To je velmi stabilní stav a neexistují žádné volně dostupné elektrony pro vedení proudu. Tato dokonalá rovnováha však může být narušena nahrazením některých atomů

křemíku atomy ze skupiny V. (fosfor nebo arsen) nebo skupiny III. (bór). Pokud je například zaveden fosfor, je zaveden další volně dostupný elektron na atom fosforu. Výsledný materiál se nazývá polovodičem typu n. Stejně tak, zavedením atomů skupiny III. vyplývá polovodič typu p. Tím, že se umístí polovodič typu p a polovodič typu n vedle sebe, vzniknou p-n přechody. [11]

1.3.2 Materiály na výrobu organických tranzistorů

V následující části práce jsou rozděleny a popsány některé organické materiály na výrobu tranzistorů, na které se tato práce zaměřuje.

Organické materiály jsou materiály na bázi uhlíku. První experimenty s organickými polymery jsou zaznamenány již k roku 1950, od té doby se zaznamenal pozoruhodný pokrok ve vědě a technologii polovodičových polymerů. Polovodičové polymery se nyní používají v širokém spektru inovačních aplikací, díky svým pozoruhodným vlastnostem. Organické polovodiče se dělí na dvě kategorie, na konjugované polymery a konjugované nízkomolekulární materiály. [12-13]

- **Hlavní aromatické konjugované polymery**

- PEDOT:PSS (Poly-3,4-ethylendioxythiophen)

PEDOT je jeden z nejvíce studovaných vodivých polymerů současnosti. Tento vodivý polymer vykazuje vysokou elektrickou vodivost, stabilitu v širokém rozmezí pH a je komerčně dostupný. Všechny tyto vlastnosti z něj dělají ideálního zástupce pro nespočet aplikací, zahrnujících senzory, organické tenkovrstvé tranzistory, paměti, displeje a další. Jako čistá látka je PEDOT nerozpustný, proto se do něj přidávají protionty o vysoké molekulové hmotnosti k získání roztokem zpracovatelných disperzí. Vodivosti tenkých vrstev PEDOTu se pohybují v rozmezí od 1 do 1000 S/cm v závislosti na použitých protiontech a úrovni dopování. Nejoblíbenější používaný protiont je sulfonovaný polysteren PSS tvořící směs PEDOT:PSS. PEDOT dopovaný dalším protiontem p-toluen sulfonát také vykazuje výtečné vlastnosti aplikace v chemických a biologických senzorech.

- P3HT

P3HT (Poly(3-hexylthiofen)) vykazuje výbornou rozpustnost v rozdílných organických rozpouštědlech, což dovoluje snadnou výrobu zařízení technikou zpracovatelného roztoku zahrnujícího odstředivé lití a inkoustový tisk.

- Polyfluoren

Tyto látky jsou třídou polymerních materiálů. Nejsou to přirozeně se vyskytující materiály, ale jsou navrženy a syntetizovány pro jejich aplikace. Moderní chemie umožnila adaptabilní syntézu a kontrolu nad polyfluoreny, která usnadnila použití v mnoha organických elektronických aplikacích. Akademický a průmyslový výzkum se o tyto polymery zajímají z důvodu jejich optických a elektrických vlastností. Mají vysokou fotoluminiscenci kvantové výtěžnosti. Jedná se o prototypový konjugovaný polymer, ale jsou jedinou třídou konjugovaných polymerů, které mohou být naladěny tak, aby vyzařovaly světlo v celé viditelné oblasti. Polyfluoreny jsou primárně zajímavé kvůli optoelektronickým vlastnostem jejich chromoforických složek a jejich prodloužené konjugaci. Konstrukce polyfluorenových derivátů závisí na charakteru a vlastnostech jejich monomerů. [15]

- Poly-fenylénvinylén

PPV je vodivý polymer z rodiny tuhých polymerů. PPV je jediný polymer tohoto typu, který může být zpracován do vysoce uspořádaného krystalického tenkého filmu. PPV a jeho deriváty jsou elektricky vodivé při dopování. Přestože je nerozpustný ve vodě, mohou být jeho prekurzory manipulovány ve vodném roztoku. Malá optická pásová mezera a její jasně žlutá fluorescence činí PPV kandidátem v aplikacích, jako jsou fotovoltaiické přístroje. Navíc PPV může být dopován za účelem vytvoření elektricky vodivých materiálů. Jeho fyzikální a elektronické vlastnosti mohou být pozmeněny začleněním funkčních bočních skupin.[15]

• ***Hlavní nízkomolekulární látky***

- Rubren

Rubren je červeně zbarvený polycyklický aromatický uhlovodík. Jako organický polovodič je hlavní aplikací rubrenu v organických světlo emitujících diodách (OLED) a OFET, které jsou základními prvky flexibilních displejů. Rubren je rozdílný v tom, že je organickým polovodičem s nejvyšší pohyblivostí nosičů náboje a dosahuje $40 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Tato hodnota byla měřena v OFETs připravených odlupováním tenké vrstvy jednodokrytalického rubrenu a převedením na substrát Si / SiO₂. [16]

- Tetracen

Tetracen, také nazývaný naftacen, je polycyklický aromatický uhlovodík.

Má vzhled bledě oranžového prášku. Tetracen je čtyřkruhový člen série alkenů, z nichž předchozí byl antracen (tricen) a další byl pentacen. Je to molekulární organický polovodič, používaný v tranzistorech s organickým polem (OFET) a organických světelných diod (OLED). [16]

- Pentacen

Pentacen je polycyklický aromatický uhlovodík sestávající z pěti lineárně kondenzovaných benzenových kruhů. Tato vysoce konjugovaná sloučenina je organický polovodič. Sloučenina vytváří excitony při absorpci ultrafialového (UV) nebo viditelného světla, což ji činí velmi citlivou na oxidaci. Z tohoto důvodu se tato sloučenina, která je fialovým práškem, pomalu rozkládá při vystavení vzduchu a světlu. Strukturálně je pentacen jedním z lineárních acenů, z nichž předcházející je výše uvedený tetracen (čtyři kondenzované benzenové kruhy) a další je hexaken (šest kondenzovaných benzenových kruhů). [16]

1.4 Organické tranzistory

V následujících odstavcích jsou rozebrány některé z typů organických tranzistorů, jejich struktury, vlastnosti a principy funkce.

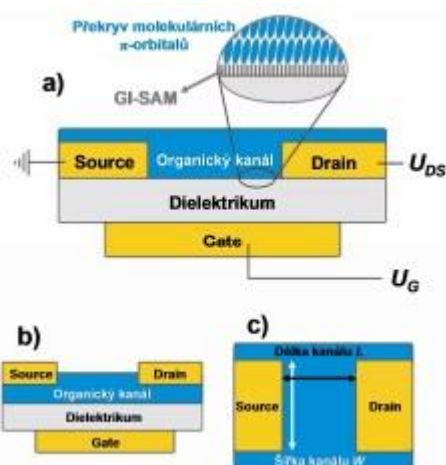
1.4.1 OFET tranzistory

Organický FET (OFET) je druh FET, kde polovodičová vrstva je organický materiál, jsou velmi příbuzné k anorganickým MOSFET. První záznam o OFET tranzistoru se datuje k roku 1987. Od té doby se OFET tranzistory vyvíjely enormně rychle a přitáhly široký zájem kvůli jejich nízkým výrobním nákladům a přijatelným výkonům na velkých plochách a na flexibilních substrátech. [12]

Jedná se o trojpólovou součástku, aktivní prvek u OFET je tenká polovodičová vrstva, která je oddělena od hradlové elektrody tenkým izolačním dielektrikem. Proud tranzistoru je mezi zdrojem a odtokovými elektrodami, které jsou připevněny k polovodičové vrstvě v rovinném uspořádání. Mezera mezi zdrojovou a odtokovou elektrodou, tj. délkou kanálu L , je řádově 100 μm .

Tyto tranzistory jsou charakteristické tím, že mají alespoň jednu složku z organického materiálu (*kapitola 1.3.2*). Celková struktura OFET tranzistoru je zobrazena na *obr.1.8*. Při porovnání FET a OFET tranzistorů můžeme pozorovat menší stabilitu a pohyblivost nosičů náboje než u FET, avšak má výhodu v nižší ceně, biokompatibilitě a ohebnosti na flexibilních substrátech. [18]

Varianty konstrukčních uspořádání jsou znázorněny na *obr. 1.9*. Zvláštní konstrukční struktura je struktura s kontaktem / spodní branou (BC). Dále jsou zde definovány pojmy, které se sledují. Tyto pojmy jsou popsány v *kapitole 3*.



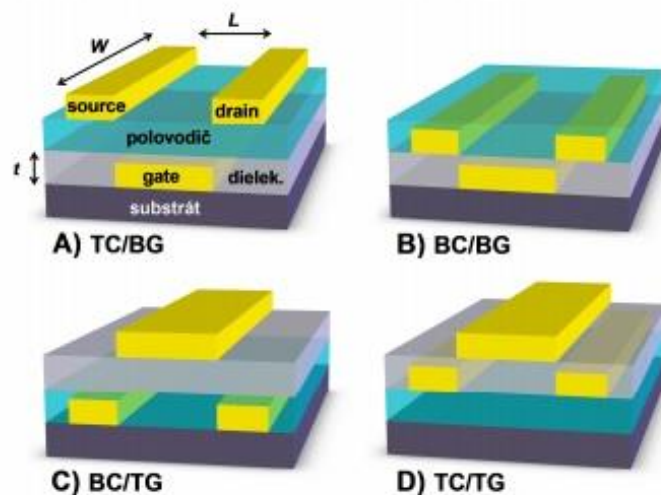
Obr.1.8 Struktura tranzistoru OFET. [18]

Horní kontakty, spodní gate (Top-Contact Bottom-Gate – TC/BG) – Nejběžnější typ OFET, který má velmi malý kontaktní odpor, vysokou pohyblivost a i vysoký budící proud.

Spodní kontakty, spodní gate (Bottom-Contact Bottom-Gate – BC/BG) – Toto uspořádání má potenciál pro levnější výrobu, je možné jej minimalizovat, jelikož dochází ke vstřikování náboje v blízkosti řídicí elektrody. Toto schéma je podrobněji vidět na (*obr. 1.9 (B)*).

Spodní kontakty, horní gate (Bottom-Contact Top-Gate – BC/TG) – Využívá se pro ambipolární režim OFET, kde je možnost využití elektronové i děrové vodivosti.

Horní kontakty, horní gate (Top-Contact Top-Gate – TC/TG) – Tato struktura umožňuje nanesení aktivní organické vrstvy přímo na povrch základního ohebného nebo pevného substrátu. [18]



Obr. 1.9 Základní varianty konstrukčních uspořádání organických tranzistorů. [18]

1.4.2 OTFT Tranzistory

Tenkvrstvé organické tranzistory (Organic Thin-Film Transistor – OTFT) jsou součástky využívající tenkých vrstev o tloušťce několik jednotek až stovek nanometrů. Pro výrobu je vždy jako první vybrán vhodný substrát a nanášení polovodičů je až poslední krok výrobního procesu. Tenkovrstvé organické součástky se dají rozdělit do dvou kategorií. První typ využívá planární strukturu součástek, druhý typ je tvořen sendvičovou strukturou součástek. Planární struktura se hojně využívá pro výrobu OFET tranzistorů a sendvičová struktura se využívá při výrobě OLED diod a organických solárních článků. OTFT je analogickým protějškem anorganického tranzistoru jak jeho konstrukcí, tak i jeho funkcí. Skládá se také ze tří elektrod, kde napětí na řídicí elektrodě ovlivňuje průtok elektrického proudu mezi zdrojovou a odtokovou elektrodou. Dva nejrozšířenější typy organických tenkovrstvých tranzistorů jsou OFET a OECT. V OFET je zdrojová elektroda S (Source) a odtoková elektroda D (Drain) uložena přímo na substrátu. Mezi těmito elektrodami je aktivní vrstva z organického polovodiče, od kterého je řídicí elektroda G oddělena vrstvou izolantu. Konstrukce OECT se příliš neliší od konstrukce OFET, v OECT je místo izolační vrstvy mezi vodivým kanálem a řídicí elektrodou použit elektrolyt. Je pozoruhodné, že vzdálenost mezi vodivým kanálem a řídicí elektrodou je měnitelná až do několika centimetrů. [19]

1.4.3 OECT tranzistory

OECT (organic electrochemical transistor) se skládá z polovodičového filmu (kanálu), který je obvykle vyroben z konjugovaného polymeru, který je v přímém kontaktu

s elektrolytem. Zdrojové a odtokové elektrody vytvářejí elektrický kontakt s kanálem, zatímco hradlová elektroda vytváří elektrický kontakt s elektrolytem. Elektrolyt může být kapalný, gelový nebo pevný.

Nejběžnější OECT jsou založeny na PEDOT:PSS. V tomto materiálu je organický polovodič PEDOT dopovaný sulfonátovými anionty PSS, čímž vznikne polovodič typu-P, a proto vykazuje vysokou vodivost. Proto při absenci napájecího napětí bude odtokový proud vysoký a tranzistor bude v zapnutém stavu. Když je na G připojeno kladné napětí, kationty z elektrolytu jsou vstřikovány do kanálu PEDOT:PSS, kde kompenzují sulfonátové anionty. To vede k vyčerpání PEDOTu a tranzistor dosáhne stavu vypnuto (rovnice 1.1).



OECT se liší od tranzistorů OFET tím, že mají elektrolyt. Ve druhém druhu zařízení ionty nepronikají do kanálu, ale spíše se hromadí v blízkosti jeho povrchu (nebo blízko povrchu dielektrické vrstvy, když je tato vrstva uložena na kanálu). To vyvolává akumulaci elektronického náboje uvnitř kanálu blízko povrchu. Naproti tomu v OECT se do kanálu vkládají ionty a elektronická hustota náboje se mění po celém rozsahu. V důsledku tohoto objemového spojení mezi iontovým a elektronickým nábojem vykazují OECT velmi vysokou transkonduktanci. Nevýhodou OECT je, že jsou pomalé, protože iontové náboje se musí dostat dovnitř a ven z kanálu, naopak výhodou je, že mají velmi malé kontaktní odpory, jež se nachází na hranách elektrod S a D. Mikroformované OECT vykazují časy odezvy řádově stovky mikrosekund. Naopak jejich přednostmi jsou jednoduchá výroba, miniaturizace. [12-13]

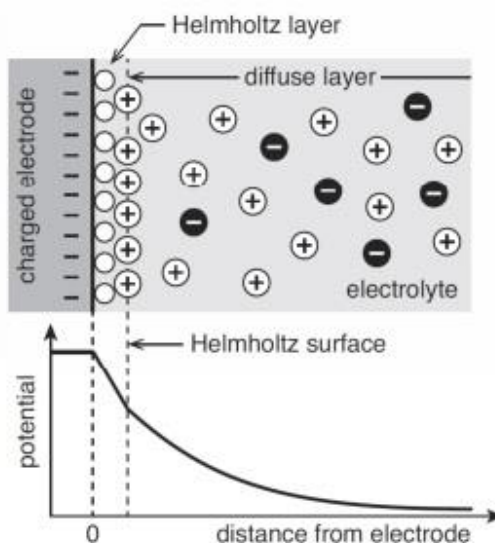
1.4.4 EGOFET tranzistory

EGOFET (Electrolyte-gated OFET) se liší od běžného OFET tím, že má jako izolátor hradla elektrolyt namísto dielektrické vrstvy. Provoz EGOFET je velmi podobný jako u běžného OFET, pouze s rozdílnými náboji polarizační charakteristiky izolátoru hradla. Přiložením negativního potenciálu k hradlu, povede na elektrodě k přerozdělení iontů uvnitř elektrolytu, kdy kationy migrují směrem k negativně nabitému hradlu a anionty směrem k polovodiči, který indukuje akumulované nosiče náboje polovodičového kanálu. [20]

1.4.5 EDLT tranzistory

Rozdíl potenciálů elektrolytu a elektrody způsobí nahromadění (akumulaci) náboje

na jejich rozhraní. Na straně elektrolytu se akumulují díry (nebo elektrony) a na straně elektrolytu se objeví ionty, které vykompenzují přechod, aby byl v rovnováze (Helmholtzova vrstva – na základě podobnosti v deskovém kondenzátoru). Toto uspořádání se nazývá elektrická nábojová dvouvrstva (electric double layer), z čehož plyne i název zmiňovaných tranzistorů. K popisu rozložení náboje v EDLT se používá Gouy-Chapman-Sternův model. Podle tohoto modelu je k povrchu těsně přiléhající vrstva protiontů, tzv. Sternova vrstva, je tvořena ionty vázanými převážně adsorpčními silami a společně s ionty vázanými na povrchu částice vytváří kompaktní vnitřní vrstvu. Další protionty, které jsou ve větší vzdálenosti od částice, jsou přitahovány elektrostatickými silami a jsou součástí difúzní vrstvy. Při pohybu částice s elektrickou dvojrůstkou vůči nepohyblivému disperznímu prostředí se kompaktní vrstva iontů s částicí pohybuje, kdežto vrstva difúzní se s částicí nepohybuje. Rozhraní oddělující pohyblivou a nepohyblivou část elektrické dvojrůstvy se nazývá pohybové rozhraní. Se zvyšující se vzdáleností od elektrody se snižuje koncentrace náboje, čili nastává potenciální spád, který vykazuje exponenciální pokles. (obr. 1.10). Tento tranzistor umožňuje dosáhnout velmi vysokých úrovní plošných kapacit v řádu jednotek až desítek $\mu\text{F}/\text{cm}^2$. [18]



Obr. 1.10 Uspořádání nábojové dvouvrstvy a vykazující exponenciální pokles.[18]

1.4.6 Použití nejběžnějších organických tranzistorů

- **OFET**

V dnešní době slouží jako hlavní součást levné a flexibilní elektroniky, demonstrují a nabízejí slibnou platformu pro řadu nových aplikací, obcházejí některá omezení anorganických materiálů a poskytují výkonově srovnatelné zařízení při výrazně snížených nákladech. [12]

- **OTFT**

OTFT jsou vhodné pro použití v biosenzorických aplikacích kvůli biokompatibilitě materiálů používané s prvky biologického rozpoznávání, jako jsou enzymy. [21-22]

- **OECT**

V současné době se směřují na intenzivní vývoj aplikací v bioelektronice, a ve velkoplošných elektronických zařízeních s nízkou cenou. Navíc jejich vysoká transkonduktance z nich dělá silné zesilovací převodníky. OECT byly již dříve použity k detekci iontů, metabolitů, DNA a patogenních organismů. Zajímavostí je, že se laboratorně pomocí nich podařilo zjišťovat epilepsii na potkanech. [23]

2 Metody charakterizace běžných tranzistorů

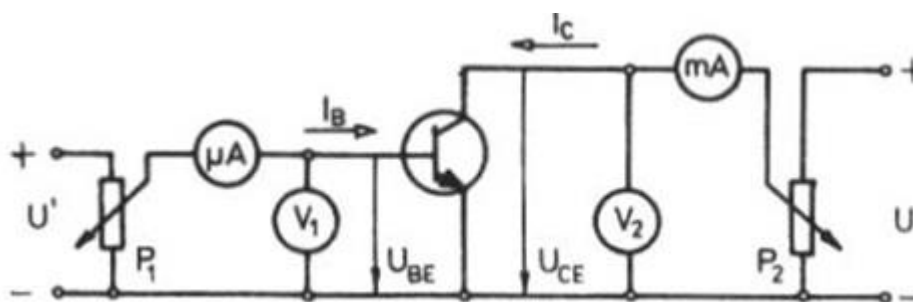
Ve druhé kapitole této práce budou představeny jednotlivé elektrické parametry pro charakterizaci bipolárních a unipolárních tranzistorů. Tato část bude popsána dle následujících zdrojů. [24-26]

2.1 Měření bipolárních tranzistorů

Ke zjištění elektrických vlastností bipolárních tranzistorů je nutné změřit jejich statické a dynamické vlastnosti, které potřebujeme pro analýzu tranzistoru. Tímto způsobem je možné zjistit hodnoty, které jsou uvedeny v katalogových listech.

2.1.1 Statické charakteristiky bipolárních tranzistorů

Chování tranzistoru je poměrně snadné zjistit pomocí jeho statických charakteristik, které určíme závislostí dvou veličin (napětí a proudu). Podmínkou je, aby třetí veličina, která ovlivňuje tuto charakteristiku, byla konstantní. Tyto charakteristiky se měří podle následujícího schématu (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Schéma zapojení pro měření statických charakteristik bipolárního tranzistoru. [27]

- **Díky statickým charakteristikám bipolárního tranzistoru můžeme určit:**
 - Přibližné ideální nastavení pracovního bodu
 - Určení mezních hodnot P_{max} , U_{max} , I_{max}
 - Průběh výstupního napětí v závislosti na vstupním
 - H-parametry tranzistoru
- **Statické charakteristiky tranzistoru (SE) jsou popsány ve čtyřech kvadrantech:**
 - Výstupní charakteristika naprázdno (kde I_C je proud přes kolektor, U_{CE} napětí mezi kolektorem a emitorem a I_B proud procházející přes bázi):

$$I_C = f(U_{CE}), I_B = konst. \quad (2.1)$$
 - Vstupní charakteristika nakrátko (kde I_B je proud protékající bázi, U_{BE} napětí

mezi bázi a emitorem a U_{CE} napětí mezi kolektorem a emitorem):

$$I_B = f(U_{BE}), U_{CE} = konst. \quad (2.2)$$

- Proudová převodní charakteristika nakrátko (kde I_C je proud protékající kolektorem, I_B proud procházející bázi a U_{CE} napětí mezi kolektorem a emitorem):

$$I_C = f(I_B), U_{CE} = konst. \quad (2.3)$$

- Zpětná napěťová převodní charakteristika naprázdno (kde U_{BE} je napětí mezi bázi a emitorem, U_{CE} napětí mezi kolektorem a emitorem a I_B proud procházející bázi):

$$U_{BE} = f(U_{CE}), I_B = konst. \quad (2.4)$$

- **H-parametry**

- vstupní impedance při výstupu nakrátko (kde U_1 představuje vstupní napětí, I_1 vstupní proud a U_2 napětí na výstupu):

$$h_{11} = \frac{U_1}{I_1} \text{ při } U_2 = konst. \quad [\Omega] \quad (2.5)$$

- zpětný napěťový činitel při vstupu naprázdno (kde U_1 představuje vstupní napětí, U_2 napětí na výstupu a I_1 vstupní proud):

$$h_{12} = \frac{U_1}{U_2} \text{ při } I_1 = konst. \quad [-] \quad (2.6)$$

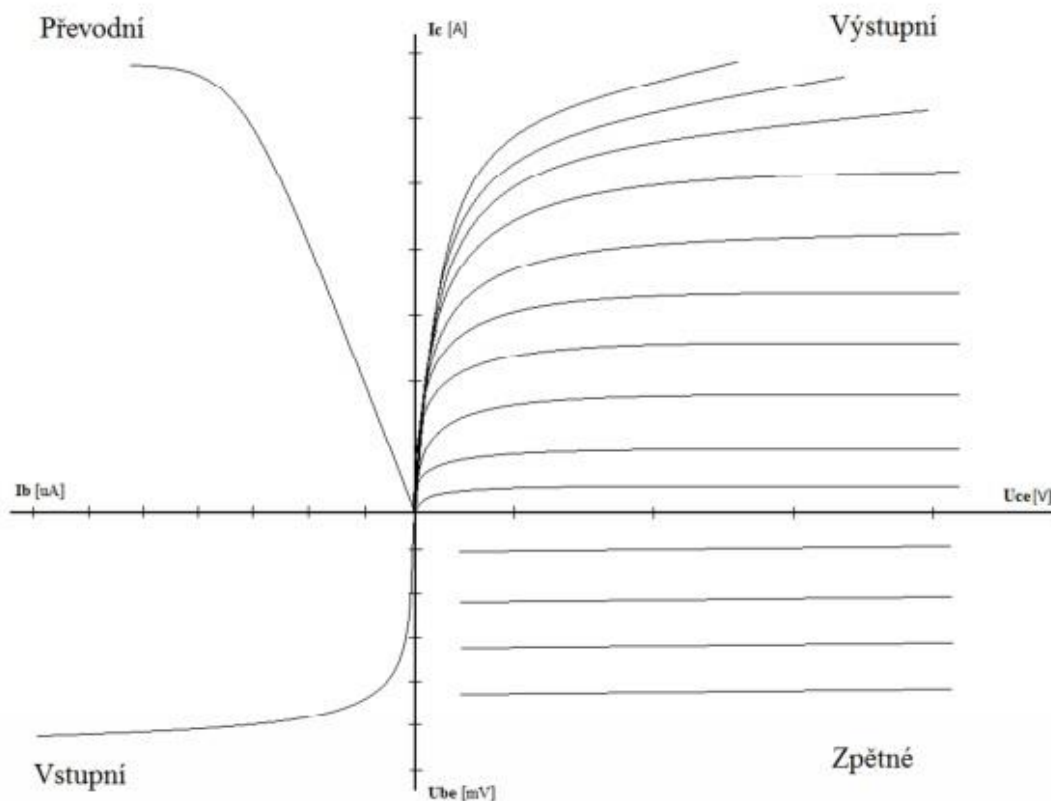
- proudový zesilovací činitel při výstupu nakrátko (kde I_2 představuje proud na výstupu, I_1 vstupní proud a U_2 napětí na výstupu):

$$h_{21} = \frac{I_2}{I_1} \text{ při } U_2 = konst. \quad [-] \quad (2.7)$$

- výstupní admitance při vstupu naprázdno (kde I_2 představuje proud na výstupu, U_2 napětí na výstupu a I_1 vstupní proud):

$$h_{22} = \frac{I_2}{U_2} \text{ při } I_1 = konst. \quad [S] \quad (2.8)$$

Na obr 2.2 je znázorněna typická čtyřkvadrantová charakteristika pro bipolární tranzistor, přičemž se většinou používá charakteristika prvního kvadrantu, tedy výstupní charakteristika, podle které je možné vysledovat například saturaci nebo kritický výkon tranzistoru. Ostatní charakteristiky se používají s menší četností z důvodu, že odečítání z nich je poměrně nepřesné, tudíž můžeme při výsledcích pracovat s chybou.



Obr. 2.2 Čtyřkvadrantová charakteristika bipolárního tranzistoru. [24]

2.1.2 Dynamické vlastnosti bipolárních tranzistorů

- **Mezní kmitočty bipolárního tranzistoru**

Při sledování kmitočtů sledujeme hlavně mezní kmitočet a tranzitní kmitočet. Mezní kmitočet nám udává frekvenci (rovnice 2.9), do které má tranzistor pokles o 3 dB. Tranzitní kmitočet určuje kmitočet (rovnice 2.10), při kterém není tranzistor schopen zesilovat proud, nebo pokud má proudové zesílení (β) rovno jedné. Mezní kmitočet je odvozen podle Giacolettova náhradního schématu (obr. 2.5).

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi C_{be} R_{be}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.9)$$

$$f_T = f * |\beta| \quad [\text{Hz}] \quad (2.10)$$

Kde C_{be} je kapacita mezi bází a emitorem a R_{be} je odpor mezi bází a emitorem.

- **Dynamický rozsah (DR) a dynamické napěťové zesílení (A_u)**

Dynamický rozsah je definován jako poměr maximální velikosti vstupního signálu ($U_{1\max}$) k minimální velikosti vstupního signálu ($U_{1\min}$), kdy při daném

oměru nedojde ke zkreslení signálu výstupního. Minimální velikost vstupního signálu musí být alespoň 10 dB nad úrovní šumu.

$$DR = \frac{U_{1max}}{U_{1min}} [-] \quad (2.11)$$

$$DR = 20 * \log\left(\frac{U_{1max}}{U_{1min}}\right) [dB] \quad (2.12)$$

Napětové zesílení vstupního střídavého signálu (A_u) je definováno při výstupu naprázdno jako:

$$A_u = \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta u_{BE}} [-] \quad (2.13)$$

- **Činitel harmonického zkreslení (Total Harmonic Distortion)**

Po průchodu harmonického signálu nelineárním členem (např. diodou, tranzistorem, zesilovačem) dojde k tzv. obohacení spektra. Z původní jedné spektrální čáry základního vstupního harmonického signálu, dojde po průchodu nelineárním prvkem k rozšíření spektra o další postranní spektrální čáry. Činitele harmonického zkreslení lze určit pomocí uvedených vzorců.

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 \dots}}{U_1} * 100 [\%] \quad (2.14)$$

$$THD = 20 * \log\left(\frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 \dots}}{U_1}\right) [dB] \quad (2.15)$$

Kde U_1 je efektivní hodnota první harmonické a U_{2-n} jsou efektivní hodnoty vyšších harmonických.

- **THD+N (Total Harmonic Distortion + Noise)**

Tato veličina se počítá obdobně jako již předchozí uvedená (rovnice 2.14 a 2.15), pouze se přidá šum ($U_{\text{šum}}$).

$$THD + N = 20 * \log\left(\frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_{\text{šum}}^2}}{U_1}\right) [dB] \quad (2.16)$$

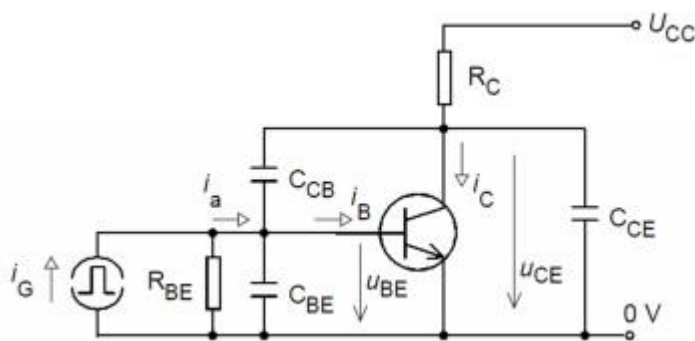
- **SINAD (Signal to Noise And Distortion ratio)**

Poměr celkového výkonu signálu k nežádoucím složkám.

$$SINAD = 20 * \log\left(\frac{P_{\text{signál}} + P_{\text{šum}} + P_{\text{zkreslení}}}{P_{\text{šum}} + P_{\text{zkreslení}}}\right) [dB] \quad (2.17)$$

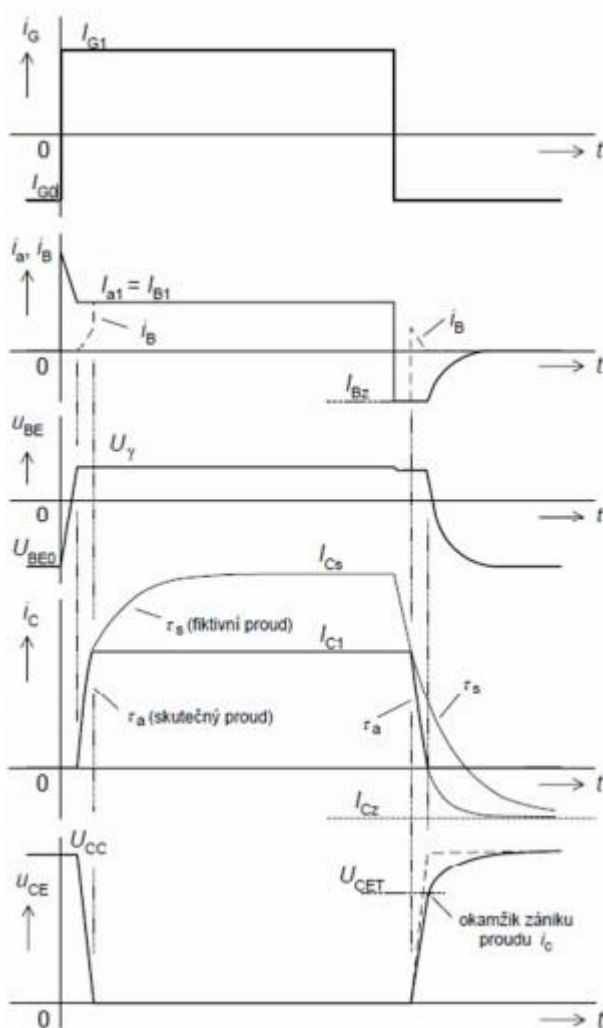
- **Tranzistor jako spínač**

Na modelu tranzistoru na obr 2.3 jsou popsány mezielektrodové kapacity.



Obr. 2.3 Bipolární tranzistor jako spínač pro měření dynamických vlastností. [24]

Jednotlivé časy charakterizující děje v tranzistoru jsou na (obr 2.4). Po příchodu čelní hrany impulzu z generátoru i_G , se začnou nabíjet vstupní kapacity C_{CB} (kapacita mezi kolektorem a bází) a C_{CE} (kapacita mezi kolektorem a emitorem). Doba, při které se nabíjejí vstupní kapacity a dochází ke zpoždění při otevírání tranzistoru pozvolným nárůstem napětí u_{BE} , se nazývá zpoždění při zapnutí (time delay). Při otevírání tranzistoru začíná téct kolektorový proud i_C . Ten však nejdříve začne nabíjet vstupní kapacitu C_{CB} a tranzistor tak pozvolna přechází do sepnutého stavu, jak to dovoluje nabíjení kapacity. Uplynulá doba, než tranzistor přejde do stavu saturace (úplného otevření tranzistoru), se nazývá doba čela (time rise). Na kolektoru je teď pouze zbytkové saturační napětí a tranzistor je zcela otevřen. Při příchodu sestupné hrany generátoru i_G , se nejdříve musí z báze odsát nahromaděný akumulovaný náboj, této době říkáme doba přesahu (time saturation). Po odsátí přebytečného náboje z báze se začne tranzistor zavírat. V téhle chvíli se kapacita C_{CB} začne vybíjet do báze a tímto proudem báze zpomalí zavírání tranzistoru. Této době vybíjení kapacity, než dojde k uzavření tranzistoru, říkáme doba týlu (time fall). Pokles napětí u_{CE} při sepnutí a nárůst při vypnutí tranzistoru je úměrný poklesu a nárůstu proudu kolektorem. Doba vypnutí tranzistoru bývá mnohem delší než doba jeho sepnutí. Vstupní a výstupní kapacity jsou v řádech [nF] a jsou společně s výše popsanými časy udávány v katalogu spínacích tranzistorů.



Obr. 2.4 Spínání tranzistoru. [25]

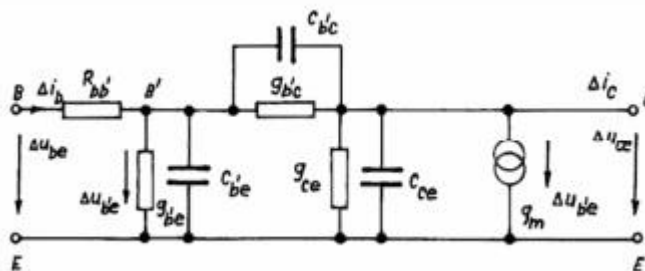
2.1.3 Linearizované modely bipolárního tranzistoru

Při použití tranzistoru jako zesilovače pracujícím se střídavým signálem o malé amplitudě, lze k jeho popisu využít linearizovaného obvodu - lineárního čtyřpólu (dvojhranu). Vztah mezi malým střídavým napětím (proudem) superponovaným na stejnosměrné napětí (proud), určující polohu pracovního bodu, lze popsat dvěma způsoby:

- pomocí linearizovaného Ebersova-Mollova modelu,
- pomocí diferenciálních čtyřpólových parametrů.

Při vyšších kmitočtech střídavého signálu se začnou projevovat setrvačné vlivy tranzistoru tj. vliv parazitních kapacit mezi hradly C, B a E. Tyto vlivy nejlépe popisuje Giacolettovo náhradní schéma (obr. 2.5).

Linearizované modely vycházející ze čtyřpólových parametrů s využitím klasické teorie čtyřpólů můžeme tranzistor popsat hybridními rovnicemi (obr. 2.6).

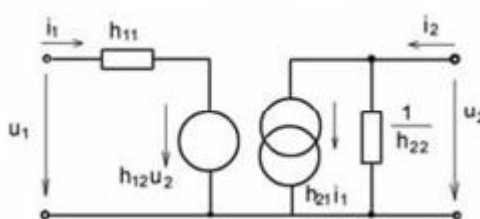


Obr. 2.5 Giaciolettovo náhradní schéma bipolárního tranzistoru. [24]

Pro toto schéma platí následující rovnice s h-parametry (definice h-parametrů je uvedena v rovnicích 2.1-2.4):

$$U_1 = I_1 h_{11} + U_2 h_{12} \quad (2.18)$$

$$U_1 = I_1 h_{21} + U_2 h_{22} \quad (2.19)$$



Obr. 2.6 Linearizovaný model pro h-parametry. [24]

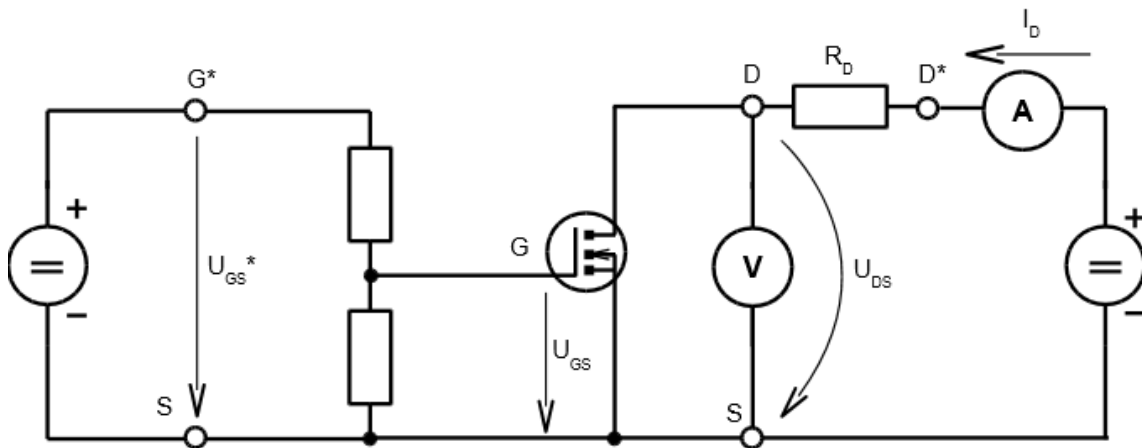
2.2 Měření unipolárních tranzistorů

Ke zjištění elektrických vlastností unipolárních tranzistorů je taktéž nutné změřit jejich statické a dynamické vlastnosti, které chceme pro jejich analýzu.

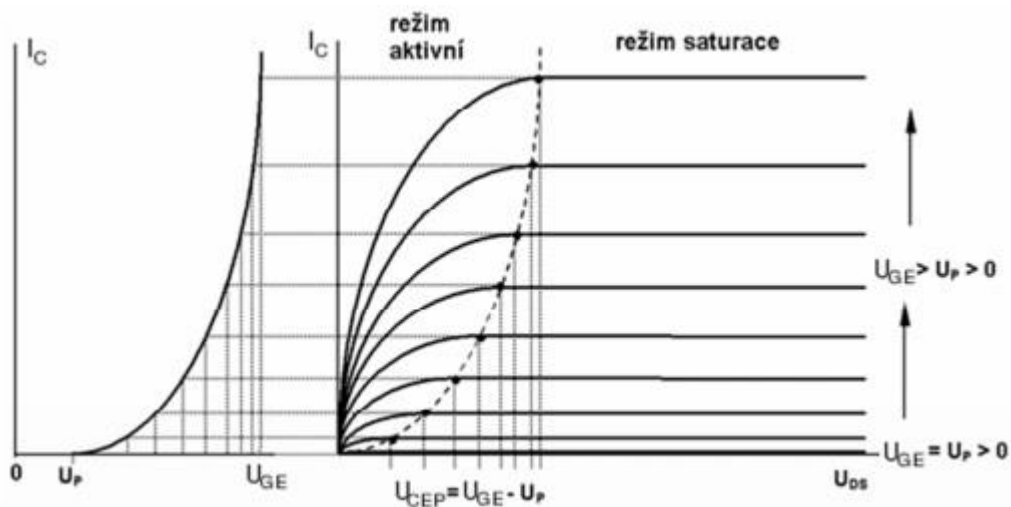
2.2.1 Statické charakteristiky unipolárních tranzistorů

Statické vlastnosti definují činnost aktivního zařízení pod vlivem aplikovaných provozních podmínek. Primárním zájmem jsou ty specifikace, které indikují vliv řídicího signálu na výstupní proud [27]. Jednotlivé charakteristiky již zmíněných součástek v kapitole 1 se mohou lišit. Možné schéma zapojení na obr. 2.7.

Pro charakterizaci jsem si vybral tranzistor MOSFET, který je svojí strukturou velmi podobný organickým tranzistorům, jehož statické charakteristiky jsou vidět na obr. 2.8.



Obr. 2.7 Schéma pro měření statických charakteristik unipolárního tranzistoru



Obr. 2.8 Statické charakteristiky MOSFET s indukovaným kanálem převzato z [25]

- **Stanovení velikosti odtokového proudu v různých režimech činnosti:**

$$\text{Aktivní režim: } \frac{i_D}{I_{Dsat0}} = 2 * \frac{u_{DS}}{U_P} * \left(\frac{u_{GS}}{U_P} - 1 \right) - \left(\frac{u_{DS}}{U_P} \right)^2 \quad (2.20)$$

$$I_{Dsat0} = \frac{W \mu_n C_i U_P^2}{2L} \text{ při } U_{GS} = 0 \text{ V [A]} \quad (2.21)$$

Kde i_D je odtokový proud, I_{Dsat0} odtokový saturační proud, u_{DS} napětí mezi odtokovou a zdrojovou elektrodou, u_{GS} napětí mezi hradlem a zdrojovou elektrodou, C_i je vstupní kapacita na jednotku plochy, L délka kanálu, W šířka kanálu a U_P je prahové napětí.

Hranice mezi aktivním a saturačním režimem:

$$u_{DS} = U_{DSsat} = u_{GS} - U_P \text{ [V]} \quad (2.22)$$

$$\text{Saturační režim: } i_D = I_{Dsat0} * \left(\frac{u_{GS}}{U_P} - 1 \right)^2 \text{ [A]} \quad (2.23)$$

- **Y – parametry**

- vstupní admitance (i_G je proud přes hradlo, zbylé veličiny popsány výše):

$$y_{11} = \frac{\Delta i_G}{\Delta u_{GS}} \text{ při } u_{DS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.24)$$

- zpětná převodní admitance:

$$y_{12} = \frac{\Delta i_G}{\Delta u_{DS}} \text{ při } u_{GS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.25)$$

- převodní admitance:

$$y_{21} = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \text{ při } u_{DS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.26)$$

- výstupní admitance:

$$y_{22} = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{DS}} \text{ při } u_{GS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.27)$$

2.2.2 Dynamické vlastnosti unipolárních tranzistorů

Vzhledem k tomu, že základní provozní režim pro zařízení FET se výrazně liší od běžných tranzistorových spojení, terminologie a specifikace jsou odlišné. Porozumění terminologii a vlastnostem FET je nezbytné pro vyhodnocení jejich srovnatelných měřítek ze specifikace katalogových listů. [28]

Na rozdíl od statických charakteristik se dynamické vlastnosti tranzistorů řízených elektrickým polem aplikují stejně na všechny FET. Podmínky dynamických charakteristik však do značné míry závisí na předpokládané aplikaci tranzistoru. [28]

- **Mezní kmitočty unipolárního tranzistoru**

Unipolární tranzistory jsou použitelné na vyšší frekvenční rozsah než bipolární tranzistory. To znamená, že mají větší šířku pásma, což je rozdíl mezi maximální a minimální frekvencí přenášeného signálu. Tranzistory MOSFET využívají frekvenci až 1 GHz. Dosahují tomu díky malé délce kanálu, což zkracuje čas průchodu nosičů náboje hradlem.

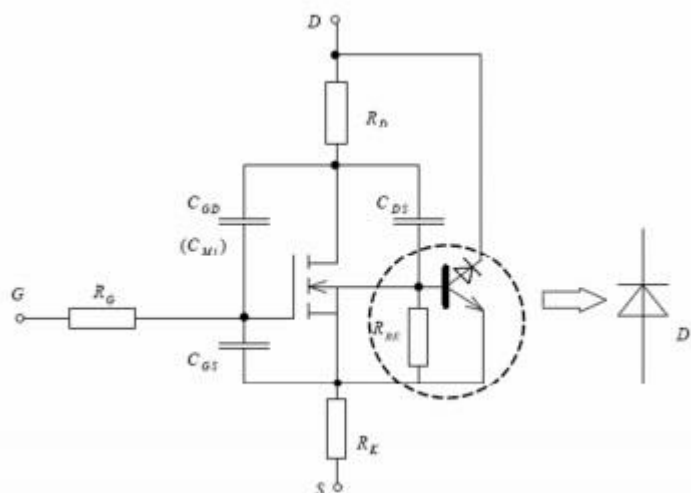
- **Činitel harmonického zkreslení (*Total Harmonic Distortion*)**

Měření THD je obdobné jako u bipolárního tranzistoru. Výstupní charakteristika unipolárního tranzistoru je téměř lineární, a tranzistor proto vykazuje malé nelineární zkreslení.

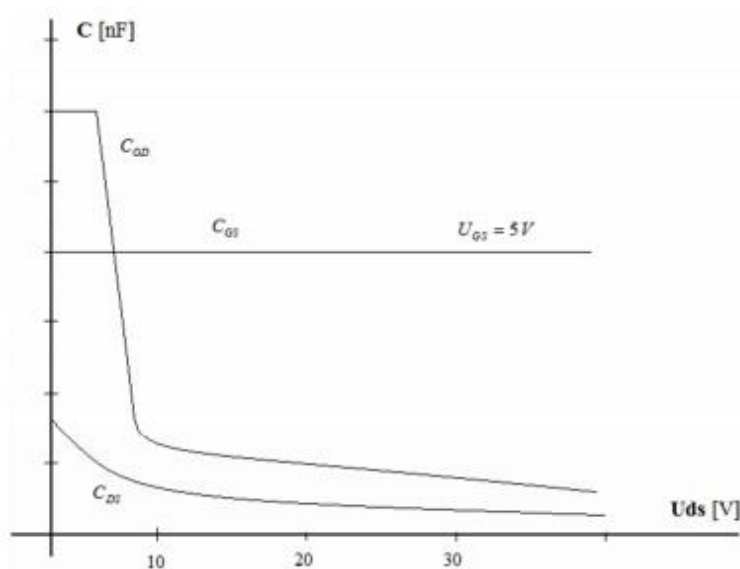
- **Unipolární tranzistor jako spínač**

Náhradní schéma tranzistoru pro zobrazení jeho dynamických vlastností je na *obr. 2.9*. Podobně jako u bipolárních tranzistorů má unipolární tranzistor

parazitní kapacity mezi elektrodami, kde C_{DS} (kapacita mezi odtokovou a zdrojovou elektrodou), C_{GS} (kapacita mezi hradlovou a zdrojovou elektrodou) a C_{GD} (kapacita mezi hradlovou a odtokovou elektrodou). V katalogových listech pro spínací tranzistory se objevují pojmy $C_{is} = C_{GS} + C_{GD}$ a $C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$ značící velikost vstupní a výstupní kapacity tranzistoru. Největší vliv na dynamické vlastnosti má tzv. “Millerova kapacita“ formálně shodná s C_{GD} . Její závislost na napětí U_{DS} je na obr. 2.10.



Obr. 2.9 Náhradní schéma pro měření dynamických charakteristik. [26]



Obr. 2.10 Změna kapacity MOSFET. [26]

2.2.3 Linearizovaný model MOSFET tranzistoru

Při zapojení linearizovaného modelu MOSFET tranzistoru (obr. 2.11) sledujeme

následující charakteristické veličiny:

- **Výstupní vodivost (g_d):**

$$g_d = \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \text{ při } U_{GS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.28)$$

- **Strmost hradla (transkonduktance, g_m):**

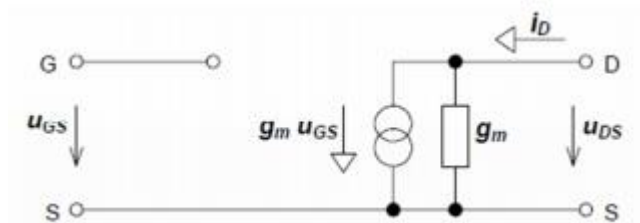
$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \text{ při } u_{DS} = \text{konst.} \quad [\text{S}] \quad (2.29)$$

- **Napět'ový zesilovací činitel (μ_g):**

$$\mu_g = \frac{g_m}{g_d} = - \frac{\partial u_{DS}}{\partial u_{GS}} \text{ při } i_D = \text{konst.} \quad [-] \quad (2.30)$$

- **Strmost hradla v saturačním režimu (g_{msat}):**

$$g_{msat} = \frac{2 \cdot I_{Dsat0}}{U_P} \left(\frac{u_{GS}}{u_P} - 1 \right) \quad [\text{S}] \quad (2.31)$$



Obr.2.11 Linearizovaný model MOSFET tranzistoru. [24]

2.3 Problémy a chyby měření

- **Při měření může dojít například k těmto problémům a chybám:**

- Hystereze

- Průraz tranzistoru

Při zatěžování tranzistoru může dojít ke dvěma typům průrazu. První druh průrazu je při zatížení vysokým napětím, kdy v oblasti prostorového náboje dochází k lavinové ionizaci, nemusí však dojít ke zničení. Druhý druh průrazu může vzniknout i při nižším výkonu než P_{max} . Tento průraz je tepelný. Vznikne nehomogenita struktury, zvýší se proudová hustota, poté se zvýší teplota, to má za důsledek vznik kladné zpětné vazby a vede k destrukci tranzistoru.

- Rušení přístrojů

Při měření tranzistorů může dojít šumům, které způsobují měřicí přístroje, přičemž může dojít ke zkreslení výsledných charakteristik.

- Nevhodné zvolení pracovního bodu.

Při nevhodném zvolení pracovního bodu může rovněž dojít ke zkreslení charakteristik. Pracovní bod tranzistoru je umístěn do takového místa výstupní charakteristiky, kde se tranzistor začíná otevírat.

- Odchylka přístroje

Při zvolení přístrojů s nižší třídou přesnosti než je doporučeno je možné získání nepřesných dat z měření.

3 Metody charakterizace organických tranzistorů

V této kapitole se popisuje charakterizace organických tranzistorů, která je popsána podle normy dostupné na IEEE. [29]

3.1 Testovací zařízení

Testování se provádí pomocí elektronického zkušebního zařízení s citlivostí měření, která je dostatečná k tomu, aby poskytla přesnost nejméně $\pm 0,1\%$ (minimální citlivost o více než tři řády pod očekávanou úrovní signálu). Například nejmenší proud přes organický tranzistor je často svodový proud. Pokud je svodový proud přibližně 1 pA (10^{-12} A), musí mít zařízení rozlišení 1 fA (10^{-15} A) nebo menší. Navíc díky velké ($> 1 \text{ G}\Omega$) impedanci, která se vyskytuje u organických zařízení, musí být vstupní impedance všech prvků zkušebního systému nejméně o tři řády větší než nejvyšší impedance v zařízení. Komerční polovodičové systémy, které mají schopnost charakterizovat organická zařízení, mají obvykle vstupní impedanční hodnoty $10^{16} \Omega$, což je doporučená minimální hodnota.

3.2 Požadovaná měření

- **Charakterizace organického tranzistoru vyžaduje nejméně tato níže uvedená měření:**
 - Křivky přenosu ($I_{DS} - U_{GS}$), podle kterých je možné předběžně určit veličiny jako je pohyblivost (μ) a prahové napětí (U_P).
 - Křivky $I_{DS} - U_{DS}$, které poskytují informace, kdy se tranzistor dostane do saturace a obecné informace o elektrickém výkonu. Tyto křivky slouží k určení, zda zařízení vykazuje chování podobné FET.
 - Křivky úniku na hradle ($I_{GS} - U_{GS}$), které charakterizují kvalitu dielektrického hradla a kvantifikují unikající proud z hradla do kanálu. Charakterizace unikajícího proudu je nutná ke zjištění, aby jeho velikost byla zanedbatelná vzhledem k velikosti odtokového proudu, takže lze měřit spolehlivé a užitečné vlastnosti zařízení a extrahovat klíčové parametry.

3.3 Doplnující měření

Tato měření jsou pouze doplňující měření k již výše uvedeným. Ale je dobré je vykonat z důvodu možného odlišného chování tranzistorů oproti očekávaným výsledkům.

- **Následující dodatečné měření se důrazně doporučuje:**

Rozptýlené kapacitní hodnoty C_{GD} (kapacita mezi hradlovou a odtokovou elektrodou) C_{GS} (kapacita mezi hradlovou a zdrojovou elektrodou). Hodnoty stísněných kapacit mají negativní vliv na rychlost přepínání zařízení a mohou ovlivnit elektrickou charakterizaci zařízení.

3.4 Důvody a výsledky každého typu měření

3.4.1 Měření přenosové charakteristiky

Přenosová měření ($I_{DS} - U_{GS}$) jsou nezbytná pro charakterizaci pohyblivosti (mobility) efektu pole, prahového napětí a poměru on/off (on/off ratio). Tato data jsou typicky nezbytná pro charakterizaci vlastností polovodičových přenosů. Transkonduktance se rovněž určuje z tohoto měření. Modely obvodů také obecně vyžadují alespoň jednu přenosovou křivku kromě výstupních dat V/A charakteristiky pro extrakci parametrů.

3.4.2 Měření výstupní charakteristiky

Výsledky měření výstupní charakteristiky ($I_{DS} - U_{DS}$) poskytují nejvyšší množství informací o výkonu tranzistoru z jediného měření. Zatímco obecně není přímé použití pro charakterizaci vlastností polovodičových přenosů, je nezbytné pro vývoj modelů zařízení pro simulaci a návrh obvodu.

3.4.3 Měření svodového proudu a jeho vliv na odtokový proud

Měření svodového proudu ($I_{GS} - U_{GS}$) je nutné pro zajištění dostatečného elektrického oddělení mezi hradlovou elektrodou a polovodičovým kanálem pro užitečnou funkci zařízení. Toto měření poskytuje údaje o únikových proudech, které by mohly narušit výkon tranzistoru. Dané měření vyžaduje, aby byly odtokové i zdrojové elektrody uzemněny ($U_{DS} = U_{SS} = 0V$), zatímco se měří I_{GS} . V ideálním případě by měl být průtok nulového proudu měřen od hradla ke kanálu, ale v praktických zařízeních by I_{GS} měla být dostatečně nižší než I_{DS} , zatímco zařízení je v provozu, tj. $I_{GS} < 0,001 I_{DS}$.

- **Aby se zajistilo, že svodový proud významně nevyváží naměřenou hodnotu odtokového proudu, musí být provedeno:**
 - Svodový proud, který se měří v celém rozsahu předpokládaných provozních hodnot v hradle a používá se pro přenosovou a výstupní charakteristiku.
 - Velikost svodového proudu hradla musí být minimálně o dva řády menší, než je

velikost vypouštěcího proudu v celém rozsahu provozu tranzistoru, s výjimkou rozsahu hradlových napětí, ve kterém je zařízení ve vypnutém stavu.

- V případě extrakce parametrů, jako je například zakřivení uložení přenosových dat pro extrakci pohyblivosti zařízení a prahové napětí, je přípustný počet významných čísel, které mohou být hlášeny, jsou vymezeny tím, o kolik řádů je únik hradla nižší než velikost vypouštěcího proudu.

3.5 Odchytky měření

Kvůli rozdílným kapacitním účinkům, pohyblivým iontovým nečistotám nebo jiným mechanismům je dokázáno, že zkreslení má vliv na posun napětí a poskytuje poněkud odlišné údaje. Výsledky těchto jevů se mohou pohybovat od jednoduchých posunů prahového napětí až na závažné odchytky od ideálního chování tranzistoru, jako je například zdánlivá pohyblivost závislá na napětí hradla nebo nedostatek saturační oblasti ve výstupní křivce. Určení parametrů, které jsou odvozeny z křivek proudu-napětí, jako je například pohybová účinnost pole a prahové napětí, mohou být těmito jevy výrazně ovlivněny.

- ***K určení závažnosti hystereze vyplývající z výše uvedených účinků se doporučuje:***
 - Provést každé měření dvakrát, nejprve z polohy "vypnuto" (rozsah napětí, při kterém je zařízení nejpravděpodobněji vypnuté), aby bylo zapnuto. Druhé měření se provádí od stavu "zapnuto" do stavu "vypnuto".
 - Charakterizovat hodnoty kmitavé kapacity za použití nejméně jedné frekvence pomocí napětí $1 V_{\text{rms}}$. Pokud má být použita pouze jedna frekvence, určí se charakterizovaná stratifikační kapacita při 1 kHz.

3.6 Určení a zhodnocení pohyblivosti zařízení

Aby se maximalizovala reprodukovatelnost, musí být uvedena technika použitá k extrakci hodnot mobilní interakce polem z údajů o charakterizaci. Hodnota mobility je uváděna v jednotkách cm^2/Vs , přičemž většina pohyblivých nosných polovodičových materiálů pochází z měření přenosové křivky vyrobeného zařízení. Pohyblivost pole je obvykle odvozena buď od nasycení, nebo od lineárních aproximací. V případě saturace to následuje po aproximaci (kde W je šířka kanálu, L je délka kanálu, C_i je vstupní kapacita na jednotku plochy a μ představuje pohyblivost):

$$I_D \approx \frac{W}{2L} * C_i \mu (U_{GS} - U_P)^2 \quad (3.1)$$

Typicky nalezením sklonu $I_{DS}^{1/2} - U_{GS}$ (přenos v nasycení) a řešení mobility. V případě lineární aproximace:

$$I_D \approx \frac{W}{L} * C_i \mu (U_{GS} - U_P) U_{DS} \quad (3.2)$$

V lineárním režimu lze pohyblivost vypočítat pomocí sklonu přenosové křivky a diferenciálu rovnice (rovnice 3.2 a 3.3). Při uvádění pohyblivosti pole se hodnota musí učinit v režimu, kde je $U_{DS} \ll (U_{GS} - U_P)$ (pro zařízení typu p). Pokud tranzistor vykazuje podstatnou závislost (větší než 10%) mobility na použitém hradlovém napětí, musí to být indikováno začleněním přenosového diagramu ukazujícího pohyblivost vynesenu na sekundární ose k odtokovému proudu.

$$\mu = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \frac{L}{WC_i U_{DS}} \quad (3.3)$$

3.7 Určení a zhodnocení poměru on/off

Aby se maximalizovala opakovatelnost, musí být uvedena technika použitá k určení hodnot poměru zapnuto/vypnuto z údajů o charakterizaci. Tento poměr je obecně uváděn jako poměr maximální ku minimální hodnotě odtokového proudu (I_{DS}) získané během měření přenosu. V literatuře je obecně zaznamenán maximální pozorovaný poměr on/off. Měly by být zveřejněny hodnoty U_{DS} a zařízení, které se používají k získání hlášeného poměru on/off.

3.8 Určení a zhodnocení dielektrické konstanty

Technika používaná k měření dielektrické konstanty izolátoru brány může mít významný dopad na získanou hodnotu. Následkem toho změny v dielektrické konstantě ovlivní extrahované hodnoty pro mobilitu zařízení a prahové napětí. Dielektrické měření se obvykle provádí metodou měření kapacitní rovnováhy, při níž se komplexní impedance měří při určené frekvenci. Dielektrická konstanta může být také určena jako funkce frekvence, zvláště pokud dielektrická konstantní hodnota se významně mění s frekvencí.

3.9 Zpracovaná data

Minimální informace, které jsou uváděny se všemi údaji o elektrické charakterizaci, jsou uvedeny v *tabulce 3.1*. *Tabulka 3.2* ukazuje přijatelné odchylky pro vykazování dielektrických vlastností. Kombinace jsou takové, že další dva parametry mohou být určeny výpočtem. Označení o těchto parametrech musí odpovídat terminologii, použití symbolů a jednotkám, jak je uvedeno v *tabulce 3.1* a *tabulce 3.2*. Musí být také ohlášena

environmentální zkouška a podmínky skladování.

Tab. 3.1 Seznam elektrických parametrů, které by měly být nahlášeny

Vlastnosti	Standartní symboly	Jednotky
Šířka kanálu	W	μm ($< 1 \text{ mm}$), mm ($\geq 1 \text{ mm}$)
Délka kanálu	L	μm
Teplota zařízení	T	$^{\circ}\text{C}$ nebo K
Relativní vlhkost prostředí	RH	%
Pohyblivost	μ	cm^2/Vs
Prahové napětí	U_P	V
On/Off poměr	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	-

Tab. 3.2 Přijatelné informace o dielektriku

Možnosti	Kapacita na jednotku plochy (C) [F/cm^2]	Tloušťka dielektrika (d) [μm , nebo nm]	Relativní dielektrická konstanta [-]	Frekvence měření (f) [Hz]
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	×	✓
3	✓	×	✓	✓
4	×	✓	✓	✓

3.10 Problémy

Problémy s organickými tranzistory jsou popsány podle následujícího zdroje. [30]

- *V organickém tranzistoru mohou vzniknout problémy způsobené:*
 - Problémy s kontaktem
 - Odpor kontaktů, který závisí na napájecím napětí
 - Povrchové náboje nebo dipóly rozhraní
 - Morfologie polovodičů
 - Drsnost povrchu izolátoru
 - Pohyblivé ionty v izolátoru nebo v polovodiči

- ***Tyto problémy lze pozorovat při měřeních tranzistorů jako:***
 - Pohyblivost závislá na napětí hradla
 - Nelineární chování v "lineárním režimu" (např. u OTFT)
 - Hystereze
 - Různé hodnoty pohyblivosti nosiče s měnící se morfologií polovodičů

4 Vlastní návrh charakterizace organických tranzistorů

V této kapitole je navržena metodika postupu při charakterizování vlastností organických tranzistorů, ze které by měly být patrné jednotlivé veličiny, podle kterých by mohlo být možné sestavit podobné tabulky veličin, které se objevují v katalogových listech. Využijeme zde jednotlivé poznatky z *kapitol 2 a 3*.

Již před tím, než se začne měřit, musíme zjistit, o jaký typ organického tranzistoru se jedná. Vzhledem k tomu faktu, že organické tranzistory jsou velmi citlivé na atmosférické podmínky, je nutné většinu druhů těchto součástek testovat ve vakuové komoře. Tato komora není nutná jen pro měření, ale i pro výrobu některých typů, které jsou zmíněny v této práci. Avšak OECT tranzistory jsou výjimkou, jelikož vykazují velmi dobrou stabilitu i v atmosférických podmínkách, což je jejich velká přednost. [18]

Dle normy [29] se doporučuje udávat environmentální údaje, při kterých je daná součástka měřena.

- **Udávají se tyto údaje:**

- Relativní vlhkost
- Složení vzduchu (procentuální obsah dusíku, kyslíku, popř. měření ve vakuu.)
- Okolní teplota
- Teplota zařízení (doporučuje se odchylka $\pm 0,1$ °C, nebo $\pm 0,1$ K)
- Doba měření

4.1 Měření statických charakteristik

U postupu měření statických charakteristik organických tranzistorů v atmosféře bych vycházel z měření statických charakteristik unipolárních tranzistorů, jde o měření výstupní a přenosové charakteristiky (*kapitola 2.2.1 a kapitola 3.2*). Z těchto charakteristik je možné zjistit další veličiny, jako je pohyblivost (mobilita), prahové napětí (U_P) a maximální výkon (P_{max}), avšak je nutné použití měřících přístrojů s větší přesností. Dále je potřeba mít k dispozici software na zpracování dat a přístroj na ukotvení měřené součástky s jehličkovými sondami, kterými lze polohovat ve všech osách, z důvodu velmi malých rozměrů daných tranzistorů.

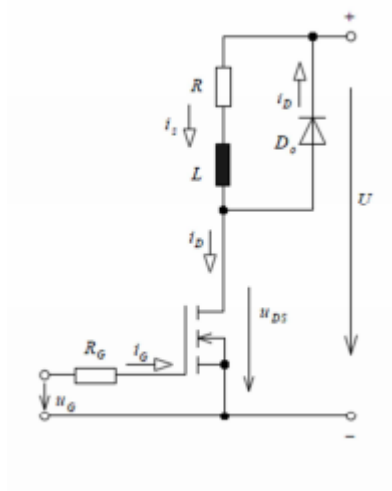
Při měření charakterizačních křivek se doporučuje malá velikost jednotlivých kroků, doporučuje se 25 a více naměřených hodnot, jelikož zvýšený počet hodnot má za následek přesnější tvarování křivek a větší toleranci vůči šumu a tím přesnější

extrakci parametrů. Počet hodnot na jednu křivku se pro každé měření udává jasným způsobem, kde jsou určeny tyto hodnoty: počáteční hodnota, velikost jednotlivých kroků a konečná hodnota. [30]

Při měření výstupní charakteristik se volí hodnoty tak, aby poskytovaly nejméně tři křivky. Hodnoty pro napájecí napětí se určí tím způsobem, aby byl prokázán provozní rozsah zařízení.

4.2 Měření dynamických charakteristik

Pro měření dynamických charakteristik bych postupoval dle kapitoly 2.2.2, pro zapojení jako spínače bych použil schéma tranzistoru MOSFET (obr. 4.1). Přičemž bych použil přístroje, které jsou uvedené v další části práce (kapitola 4.3).



Obr. 4.1 MOSFET jako spínač

4.3 Měřicí přístroje pro charakterizaci organických tranzistorů

V následujících částech jsou představeny přístroje, které splňují kritéria pro měření organických tranzistorů.

4.3.1 Měřicí přístroje

Jako měřicí přístroje jsem vybral přístroje od společnosti Keithley. Konkrétně Keithley SMU 2636B (obr 4.2), který splňuje kritéria normy (kapitola 3.1). Údaje o tomto přístroji jsou v tabulce 4.1.



Obr. 4.2 Měřicí přístroj Keithley 2636B. [31]

Tab. 4.1 Vlastnosti přístroje Keithley 2636B. [31]

Kanály	2
Výstupní napětí	0,1 μ V – 200 V (DC)
Minimální výstupní proud	0,1 fA
Maximální vstupní proud	1,5 A
Výkon	60 W
Výstupy	2
Rozlišení napětí, proudu	5 μ V, 0,02 pA
Vstupní napětí	Až 240 V (AC)

4.3.2 Software

Jako software pro zpracování dat je možné použít MATLAB, LABview a nebo například Keithley ACS Basic, který je úzce spojený s výše uvedeným měřicím přístrojem. ACS je flexibilní a interaktivní software určený pro charakterizaci polovodičových zařízení, test spolehlivosti, parametrický test a funkční test komponentů. Tento software podporuje celou řadu přístrojů Keithley, včetně Keithley SMU 2636B. [32]

4.3.3 Přístroj na ukotvení

Přístroj na ukotvení s jehličkovými sondami se používá k fyzickému získávání signálů polovodičového zařízení. Tato stanice využívá “manipulátory“, které umožňují přesné umístění tenkých jehel na povrchu polovodičového zařízení. Pokud je zařízení elektricky stimulováno, signál je získán mechanickou sondou a je zobrazen na osciloskopu nebo SMU. Mechanická sonda se často používá při analýze poruch polovodičových zařízení. [33] Tento přístroj je dostupný od firmy Jmicrotechnology, konkrétně model LMS 2709 (včetně malé vakuové pumpy).

Toto zařízení je na obr. 4.3. Základní informace o této “stanici“ jsou popsány v tabulce 4.2.



Obr. 4.3 Přístroj LMS 2709. [33]

Tab. 4.2 Základní parametry LMS 2709. [33]

Celková velikost	Výška 12“, šířka 12,5“ (30,5 cm, 31,72 cm)
LED osvětlovací kroužek	Variabilní intenzita
Binokulární stereofonní zvětšovací mikroskop	7-30X 4" Pracovní vzdálenost (10,16 cm)
Polohovací pohyb	X-Y-Z 0,5 inch. (1,22 cm)
Vakuové čerpadlo	Ano
Deska	7“x12“ (17,8 cm x30,5 cm)
Velikost sklíčidla	5,08 cm ²
Váha	9 kg

5 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření metodiky pro měření organických tranzistorů, z nichž by bylo možné jednotlivé tranzistory testovat a srovnávat. K tomu, abych mohl navrhnout metodiku charakterizace organických tranzistorů, bylo nutné si nastudovat jednotlivé druhy organických tranzistorů, jejich vlastnosti, struktury, použití a materiály, ze kterých se dané polovodičové součástky vyrábí.

Poté jsem si podrobněji nastudoval metody měření konvenčních tranzistorů, jejich statické a dynamické charakteristiky a jednotlivé veličiny, které jsou potřebné k jejich charakterizaci, a které se uvádí v katalogových listech pro co nejpodrobnější zjištění a chování v různých zapojeních. Dále jsem popsal nejčastější chyby měření, ke kterým může dojít a problémy, kterých by se bylo dobré vyvarovat.

Ve třetí části práce jsem se zabýval hlavní částí práce, kde jsem se seznámil s normou, podle níž jsem sepsal metody charakterizace organických tranzistorů. V této kapitole jsem také popsal, které křivky a veličiny je nutné znát pro zjištění chování organických tranzistorů.

Ve čtvrté části jsem využil poznatky dvou předcházejících kapitol, navrhl jsem zapojení, při kterých by bylo možné tyto tranzistory charakterizovat a přístroje, které odpovídají daným kritériím.

Po nastudování jednotlivých materiálů a normy, z nichž jsem vycházel, jsem došel ke zjištění, že organické tranzistory vykazují podobné vlastnosti tranzistorům MOSFET, ovšem kromě OECT je potřeba provádět měření ve vakuové komoře, jinak by došlo k zániku tranzistorového efektu, jelikož ostatní organické tranzistory jsou náchylné na atmosférické podmínky. Dále je potřebné dle normy použít měřicí přístroje s větší přesností, a také použití přístroje pro ukotvení s jehličkovými sondami vzhledem k rozměrům organických tranzistorů.

Subjektivně bych toto téma zhodnotil velkým přínosem pro mé znalosti a myslím si, že organické tranzistory mají velkou budoucnost například ve SMART textiliích.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] Bipolar Transistor Tutorial, The BJT Transistor. *Basic Electronics Tutorials and Revision*, Aspencore [cit. 2017-02-20] Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_1.html
- [2] Tranzistory. *Elektro ČVUT* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://elektro.fs.cvut.cz/ZS/stare0304/2141015.pdf/papezova/Tranzis_slejdy.pdf
- [3] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009 [cit. 2017-03-02]
- [4] *UČEBNÍ TEXTY PRO VÝUKU PŘEDMĚTU MIKROELEKTRONICKÉ SYSTÉMY* [online]. Tonhauser [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/tr.html>
- [5] ONLINE ELECTRICAL ENGINEERING STUDY SITE. *Electrical 4 U* [online]. 2011 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/jfet-or-junction-field-effect-transistor/>
- [6] *Bakalářský projekt - Úvod* [online]. In: . [převzato 2017-03-04]. Dostupné z: <http://bcprace.sweb.cz/>
- [7] MOSFET - Working principle. *ONLINE ELECTRICAL ENGINEERING STUDY SITE* [online]. 2011 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/mosfet-working-principle-of-p-channel-n-channel-mosfet/>
- [8] *Elektronika* [online]. Ing. Pavel Vylegala, 2006 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektronika.pdf
- [9] *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics* [online]. Abdus Sattar, IXYS Corporation [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://www.ixys.com/Documents/AppNotes/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf
- [10] *Výkonové polovodičové součástky* [online]. EDUCON ZČU, 2005 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2005022501>
- [11] *What are transistors made of?* [online]. Prof. Bernd-Peter Paris, 1998 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://thalia.spec.gmu.edu/~pparis/classes/notes_101/node99.html
- [12] SINNO, Hiam. *Polyelectrolyte-Gated Organic Field Effect Transistors – Printing and Electrical Stability* [online]. Norrköping, 2013 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:654914/FULLTEXT01.pdf>. Disertační práce.
- [13] KLAUK, Hagen. *Organic thin-film transistors* [online]. Německo, 2010 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.fkf.mpg.de/409299/Klauk-ChemSocRev-2010-2643.pdf>

- [14] VALENTINI, Luca. *Flexible transistors exploiting P3HT on paper substrates and graphene oxide films as gate dielectrics: proof of concept* [online]. Perugia, Itálie, 2013 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1302/1302.1291.pdf>
- [15] SKOTHEIM, T. A. *Handbook of Conducting Polymers*. 2. New York: CRC press, 1997. [cit. 2017-04-13] ISBN 0-8247-0050-3.
- [16] F. MOHN, G. MEYER a P. LILJEROTH. The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy. [cit. 2017-04-13] *Science*. 2009, **325**(5944).
- [17] WOLFGANG, Kaim a Moscherosch MICHAEL. The coordination chemistry of TCNE, TCNQ and related polynitrile π acceptors. *Organometallic Chemistry*. [cit. 2017-04-13] 1994, (24).
- [18] PRETL, Silvan. *Heterostruktury na bázi organických vodivých materiálů*. Plzeň, 2015. Disertační práce. ZČU Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D. [cit. 2017-04-15]
- [19] KUMAR, Brijesh, Yuvraj Singh NEGI a Brajesh Kumar KAUSHIK. *Organic Thin Film Transistors: Structures, Models, Materials, Fabrication, and Applications: A Review* [online]. 2014 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/262904291_Organic_Thin_Film_Transistors_Structures_Models_Materials_Fabrication_and_Applications_A_Review
- [20] KIM, Se Hyun, Kihyon HONG, Wei XIE, Keun Hyung LEE, Sipei ZHANG, Timothy P. LODGE a C. Daniel FRISBIE. Electrolyte-gated transistors for organic and printed electronics. *Advanced Materials* [online]. 2013, roč. 25, č. 13, ISSN 09359648. [cit. 2017-04-16] Dostupné z: doi:10.1002/adma.201202790
- [21] COOLING, Nathan, Daniel ELKINGTON, Warwick BELCHER, Xiaojing ZHOU a Paul C. DASTOOR. Organic Thin-Film Transistor (OTFT)-Based Sensors. *Electronics* [online]. 2014, (3), 234-254 [cit. 2017-04-16]. DOI: :10.3390/electronics3020234. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8f47/85d2c106c5bd9628770fcdf04844e1b3ba4b.pdf>
- [22] Reese, Colin; Roberts, Mark; Ling, Mang-Mang; Bao, Zhenan (2004). "Organic thin film transistors". *Mater. Today*. **7** (9): 20.[cit. 2017-04-16] doi:10.1016/S1369-7021(04)00398-0
- [23] *Material matters: Materials for Bioelectronic and Biomedical Applications* [online]. Milwaukee, 2013, (8) [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.441.4958&rep=rep1&type=pdf#page=4>
- [24] BOUŠEK, J., *Elektronické součástky*. Elektronický učební text. Brno: FEKT, VUT v Brně. [cit. 2017-

04-20]

[25] CHLEBIŠ, P., Výkonová Elektronika I. Elektronický učební text. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava. [cit. 2017-04-20]

[26] KOLOUCH, J., BIOLKOVÁ, V., Impulzová a číslicová technika. Elektronický učební text. Brno: FEKT, VUT v Brně. [cit. 2017-04-20]

[27] *Bipolární tranzistory* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z:
<http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt013.htm>

[28] *Field Effect Transistors in Theory and Practice* [online]. NXP, 1993 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z:
<http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/application-notes/AN211A.pdf>

[29] *IEC/IEEE Test methods for the characterization of organic transistors and materials* [online]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 [cit. 2017-05-02]. ISBN 978-0-7381-8685-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6617657/>

[30] HADZIIOANNOU, Georges a George G. MALLIARAS. *Semiconducting Polymers: Chemistry, Physics and Engineering*. 2. Wiley-vch, 2006. [cit. 2017-05-11] ISBN 978-3-527-31271-9.

[31] Keithley 2636B. *Distrelec* [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/jednotka-pro-mereni-zdroje-2x30-keithley-2636b/p/11070329>

[32] Keithley ACS. *Tektronix* [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.tek.com/keithley-semiconductor-test-systems/keithley-automated-characterization-suite-acs-software>

[33] LMS 2709-01.pdf. *Jmicrotechnology* [online]. [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: http://www.jmicrotechnology.com/LMS-2709_01.pdf

