

Elektronika, otázky na státnice

30. června 2002

# Obsah

<b>1 Polovodičové diody: PN a Schottkyho, vlastnosti, parametry, náhradní schéma použití</b>	<b>7</b>
1.1 Druhy diod . . . . .	7
1.1.1 Usměrnovací diody . . . . .	7
1.1.2 Zenerovy diody . . . . .	7
1.1.3 Vysokofrekvenční a spínací diody . . . . .	7
1.1.4 Stabilizační diody . . . . .	8
1.1.5 Kapacitní diody . . . . .	8
1.1.6 Tunelová dioda . . . . .	8
1.1.7 PIN dioda . . . . .	9
1.1.8 Schottkyho dioda . . . . .	9
1.2 Průrazy diod . . . . .	10
1.2.1 Zenerův průraz . . . . .	10
1.2.2 Lavinový průraz . . . . .	10
1.2.3 Tepelný průraz . . . . .	10
1.2.4 Povrchový průraz . . . . .	10
1.3 Konstrukce diod . . . . .	10
1.3.1 Hrotová dioda . . . . .	10
1.3.2 Dioda s přivařeným hrotem . . . . .	10
1.3.3 Plošná slitinová dioda . . . . .	11
1.3.4 Plošná difuzní dioda . . . . .	11
1.3.5 Difuzní dioda . . . . .	11
1.3.6 Planární dioda . . . . .	11
<b>2 Bipolární tranzistory</b>	<b>12</b>
2.1 Zapojení tranzistoru jako dvojbranu . . . . .	12
2.1.1 Společná báze . . . . .	12
2.1.2 Společný emitor . . . . .	12
2.1.3 Společný kolektor . . . . .	12
2.2 Stejnoseměrné charakteristiky tranzistoru v zapojení SE . . . . .	12
2.3 Nastavení a stabilizace pracovního bodu . . . . .	13
2.4 Konstrukce a typy tranzistorů . . . . .	13
2.4.1 Výroba . . . . .	13
2.4.2 Rozdělení tranzistorů podle výkonu . . . . .	14
2.5 Modely tranzistoru . . . . .	14
2.5.1 Ebers-Mollův model . . . . .	14
2.5.2 Formální náhradní obvod tranzistoru . . . . .	15

<b>3</b>	<b>Tranzistory řízené polem: typy kanálů, funkce. MOSFET, jeho parametry, náhradní schéma a použití. IGBT – struktura, funkce, vlastnosti a použití</b>	<b>16</b>
3.1	Tranzistory řízené polem . . . . .	16
3.2	MISFET . . . . .	16
3.2.1	MOSFET s indukovaným kanálem . . . . .	17
3.2.2	MOSFET s vodivým kanálem . . . . .	17
3.3	Tenkovrstvý tranzistor . . . . .	17
3.4	IGBT – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Tyristory, triaky: struktura, funkce, parametry, zapojení a použití</b>	<b>18</b>
4.1	Diak . . . . .	18
4.2	Tyristor . . . . .	18
4.2.1	Závěrný stav . . . . .	19
4.2.2	Blokovací stav . . . . .	19
4.2.3	Propustný stav . . . . .	19
4.2.4	Vypínání tyristoru . . . . .	19
4.3	Triak . . . . .	20
4.4	Vypínací GTO tyristor . . . . .	20
4.5	IGCT (integrated gate-commutated thyristor) . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Svítlivé diody a lesery: principy činnosti, provedení, vlastnosti, vlastnosti, použití</b>	<b>22</b>
5.1	Optoelektrické pojmy . . . . .	22
5.2	LED . . . . .	23
5.3	Lasery . . . . .	23
5.3.1	Podmínky pro stimulovanou emisi . . . . .	23
5.3.2	Polovodičový laser . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Fotocitlivé prvky, principy, funkce, vlastnosti, použití</b>	<b>25</b>
6.1	Fotorezistor . . . . .	25
6.2	Fotodioda . . . . .	25
6.2.1	Solární články . . . . .	26
6.2.2	Fotodioda v komunikacích . . . . .	26
6.3	Fototranzistor . . . . .	26
6.4	Fototyrisotr . . . . .	26
6.5	Fotonka, fotonásobič . . . . .	26
<b>7</b>	<b>Displeje: LED, LCD, principy funkce, vlastnosti a použití. Projekční systémy</b>	<b>28</b>
7.1	S malou hustotou zobrazované informace . . . . .	28
7.1.1	S malým počtem předem připravených znaků . . . . .	28
7.1.2	Segmentový systém . . . . .	28
7.1.3	Bodové matice soustavy bodů . . . . .	28
7.2	S velkou hustotou zobrazované informace . . . . .	28
7.2.1	Elektroluminiscenční diody . . . . .	28
7.2.2	Segmentovky . . . . .	28
7.2.3	Kapalné krystaly . . . . .	29
7.2.4	Bodové systémy . . . . .	29

<b>8 IO analogové: operační zesilovače, stabilizátory napětí, výkonové zesilovače. Vlastnosti a použití. Různá zapojení operačního zesilovače (integrátor, tvarovač, oscilátor)</b>	<b>31</b>
8.1 Klasifikace integrovaných obvodů . . . . .	31
8.2 Operační zesilovače . . . . .	31
8.2.1 Ideální a reálný OZ . . . . .	32
8.2.2 Použití OZ . . . . .	32
8.3 Stabilizátory napětí . . . . .	32
8.4 Výkonové zesilovače . . . . .	32
8.4.1 Koncové komplementární zesilovače . . . . .	32
8.4.2 Kvazikomplementární zesilovače . . . . .	32
<b>9 IO logické: realizace různými technologiemi – základní funkce, parametry a použití</b>	<b>33</b>
9.1 Základní typy . . . . .	33
9.1.1 Bipolární technologie . . . . .	33
9.1.2 Unipolární technologie . . . . .	34
9.1.3 NMOS technologie . . . . .	34
9.2 Kombinační obvody . . . . .	34
9.3 Sekvenční obvody . . . . .	34
9.3.1 Klopné obvody . . . . .	34
9.3.2 Posuvné registry . . . . .	34
<b>10 Polovodičové paměti, základní typy, realizace, princip, funkce a vlastnosti.</b>	<b>35</b>
10.1 Prvky s nábojovou vazbou . . . . .	36
<b>11 Usměrňovače pro napájecí zdroje (jednoduché, dvojcestné, můstkové, s nárazovou tlumivkou, zdvojovače, násobiče)</b>	<b>37</b>
11.1 Usměrňovače . . . . .	37
11.1.1 Jednocestný usměrňovač . . . . .	37
11.1.2 Dvoucestný usměrňovač . . . . .	37
11.1.3 Můstkový usměrňovač . . . . .	37
11.1.4 Usměrňovač s nárazovou tlumivkou . . . . .	37
11.2 Násobiče napětí . . . . .	37
11.2.1 Zdvojovač napětí . . . . .	37
11.2.2 Násobič napětí . . . . .	37
<b>12 Booleova algebra, minimalizační metody (mapy, systematické postupy, minimalizace, Patrickova funkce)</b>	<b>38</b>
12.1 Booleova algebra . . . . .	38
12.2 Minimalizační metody . . . . .	39
12.2.1 Karnaughovy mapy . . . . .	39
12.2.2 Quine-McCluskeyho metoda . . . . .	39
12.2.3 Patrickova metoda . . . . .	39
<b>13 Kombinační a sekvenční logické funkce, konstrukce sekvenčních posloupností pomocí kombinačních obvodů D, JK, T (např. děličky)</b>	<b>40</b>
13.1 Kombinační obvody . . . . .	40
13.2 Sekvenční obvody . . . . .	40

13.2.1	Klopný obvod RS . . . . .	40
13.2.2	Klopný obvod RS-T . . . . .	40
13.2.3	Klopný obvod D . . . . .	40
13.2.4	Klopný obvod JK . . . . .	40
13.2.5	Klopný obvod T . . . . .	40
<b>14</b>	<b>Dvojkový doplněk, aritmetické operace realizované ve dvojkovém doplňku</b>	<b>41</b>
14.1	Sčítání . . . . .	41
14.2	Násobení a dělení dvěma . . . . .	42
<b>15</b>	<b>Realizace kombinačních a sekvenčních obvodů pomocí multiplexerů, dekodérů a pevných pamětí</b>	<b>43</b>
15.1	Multiplexer . . . . .	43
15.2	Demultiplexer . . . . .	43
15.3	Pevná paměť . . . . .	43
<b>16</b>	<b>Diskretizace signálu v čase a kvantování v amplitudě, podmínky uchování informace, převodníky a jejich charakteristiky</b>	<b>44</b>
16.1	Diskrtizace v čase . . . . .	44
16.2	Kvantování v amplitudě . . . . .	44
16.3	Podmínky uchování informace . . . . .	44
16.4	Převodníky a jejich charakteristiky . . . . .	44
<b>17</b>	<b>Lineární časově invariantní systémy, spojitě a diskrétní vztahy mezi výstupním a vstupním signálem (ve spektrální i časové oblasti)</b>	<b>45</b>
17.1	Odezva LTIS na některé speciální signály . . . . .	45
17.1.1	Odezva na Dirakov impuls . . . . .	45
17.1.2	Odezva na jednotkový skok . . . . .	45
17.1.3	Odezva na vstupní sinusový signál . . . . .	45
17.2	Vztahy mezi vstupním a výstupním signálem . . . . .	45
17.3	DLTIS . . . . .	46
<b>18</b>	<b>Kódování zpráv bez rušení, kódování s nadbytečností, detekční a korekční kódy</b>	<b>48</b>
18.1	Jednotky . . . . .	48
18.1.1	Jednotky pro měření informace . . . . .	48
18.1.2	Entropie diskrétních zpráv . . . . .	48
18.1.3	Entropie spojitých zpráv . . . . .	49
18.1.4	Informační kapacita . . . . .	49
18.2	Kódování bez rušení . . . . .	49
18.2.1	Střední výkon . . . . .	49
18.2.2	Počet úrovní . . . . .	49
18.2.3	Huffmanovo kódování . . . . .	49
18.2.4	Fanovo kódování . . . . .	49
18.3	Kódování s nadbytečností . . . . .	49
18.3.1	Hamingova kódová vzdálenost . . . . .	50
18.3.2	. . . . .	50

<b>19 Systematické a cyklické kódy, generující a kontrolní polynomy</b>	<b>51</b>
19.1 Systematické kódy . . . . .	51
19.2 Cyklické kódy . . . . .	51
<b>Rejstřík</b>	<b>52</b>

# Kapitola 1

## Polovodičové diody

### 1.1 Druhy diod

#### 1.1.1 Usměrňovací diody

Jsou navrhovány a konstruovány tak, aby vykazovaly v přímém směru minimální hodnotu diferenciálního odporu i při vysokých hodnotách proudu  $I_F$  a v závěrném směru co největší hodnotu odporu. U výkonových diod se kromě běžných parametrů udává i maximální hodnota špičkového opakovatelného napětí  $U_{RRM}$ , při kterém lze ještě diodu provozovat. Přitom je třeba si uvědomit, že vždy platí  $U_{RRM} < U_{R(BR)}$ .

#### 1.1.2 Zenerovy diody

Zenerovy diody jsou navrhovány a konstruovány tak, aby závěrná část VA charakteristiky měla ostře vyjádřené průrazné napětí  $U_{R(BR)}$ . Pracovní oblast těchto diod leží v oblasti elektrického nedestruktivního průrazu, kdy se při velkých změnách proudu mění hodnota Zenerova napětí  $U_Z$  jen velmi málo. S ohledem na skutečnost, že vodivost polovodičů je silně závislá na teplotě, zahrnujeme její vliv na chování součástek pomocí *teplotního součinitele*, definovaného vztahem

$$K_Z = \frac{\Delta U}{\Delta \vartheta} \cdot \frac{100}{U} \quad [\%; \text{K}^{-1}].$$

Teplotní součinitel pro oblast závěrných napětí může být jak kladný, tak záporný, resp. roven nule. Lze zhruba říci, že tam, kde převládá Zenerův mechanismus průrazu, tj. pro  $U_Z < 6 \text{ V}$  je  $K_Z < 0$ .

Pracovní oblastí Zenerových diod rozumíme VA charakteristiku v závěrném směru. Z průběhu VA charakteristiky Zenerovy diody je zřejmé, že diferenciální odpor v její pracovní oblasti je velmi malý.

Zenerova dioda je křemíková plošná dioda se slitinovým nebo difuzním přechodem, jejíž závěrná část charakteristiky se vyznačuje ostrým zlomem při Zenerově napětí. Charakteristika v přímém směru je shodná s charakteristikou běžné polovodičové diody. Prahové napětí je 0,70 až 0,72 V. Pracovní oblast leží v oblasti elektrického nedestruktivního průrazu, nesmí však překročit maximální ztrátový výkon  $P_Z$ .

Zenerův jev se uplatňuje pouze na velmi tenkých přechodech, příslušné napětí diod je do 6 V.

#### 1.1.3 Vysokofrekvenční a spínací diody

Uvedené diody se používají v zapojeních, která pracují na vysokých kmitočtech nebo v impulzním režimu. Proto musí vykazovat velmi krátkou hodnotu zaotavovací doby  $t_{rr} < 500 \text{ ns}$ , z čehož vyplývá hodnota bariérové kapacity  $C_b$  řádově pF. S ohledem na rozsah přenášených kmitočtů je třeba, aby

tyto diody vykazovaly malou hodnotu kapacity přechodu PN v nepřímém směru a zároveň nízkou hodnotu difuzního napětí. Uvedené podmínky musí být splněny v případě požadavku detekce, resp. usměrnění VF signálu o malé hodnotě amplitudy.

#### 1.1.4 Stabilizační diody

Využívají se tunelového nebo lavinového průrazu v závěrném směru. Dynamický odpor závisí na stabilizovaném napětí. Teplotní koeficient u tunelového průrazu je záporný (snižuje se šířka zakázaného pásma), u lavinového průrazu kladný (zmenšuje se počet nosičů). Teplotní koeficient může být nulový – mezi oběma typy průrazů. Při přechodu lavinový průraz – šum – šumové diody, při vyšším napětí klesá.

#### 1.1.5 Kapacitní diody

##### Variakpy

Provozní napětí je omezeno z jedné strany malým napětím v přímém směru a z druhé strany průrazným napětím přechodu. Rozsah pracovních napětí bývá od  $-1$  V od  $-30$  V. Těmto hodnotám odpovídá rozsah kapacit od 20 až 100 pF do 2,5 až 10 pF. Poměr maximální a minimální kapacity se pohybuje v rozmezí 2,5 až 6, u speciálních až 20. Pro výrobu se používá nejčastěji křemík, pro vysokofrekvenční varikapy Ge nebo GaAs.

Varikap mění hodnotu kapacity v závislosti na ss. napětí. Přiváděné amplitudy vf. signálu jsou relativně malé, takže změna kapacity je prakticky lineární. Používají se místo ladících kondenzátorů v rozhlasových a televizních přijímačích a lze je zapojovat v oscilátorech pro doladování.

##### Varaktory

Varaktory pracují s velkým signálem, takže dochází k velké změně kapacity. Vzhledem k nelinearitě vznikají vyšší harmonické složky. Stejnoseměrné předpětí se zpravidla nepřivádí. Vyrábějí se i planárně-epitaxní technologií. Rozsah kmitočtů 30 MHz až 10 GHz. V současné době se užívají pro parametrické zesilovače, násobiče kmitočtu, pro ladění Gunnových a tranzistorových oscilátorů. Varaktor musí mít malý tepelný odpor. Varaktro lze provozovat i jako varikap (obráceně to neplatí).

#### 1.1.6 Tunelová dioda

Podle japonského fyzika se nazývá též Esakiho. Vyrobená ze silně dotovaných polovodičů (degradovaných), koncentrace příměsí ( $10^{25}$ ), velmi tenká ochuzená oblast (řádově 10 nm). Fermiho hladina se nachází mimo zakázaný pás (v polovodiči N ve vodivostním pásu a v polovodiči P v zakázaném pásu). Zároveň energetické úrovně příměsí (akceptorů a donorů) vytvářejí pásy, které splývají s dovolenými pásy energií. Šest druhů proudů – proudy majoritních a minoritních nosičů, tunelové proudy (podmíněny malou šířkou zakázaného pásu a silným elektrickým polem [ $10^8$  V/m]). Na charakteristice oblast se záporným diferenciálním odporem – využívá se ke generování a zesilování VF signálu. Rychlé ustavení tunelového proudu (prochází na rozíl od normálních nosičů téměř rychlostí světla  $\Rightarrow$  až 100 GHz), nízký šum (nízkoohmový materiál při výrobě). Široký rozsah pracovních teplot ( $-200$  až  $150$  °C) (negativní diferenciální odpor není závislý na teplotě a na frekvenci závisí jen málo). Je méně citlivá na radioaktivní záření. Problém zapouzdření – parazitní indukčnosti přívodů. Přechod se vytváří slitinovou technologií (plocha přechodu bývá  $0,2$  mm<sup>2</sup>, celková kapacita desítky pF). Vzhledem k velkým proudovým hustotám se kapacita neuplatní. Obtížné vytvořit velkou koncentraci nosičů – používá se germanium, kterém má poměr vrcholového a důlového proudu 5:1 až 15:1, AsGa dává



nejdelší oblast záporného diferenciálního odporu (poměr 20:1 až 65:1). Křemík se nepoužívá, protože má poměr 3:1.

Zmenšíme-li u tunelové diody koncentraci příměsí polovodičů obou typů, můžeme měnit tvar VA charakteristiky. Dochází ke zmenšování poměru vrcholového a důlového proudu, až postupně vymizí oblast záporného diferenciálního odporu. Tak dostaneme *inverzní diodu*, která je vhodná k usměrňování malých napětí (několik desetin V) o vysokých kmitočtech.

### 1.1.7 PIN dioda

Užívá se v oblasti centimetrových vln jako řízený odpor nebo spínač. Skládá se ze dvou silně legovaných oblastí  $P^+$  a  $N^+$  a oblasti vlastního (intrinzického) polovodiče I. Pro funkci diody je rozhodující vlastnost vrstvy I.

Přiloží-li se na PIN diodu napětí v přímém směru, dojde k injekci nosičů do obou konců oblasti I a její odpor se zmenšuje v závislosti na procházejícím proudu. Vzhledem ke značné časové konstantě rekombinace (asi  $1 \mu s$ ) a velké době potřebné k extrakci těchto nosičů z vrstvy I nestačí se při vyšších kmitočtech oblast I vyprázdnit v průběhu záporné půlperrody. Proto se při harmonickém průběhu vř. napětí ustálí střední hodnota nosičů v oblasti I a dioda z vysokofrekvenčního hlediska představuje nízkou impedanci, ve velkém rozsahu nezávislou na přenášeném výkonu. Při závěrně polarizované PIN diodě dojde k odčerpání náboje z objemu vrstvy I a vytvoří se oblast prostorového náboje (tloušťka závisí na přiloženém napětí). Dioda se chová jako kondenzátor, jehož hodnota klesá. Přivedeme-li vř. napětí, nestačí se vrstva I v průběhu kladné půlperrody zaplnit nosiči a dioda vykazuje vysokou impedanci s malou závislostí na přivedeném výkonu.

PIN diody se obvykle vyrábějí z křemíku. Základ tvoří vrstva I, do níž se difundují nebo implantují vrstvy  $N^+$  a  $P^+$ .

### 1.1.8 Schottkyho dioda

Schottkyho dioda je součástka, která využívá usměrňovací vlastnost přechodu MN (kov-polovodič). Velkou výhodou tohoto přechodu je, že v něm nedochází k injekci minoritních nosičů náboje. Vedení proudu je realizováno pouze majoritními nosiči, což přináší řadu výhod. Schottkyho přechody mají v přímém směru menší úbytky napětí než přechod PN. Z polovodiče N přecházejí do kovu tzv. horké elektrony z vrcholu energetické bariéry, které v kovu ztrácejí přebitek své energie. To předurčuje Schottkyho diody pro zpracování signálů s vysokými kmitočty.

Pro výrobu Schottkyho diod se nejčastěji používá křemík nebo GaAs. Základ struktury tvoří destička silně dotovaného polovodiče  $N^+$ . Na ní se epitaxi nanese vrstva typu N. Kontakt kov-polovodič se vytváří napařováním. Epitaxní slabě dotovaná vrstva zajišťuje diodě dobré závěrné vlastnosti, silně dotovaná vrstva pak dobrý ohmický kontakt a malý sériový odpor.

Schottkyho diody se používají v aplikacích pro velmi vysoké frekvence, kde nahrazují hrotové diody, proti nimž mají lepší mechanickou pevnost, reprodukovatelnost při výrobě, menší šum a vyšší závěrné napětí. Vzhledem k rychlým spínacím časům a malému napětí v průchozím směru jsou Schottkyho diody užívány ve spínacích s dobou sepnutí jednotky ns i menší, jako ochranné prvky a jako součástky rychlých logických integrovaných obvodů. Malé napětí v přímém směru umožňuje využívat Schottkyho diod ve výkonové technice jako usměrňovače a spínače s větší energetickou účinností, menšími rozměry a hmotností než klasické diody. Jedním z nedostatků je menší závěrné napětí (průrazné napětí 10 až 150 V).

## 1.2 Průrazy diod

### 1.2.1 Zenerův průraz

Tunelování elektronů z valenčního pásu z oblasti P do vodivostního pásu v oblasti N. Podmínky: malá hloubka závěrné vrstvy (zvýšená koncentrace příměsí), intenzita elektrického pole musí dosáhnout kritické hodnoty, za přechodem musí být volná hladina pro tunelování. U germaniových diod 4,5 až 7 V, u křemíkových 20 V. Zenerův průraz má záporný teplotní součinitel.

### 1.2.2 Lavinový průraz

Nárazová generace nosičů v závěrné vrstvě. Multiplikační koeficient  $M = \frac{I_R}{I_S}$ , závisí na průrazném napětí nárazové generace. Lavinový průraz má kladný teplotní součinitel.

Se zvětšováním závěrného napětí vzrůstá rychlost minoritních elektronů (Si diody). Po dosažení určitého kritického napětí je jejich kinetická energie tak velká, že letící elektron je schopen ionizovat atom. Počet takto uvolněných elektronů roste geometrickou řadou, aniž by se napětí dále zvyšovalo (jde o lavinovou ionizaci krystalické mřížky). Dochází k němu na širokých přechodech, kde je velká pravděpodobnost srážky elektronu s atomem během průletu přechodem.

### 1.2.3 Tepelný průraz

Zahřátí přechodu ztrátovým výkonem. Určujícím faktorem je proud. Rostou ztráty  $\rightarrow$  teplota roste  $\rightarrow$  zmenšení odporu  $\rightarrow$  zvětšení závěrného proudu.

### 1.2.4 Povrchový průraz

Způsobený nečistotami na povrchu diody, které způsobí zvětšení koncentrace poruchových stavů. K zabránění tohoto se používá zlepšené zapouzďení.

## 1.3 Konstrukce diod

### 1.3.1 Hrotová dioda

Na kovový hrot wolframového drátku se přivede impulz (až 1 A) v přímém směru, který způsobí vytvoření oblasti P v destičce N o poloměru 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Vlastnosti takové diody jsou dány malou plochou přechodu – malá bariérová kapacita (desetiny pF), průrazné napětí 2 až 50 V, propustný proud do 100 mA, frekvence do 150 MHz. Použití: detekce VF signálu, směšování VF signálu. Dnes se nahrazují Schottkyho diodami.

### 1.3.2 Dioda s přivařeným hrotem

Používá se germanium. K substrátu vodivost N se přidá zpravidla zlatý nebo hliníkový drátek průměru 50 až 100  $\mu\text{m}$ . Elektrickým výbojem (impulzem) se nataví styk drátku a destičky – utvoří se slitina, vznikne mikroplošná dioda. Plocha přechodu je 3 až 5  $\times$  větší než u hrotové diody, dioda má menší šum. Závěrná část charakteristiky obsahuje prudký zlom v oblasti 100 V. Dioda snese větší propustné proudy (stovky mA) při úbytku napětí na diodě  $U_F = 0,5 \div 0,9$  V. Bariérová kapacita jednotky pF. Používá ještě v některých spínacích a logických obvodech.

### 1.3.3 Plošná slitinová dioda

Germaniový podklad vodivosti N, P legované iridiem. Při teplotě 500 °C vznikne slitina germania a india. Vytvoří se stupňovitý přechod PN. Plocha přechodu je ještě větší než u předchozích dvou typů, je tedy větší i bariérová kapacita (desítky pF). Závěrné napětí až 250 V, větší proudové hustoty až  $10^6$  A/m<sup>2</sup>). Malé úbytky napětí (do 0,8 V). Použití pro usměrňování malých střídavých napětí, střední výkony.

### 1.3.4 Plošná difuzní dioda

Křemíkový základní materiál vodivosti N, difuzí se vytvoří plošný přechod PN. Výchozí materiál je nízkohmový, epitaxní vrstva vysokohmová, pak přechod. Diody PIN. Propustný proud závisí na odvodu tepla, hustota proudu  $2 \cdot 10^6$  A/m<sup>2</sup>, proud 200 A. Průrazné napětí 1500 až 2000 V. Úbytek napětí v propustném směru 1 až 1,2 V. Použití u výkonových usměrňovačů.

### 1.3.5 Difuzní dioda

Část přechodu se odleptá, čímž klesne bariérová kapacita. Teplo se odvádí základnou diody. Mesa diody (difuzní epitaxní) – usměrňovací.

### 1.3.6 Planární dioda

Maskovaná difuze do okénka maskovací vrstvy (SiO<sub>2</sub>). Podklad N, nadifundování P, ochranná vrstva SiO<sub>2</sub>. Lze měnit vlastnosti v širokém rozmezí. Malá plocha přechodu – rychlé spínací prvky s malým odporem báze.

## Kapitola 2

# Bipolární tranzistory

### 2.1 Zapojení tranzistoru jako dvojbranu

#### 2.1.1 Společná báze

Toto zapojení vykazuje malý vstupní odpor (desítky až stovky  $\Omega$ ), velký výstupní odpor (stovky  $k\Omega$ ). Má malé proudové zesílení (těsně menší než 1) a střední napěťové zesílení (desítky až stovky). Výkonové zesílení je tedy desítky až stovky. Výhodou tohoto zapojení je vysoký mezní kmitočet  $f_\alpha$ . Fázový posun mezi napětím vstup-výstup i proudem vstup-výstup je nulový. Malý zbytkový proud (maximálně  $\mu A$ ), malé saturační napětí ( $\rightarrow 0$ ). Mění nízkou impedanci na vysokou.

#### 2.1.2 Společný emitor

Zapojení má vstupní odpor stovky  $\Omega$  až  $k\Omega$ , výstupní odpor je desítky  $k\Omega$ . Střední napěťové i proudové zesílení (desítky až stovky), velké výkonové zesílení (sta až tisíce). Nízký mezní kmitočet  $f_\beta = (1 - \alpha_N)f_\alpha$ . Větší zbytkový proud (desítky až stovky  $\mu A$ ), větší saturační napětí (1 V i více). Fáze napětí vstup-výstup  $180^\circ$ , fáze proudu se nemění.

#### 2.1.3 Společný kolektor

Vysoký vstupní odpor, nízký až střední výstupní odpor. Napěťové zesílení o něco méně než 1, proudové zesílení desítky až stovky (závisí na proudu). Nízký mezní kmitočet. Zbytkový proud větší (desítky až stovky  $\mu A$ ), větší i saturační napětí (1 V i více). Fázový posun proudu o  $180^\circ$ , fáze napětí se nemění. Mění impedance z vysoké na nízkou.

### 2.2 Stejnoseměrné charakteristiky tranzistoru v zapojení SE

Rozlišujeme charakteristiky vstupní, výstupní a převodní napěťovou či proudovou. Absolutní hodnota poměru  $\left| \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|$  při  $U_{CE} = konst$  udává stejnosměrný proudový zesilovací činitel nakrátko. Platí

$$I_C = I_{CE0} + \Delta I_C = I_{CE0} + h_{21E} \Delta I_B = I_{CE0} + h_{21E} I_B,$$

neboť  $\Delta I_B - I_B = 0$ .  $I_{CE0}$  je zbytkový proud tranzistoru. Z rovnice vyplývá, že proudový zesilovací činitel

$$h_{21E} = \frac{I_C - I_{CE0}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B},$$

neboť zbytkový proud lze vždy proti hodnotě  $I_C$  zanedbat ( $I_{CE0} < 100 \text{ nA}$ ,  $I_C \gg 1 \text{ mA}$ ).

### Výstupní charakteristika (I. kvadrant)

Na výstupních charakteristikách je možné sledovat *mezní přímkou*, do které spadají společné části charakteristik při nízkých hodnotách  $U_{CE}$ . To znamená, že na tranzistoru v zapojení SE nemůže nikdy existovat menší napětí, než je omezeno mezní přímkou a osou  $I_C$ . Minimální možné napětí  $U_{CE}$  se nazývá *saturační napětí*  $U_{CES}$ . Musíme však mít na paměti, že toto napětí je funkcí  $I_B$  (s rostoucí hodnotou  $I_C$  roste i hodnota  $U_{CES}$ ).

### Proudová převodní charakteristika (II. kvadrant)

Protože průběh málo závisí na napětí  $U_{CE}$ , udává se zpravidla jen pro jedinou hodnotu  $U_{CE} = konst.$  Charakteristika neprochází počátkem, ale protíná osu  $I_C$  ve výšce odpovídající hodnotě  $I_{CE0}$ . Z této charakteristiky lze odečíst hodnotu  $h_{21E}$ .

### Vstupní charakteristika (III. kvadrant)

Charakteristika, narozdíl od výstupní charakteristiky, vychází z hodnoty napětí  $U_{BE0}$ . Toto napětí vzniká na emitorovém přechodu při odpojené bázi ( $I_B = 0$ ) průtokem proudu  $I_{CE0}$ . Zbytkový proud vyvolává na emitorovém přechodu spád napětí, který se musí na svorkách B a E objevit. Teprve když napětí  $U_{BE} > U_{BE0}$ , může do báze vtékat proud  $I_B$ . S ohledem na činnost tranzistoru je charakteristika  $I_B = f(U_{CE})$  charakteristikou diody v přímém směru (narozdíl od charakteristiky výstupní  $I_C = f(U_{CE})$ , která s ohledem na polaritu kolektorového napětí je charakteristikou diody v závěrném směru). Z průběhu vstupní charakteristiky je vidět, že i na ní lze získat hodnotu napětí  $U_{BE} = 0$ . To je případ odpovídající zkratované bázi, kdy proud báze  $I_B$  teče ven z tranzistoru.

### Napěťová převodní charakteristika (IV. kvadrant)

Popisuje vliv změn napětí  $U_{CE}$  na změnách napětí  $U_{BE}$  při konstantním proudu  $I_B$ . Jak naznačuje jejich průběh, je tento vliv zanedbatelný a proto ve většině případů se tyto charakteristiky do osového kříže nezakreslují.

## 2.3 Nastavení a stabilizace pracovního bodu

## 2.4 Konstrukce a typy tranzistorů

### 2.4.1 Výroba

#### Technologie výroby tažením

Tažení monokrytstalu z taveniny, kam se přidávají příměsi. Vzniknou tak plynulé lineární přechody. Ze vzniklé tyčinky se vyříznou tranzistory.

#### Slitinový tranzistor

Na destičku germania se nanese z obou stran iridium a při teplotě 600 °C se vytvoří slitina do určité hloubky. Vytvoří se stupňovitý přechod. Vznikne bezdriftový tranzistor (šířka báze 15  $\mu\text{m}$ ). Řádově pro 10 MHz, 100 mW.

### Elektrochemické leptání

Snaha snížit šířku báze (kvůli lepším VF vlastnostem). Destička Ge se z obou stran leptá solí india, současně působí napětí příslušné polarity. Naleptá se na  $5\ \mu\text{m}$  tloušťky. Elektrochemicky se nanese vrstva iridia – pod povrchem vznikne inverzní vrstva. Pro 70 až 100 MHz, 2 mW.

### Difuze příměsí

Do homogenní destičky s malým obsahem příměsí se přidává opačná příměs. Vrstva vzniklá první difuzí tvoří bázi.

### Epitaxní růst

Vytváření vrstev s rozdílnou koncentrací příměsí než původní materiál. Dělalí se tak spíše přechody na stejný typ (P-P<sup>+</sup>, N-N<sup>+</sup>).

### Iontová implantace

Vrstva požadovaného tvaru. Částice urychlovány napětím až 500 kV. Při běžné teplotě.

## 2.4.2 Rozdělení tranzistorů podle výkonu

### NF – malý výkon

Do několika stovek mW. Germaniové slitinovou technologií, křemíkové planárně-epitaxní technologií.

### NF – střední výkon

Výkon do 1,5 W. Germaniové slitinovou technologií, křemíkové dvouepitaxní technologií.

### NF – velký výkon

Podle velikosti proudu plocha přechodu. Kolektorové napětí, tepelný odpor. Kolektor spojen se základnou – chladič.

### VF

Z křemíku planárně-epitaxní technologií. Parametry mají komplexní charakter, jsou závislé na frekvenci. Kapacita mezi kolektorem a bází je nejškodlivější (užívá se zapojení SB), ovlivňuje rezonanční kmitočet výstupního obvodu.

## 2.5 Modely tranzistoru

### 2.5.1 Ebers-Mollův model

Topologie vychází ze skutečnosti, že se bipolární tranzistor při odpojené bází chová jako dvě diody se spojenými anodami, jejichž katody tvoří kolektorovou a emitorovou elektrodu. Vzhledem k technologické odlišnosti (velmi vysoká dotace emitorové vrstvy) a účelovém geometrickém uspořádání (šířka bázové vrstvy je menší než středná volná dráha minoritních nosičů náboje) se po připojení napětí mezi bázy a emitor projeví *tranzistorový jev*.

Rovnice pro tranzistor v zapojení SB jsou

$$\begin{aligned}I_E &= I_1 - \alpha_I I_2 \\I_C &= \alpha_N I_1 - I_2,\end{aligned}$$

kde  $\alpha_N$  je proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení SB a  $\alpha_I$  je inverzní proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení SB.

### 2.5.2 Formální náhradní obvod tranzistoru

## Kapitola 3

# Tranzistory řízené polem

### 3.1 Tranzistory řízené polem

Jsou označovány zkratkou FET (field effect transistor). Narozdíl od bipolárních tranzistorů je unipolární tranzistor ovládán příčným elektrickým polem. Užívá se struktura typu MOS (metal oxide semiconductor). Takováto struktura se skládá z polovodiče, na němž je vytvořena tenká izolující vrstva nečastěji z oxidu opatřená kovovou řídicí elektrodou. Jako nosná podložka (substrát) vlastního systému tranzistoru slouží destička monokrystalického materiálu, zpravidla křemíku o vodivosti P. V ní jsou v určité vzdálenosti od sebe (řádově jednotky až desítky  $\mu\text{m}$ ) vytvořeny silně dotované oblasti, vytvářející se substrátem přechody PN. Jeden je vždy polarizován do přímého směru a zastává funkci emitoru E a druhý polarizovaný do závěrného směru přebírá funkci kolektoru C. Řídící kovová elektroda G (hradlo) je od polovodiče oddělena tenkou izolační vrstvou, nečastěji tvořenou  $\text{SiO}_2$ .

Není-li G vůči E resp. C aktivováno elektrickým nábojem ( $U_{GE} = 0$ ), odpovídá „dráha“ emitor-kolektor sériovému zapojení dvou PN přechodů. Při polarizaci struktury napětím  $U_{CE}$  prochází strukturou pouze malý zbytkový proud  $I_0$  kolektorového přechodu ( $U_{CE} > 0$  a pro potenciál substrátu platí  $0 \leq V_P \leq V_C$ ). Působením napětí  $U_{GE} > 0$  se indukuje v oxidové vrstvě vázaný náboj, který zapříčiní vznik vrstvy inverzní vodivosti na rozhraní polovodič-oxid. To znamená, že koncentrace minoritních nosičů náboje je větší než majoritních ( $p_P < n_P$ ). Tímto kanálem prochází proud mezi E a C. Velikost procházejícího proudu je závislá na hloubce kanálu (ta je funkcí velikosti indukovaného elektrického náboje).

### 3.2 MISFET

MISFET je zkratka metal insulator semiconductor FET. Izolační vrstvu tvoří nečastěji oxid křemíku  $\text{SiO}_2$ , pak se uspořádání označuje MOSFET.

Základem *tranzistorů s izolovaným hradlem IGFET* (insulated gate FET) je struktura MIS. Ta se skládá z polovodičové podložky (nečastěji křemíková destička o tloušťce 300–500  $\mu\text{m}$ ), z vrstvy dielektrika (např. vrstva oxidu křemičitého o tloušťce 0,05–0,2  $\mu\text{m}$ ) a z hradla (elektroda G vyrobená z dobře vodivého materiálu, např. z hliníku nebo polykrystalického křemíku o tloušťce až několik desítek  $\mu\text{m}$ ).

Na vlastnosti struktury MIS mají rozhodující vliv děje v polovodičích, ve vrstvě dielektrika a v hraniční oblasti mezi dielektrikem a polovodičem. Podstatný význam má též kontaktní potenciál mezi kovem a polovodičem.



### 3.2.1 MOSFET s indukovaným kanálem

Základní destička je tvořena polovodičem (např. P) s vysokým odporem (tj. s malým procentem příměsí). Dvě oblasti opačného typu (např. N), vzájemně od sebe oddělené, tvoří source a drain. Hradlo G je od základní destičky izolováno vrstvičkou  $\text{SiO}_2$  a je tvořeno povlakem kovu napařeným na izolantu.

### 3.2.2 MOSFET s vodivým kanálem

Od MOSFETu s indukovaným kanálem se liší pouze tím, že pod vrstvičkou  $\text{SiO}_2$  existuje kanál stejné vodivosti jako source a drain, což způsobuje, že proud  $i_D$  může procházet i při  $u_{GS} = 0$ .

## 3.3 Tenkovrstvý tranzistor

Užívá se zkratka TFT (think film transistor). Jedná se o modifikaci MIS tranzistoru. Podložka z plastu nebo skla, zlaté napařené elektrody emitoru a kolektoru. Polovodič má značnou šířku zakázaného pásma ( $\Rightarrow$  malá vlastní vodivost kanálu). Izolační vrstva z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{SiO}_2$ , elektroda hradla hliníková.

Používá se ve vrstevných IO. Díky napařeným kontaktům nelze používat pro větší výkony

## 3.4 IGBT – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem

Zkratka IGBT znamená insulated gate bipolar transistor. Vznikne z unipolární struktury jednoduchou technologickou operací – přiřazením vysoko dotované vrstvy  $P^+$  ke kolektoru. Takovýto prvek můžeme z hlediska působení fyzikálních mechanismů rozdělit na dvě navzájem propojené části. Jednu z nich reprezentuje klasickou MOS strukturu, představující vstupní bázi pro vytvoření druhé části – výkonového bipolárního tranzistoru. Hlavní výhodou IGBT je schopnost spínat velké proudy a blokovat velká napětí při úbytcích podobných bipolárnímu tranzistoru a napěťový způsob řízení, obdobný MOS struktuře.

## Kapitola 4

# Tyristory, triaky

### 4.1 Diak

Diak je nejjednodušší spínací polovodičová součástka z hlediska technologického provedení i z hlediska obvodového. Jedná se o souměrnou třívrstvou strukturu PNP nebo NPN se dvěma přechody PN, které vykazují stejné vlastnosti (protože se jedná o souměrnou strukturu). Vzhledem k tomu, že struktura diaku je symetrická, musí být symetrická i jeho VA charakteristika. Její tvar je dán funkcí diaku, která je následující.

Přivedeme-li na diak vnější napětí  $U$  a to bez ohledu na jeho polaritu, pak vždy jeden z přechodů je v propustném a druhý v závěrném stavu. Technologicky se struktura diaku vytváří tak, aby vodivost obou krajních oblastí byla větší než střední oblasti. To znamená, že závěrně polarizovaný přechod (a tedy jeho oblast prostorového náboje) se rozšiřuje směrem do střední oblasti. Aby diakem při polarizaci vnějším napětím procházel proud, musí klesnout odpor střední části struktury, což znamená, že musí dojít k zaplavení oblasti prostorového náboje volnými nosiči. Pokud je vnější přiložené napětí  $U < U_{B0}$ , je sice přechod polarizován do přímého směru, avšak jím injektované díry ještě nedosahují vyčerpané oblasti druhého přechodu. To znamená, že odpor durhého přechodu nemůže klesnout, a součástkou protéká jen velmi malý proud  $I < I_{BO}$ , který je v podstatě saturačním proudem druhého přechodu. Při růstu vnějšího napětí se rozšiřuje vyčerpaná oblast a blíží se k prvnímu přechodu. Proud  $I$  vzrůstá přibližně lineárně s růstem  $U$  až do té doby, nežli  $U \approx U_{B0}$ , kdy injektované díry propustně polarizovaným prvním přechodem prodifundují do oblasti prostorového náboje druhého přechodu a „zaplavují ji“. Protože na přechodu polarizovaném v závěrném stavu je poměrně vysoká hodnota elektrického pole, způsobí toto pole urychlení injektovaných nosičů. To má za následek rychlé zvýšení vodivosti původně vyčerpané oblasti druhého přechodu. Tím se snižuje odpor celé struktury, začíná na ní klesat napětí a následně roste hodnota proudu protékajícího diakem – diak sepnul. Při změně polarity vnějšího napětí si první a druhý přechod vymění funkci a diak spíná při opačné polaritě  $U$ .

### 4.2 Tyristor

Nejčastěji má 3 PN přechody a 4 vrstvy, plným názvem zpětně blokuující triodový tyristor. Pod pojmem tyristor obecně chápeme výkonový polovodičový spínací prvek, který může pracovat v propustném, blokovacím a závěrném stavu. Nejdůležitější změnou mezi jednotlivými stavy je změna ze stavu blokovacího do propustného, která se ovládá řídicím signálem – nejčastěji proudem přiváděným do řídicí elektrody. Zbývající dvě elektrody nesou označení – podle polarity přivedeného vnějšího napětí anoda a katoda.

Pokud je tyristor polarizován do závěrného směru (katoda je na vyšším potenciálu než anoda),

tyristorem neprochází proud a chování tyristoru v závěrném směru je shodné s diodou polarizovanou vnějším napětím do závěrného směru. Pokud je tyristor polarizován vnějším napětím do propustného směru a není-li na řídicí elektrodu přiveden signál, tyristor se nachází v blokovacím stavu a neprochází jím (narozdíl od diody) proud. Teprve přivedením signálu na řídicí elektrodu tyristorová struktura spíná a chová se jako dioda polarizovaná do přímého směru. To znamená, že strukturou prochází značný proud vyvolávající na ní jen minimální úbytek napětí (až 2 V).

Šířky jednotlivých vrstev polovodiče jsou různé, oblast anody a katody je tvořena silně dotovaným polovodičem. Nejdelší, střední oblast mezi prvním a druhým přechodem je velmi slabě dotována aktivními příměsemi, což znamená, že její měrný odpor je velký, ve srovnání s ostatními vrstvami. To vede k tomu, že oblast prostorového náboje prvního přechodu je situována ve druhé vrstvě, podobně jako oblast prostorového náboje druhého přechodu. Protože koncentrace aktivních příměsí ve třetí a čtvrté polovodičové vrstvě se liší jen málo, zasahuje oblast prostorového náboje třetího přechodu přibližně souměrně do obou polovodičů.

#### 4.2.1 Závěrný stav

V tomto případě bude na anodu tyristoru připojen záporný pól a na katodu kladný pól vnějšího zdroje. Poznamenejme, že v tomto případě nesmí být na řídicí elektrodu G přiváděn žádný signál ( $U_{GK} \stackrel{!}{=} 0$ ). Protože A je polarizována záporně vůči K, první a třetí přechod jsou polarizovány v závěrném směru, zatímco druhý přechod je v propustném stavu. Ochuzené oblasti prvního a třetího přechodu se proto rozšíří (dochází k extrakci minoritních nosičů náboje), druhý přechod však minoritní nosiče náboje injektuje. Ochuzená oblast prvního přechodu bude nejširší, takže téměř celé napětí vnějšího zdroje bude na prvním přechodu. Proto první přechod určuje závěrné vlastnosti tyristoru.

#### 4.2.2 Blokovací stav

V případě, že na A připojíme kladný pól a na K záporný pól vnějšího zdroje, bude první a třetí přechod polarizován v propustném směru a druhý přechod ve směru závěrném.

#### 4.2.3 Propustný stav

Vyjďeme z blokovacího stavu. Kdyby se oblast druhého přechodu (v blokovacím stavu polarizován závěrně) zaplavila volnými nosiči náboje tak, že jejich koncentrace postačí ke kompenzaci ionizovaných příměsí v oblasti druhého přechodu, došlo by k podstatnému zúžení ochuzené oblasti druhého přechodu a tím k přepolarizaci tohoto přechodu do propustného stavu. Protože nechceme, aby k sepnutí tyristoru došlo samovolně (neřízeně), je nutné pro sepnutí využít řídicí elektrodu G.

Připojíme-li na řídicí elektrodu napětí proti K tak, aby byl třetí přechod mezi řídicí elektrodou a katodou polarizován v propustném směru, začne řídicí elektrodou procházet proud  $I_G$ .

Přepolarizací druhého přechodu klesá úbytek napětí na celé čtyřvrstvé struktuře na malou hodnotu (řádově kolem 1 V). Na této hodnotě potom setrvává tak dlouho, dokud proud procházející tyristorem nepoklesne pod hodnotu vratného proudu  $I_H$ , a to i v tom případě, že řídicí proud  $I_G$  se zmenší na nulu.

#### 4.2.4 Vypínání tyristoru

Přechod tyristoru ze sepnutého (propustného) do stavu blokovacího docílíme tím, že snížíme hodnotu protékajícího proudu tyristorem pod hodnotu vratného proudu  $I_H$ . Další způsob vypínání tyristoru je krátkodobá komutace proudu  $I_F$  do závěrného směru  $I_R$ . Pokud je tyristor zapojen v obvodu

střídavého proudu, pak k vypnutí dochází v každé periodě pracovního napětí  $U_{AK}$ . Je-li tyristor zapojen v obvodu stejnosměrného proudu, je nutno vypnutí zabezpečit vnějšími obvody. Bezprostředně po proudové komutaci bude blokovací přechod a řídicí přechod nasycen volnými nosiči, které představují určitý náboj. Po dobu, dokud se tento náboj ze struktury tyristoru neodčerpá, bude se chovat tyristor stejně jako v sepnutém stavu. Doba potřebná pro odčerpání náboje se nazývá *vypínací doba*.

### 4.3 Triak

Triak je pětivrstvá struktura NPNPN nebo PNPNP spínající při obojí polaritě střídavého napětí. Její činnost lze znázornit sériovým zapojením příslušně čtyřvrstvé struktury PNPN a přechodu PN polarizovaného v závěrném směru. Je vidět, že vždy jeden krajní přechod PN je polarizován v závěrném směru (dioda), kdežto druhý krajní přechod je součástí čtyřvrstvé struktury a je zapojen v propustném směru a jedná se vlastně o tyristorovou strukturu polarizovanou do blokovacího, resp. propustného stavu. Je tedy vidět, že pětivrstvá struktura může působit jako čtyřvrstvá pro obojí polaritu přiloženého napětí. Usměrnující jeden krajní přechod PN by byl však v sepnutém stavu nevýhodný, protože by na něm vznikal velký úbytek napětí, takže by byl značně tepelně namáhán. Proto se oba krajní přechody vytvářejí tak, aby jejich odpor v závěrném stavu byl minimální. Toho se docílí tím, že se krajní přechody vytvoří jako zkratované přívodní elektrody.

### 4.4 Vypínací GTO tyristor

Zkratka GTO znamená gate turn off. Je to tyristor, který je možné zapnout i vypnout proudem řídicí elektrody. Pro zapnutí se využívá kladný, pro vypnutí záporný řídicí impuls. Charakteristika v přímém směru je totožná s běžným triodovým tyristorem. V závěrném směru, v důsledku částečného zkratování PN přechodu na anodové straně, je identická s asymetrickými a zpětně vodivými tyristory. Jedním z nejdůležitějších parametrů je *vypínací zesílení*. Podmínkou vypínacího procesu je, aby proud báze 2 (vychází z dvoutranzistorového modelu tyristoru) byl menší než kolektorový proud odpovídající proudovému zesílení ( $I_{B2} < \frac{I_{C2}}{\beta_2}$ ), jinými slovy, abychom dosáhli proudem řídicí elektrody  $I_G$  pokles anodového proudu tyristoru  $I_A$  pod hodnotu vratného proudu. V praxi dosahuje vypínací zesílení hodnot 3 až 5.

Napěťové a proudové parametry vypínacích tyristorů běžně dosahují hodnot 4,5 kV, 3 kA při vypínacím čase 10–50  $\mu$ s (narůstá se zvyšováním napětí). Tato hodnota platí pro asymetrické typy, zpětně závěrné typy dosahují asi poloviční hodnoty. Vypínací GTO tyristory jsou určené především pro trakční aplikace a těžké průmyslové pohony, kde instalované výkony přesahují 500 kW.

Podmínkou pro možnost vypnout součástku (GTO i IGCT) řídicím elektrickým impulzem je rozčlenění její katody do velkého množství paralelně zapojených katodových (emitorových) elementů („prstů“), z nichž každý je obklopen řídicí elektrodou. Vypínání se dosahuje zrušením kladné zpětné vazby (na dvoutranzistorovém náhradním schématu) přiložením záporného napětí na řídicí elektrodu G vzhledem ke katodě K. Každý katodový element vypíná postupně od svého obvodu, což způsobuje zvětšování hustoty proudu (na dráze anoda–katoda) do stále užších proudových vláken. Tento jev je označován jako *filamentace*. Následkem zvětšené proudové hustoty dochází k oteplování, což vede k lokálnímu oteplování a způsobuje jistá rizika (při rozvinutí jevu by mohlo dojít až k destrukci součástky). Uvedené riziko lze odstranit připojením odlehčovacího obvodu pro vypínání paralelně k vypínané součástce (jádem je nenabitý kondenzátor, který odvede část vypínaného proudu mimo součástku, resp. zmenší rychlost nárůstu blokovacího napětí). Po zániku katodového proudu je však součástka GTO ohrožena *proudem doznívání* (proud zprostředkovaný volnými nosiči, které difundovaly z vrstvy  $N_1$  do ochuzené oblasti přechodu  $J_2$ , anglicky tail current)  $i_{tail}$ .

## 4.5 IGCT (integrated gate-commutated thyristor)

IGCT je v podstatě velmi „tvrdě komutovaný“ (tj. extrémně rychle vypínaný) vypínací tyristor GTO. Součástka IGCT je složena ze dvou základních částí: tyristorové struktury GCT a z řídicího obvodu, ke kterému je pastilka GCT připojena co nejtěsněji proto, protože pro řádnou funkci GCT musí být strmost nárůstu řídicího vypínacího proudu  $i_{RG}$  extrémně vysoká (proto vlastní [parazitní] indukčnost zdroje řídicích vypínacích impulzů, včetně přívodů, musí být snížena na proveditelné minimum). Na dvoutřanistorovém náhradním schématu se vypínací proud  $i_{RG}$  zvětšuje tak strmě, že „dříve než se výrazně změní rozložení nábojů na jednotlivých přechodech tyristorové struktury, je celý anodový proud  $I_A$  skokově převeden do řídicí elektrody G“. Vypínání GCT součástky je tak převedeno na vypnutí druhého tranzistoru, což je principiální rozdíl proti vypínání součástky GTO. Proto je vyloučena filamentace a problémy s ní spojené, není omezena strmost nárůstu blokovacího napětí, není zapotřebí odlehčovací sítě, jsou zmenšeny vypínací ztráty. Kromě toho je významně zkrácena vypínací doba.

## Kapitola 5

# Svítivé diody a lasery

### 5.1 Optoelektrické pojmy

Rozumíme vlnové délky  $\lambda = 10 \text{ nm}$  až  $100 \mu\text{m}$ . Viditelné světlo má vlnové délky v rozmezí 380 až 780 nm.

#### Vnější fotoelektrický jev – fotoemise

Při průniku záření látkou se uvolňují elektrony. Fotokatody.

#### Vnitřní fotoelektrický jev

Vznik (vodivého) páru elektron-díra (rozštěpení). Fotorezistory.

#### Kvantová účinnost

Je to poměr vyzářených fotonů ku počtu elektronů. Materiál může vyzařovat – termodynamická nerovnováha – excitace (vybuzení), přechod zpět buď zářivý nebo Augerův (energie se mění v teplo).

#### Fotoluminiscence

Excitace světelným (neviditelným zářením). Laser

#### Katodoluminiscence

Excitace dopadem elektronů – např. fotoluminiscenční vrstva obrazovky (stále stejná barva, změny intenzity) vybuzená elektronovým svazkem.

#### Elektroluminiscence

Excitace elektrickým polem. Založena na principu injekce excitovaných minoritních nosičů náboje PN přechodem daného polovodiče při přiložení vnějšího napětí. Injektované nosiče náboje, elektrony a díry, spolu rekombinují, přičemž dochází k emisi fotonu (tj. uvolnění energie ve formě fotonu) s vlnovou délkou danou polovodičovými materiálem. Fotodiody.

#### Nekoherentní záření

Uplatňuje se spontánní emise (rekombinace nastává při injekci samovolně).

## Koherentní záření

Uplatňuje se stimulovaná emise (uvolnění záření je stimulováno existencí fotonu stejné frekvence, polarizace a fáze jako má emitovaný foton). Koherentní záření je takové záření, jehož všechny „vlny“ mají stejnou frekvenci, polarizaci a fázi.

## 5.2 LED

LED je zkratka light emitting diode. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměřovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů náboje přes PN přechod. Po překonání určité vzdálenosti tyto nosiče rekombinují s nosiči opačného znaménka. Tento proces způsobuje v aktivní oblasti uvolnění energie ve formě fotonů. Vlnová délka je dána rozdílem energií nosiče před a po rekombinaci

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{hc}{\lambda} \quad [\text{J}; \text{J}\cdot\text{s}, \text{m/s}, \text{m}],$$

odkud dostáváme pro vlnovou délku emitovaného fotonu

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W},$$

přičemž  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $h$  je Planckova konstanta. Přepočtem z joule na elektronvolty dostaneme vzorec

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W} e \doteq \frac{1,24}{\Delta W} \quad [\mu\text{m}; \text{eV}].$$

U LED se snažíme o to, aby se co nejvíce vyzářeného výkonu (typicky  $50 \mu\text{W}/\text{mA}$ ) dostalo z aktivní oblasti na povrch. Proto musí být konstrukce LED přizpůsobena tak, aby docházelo k co nejmenší absorpci emitovaného záření v objemu polovodiče a v materiálu kontaktů. Kromě toho se emitovaný výkon zvyšuje použitím speciálních zalévacích hmot (s indexem lomu větším než 1) a skel, popřípadě rozměrově optimalizovanou polosférou nad vlastním polovodičovým systémem.

## 5.3 Lasery

Slovo laser je zkratkou slov light amplification by stimulated emission of radiation. Uplatnění nachází v lékařství (skalpel, ozařování tkání), strojírenství (řezání a obrábění materiálu), elektrotechnika (automatické trimování součástek, přenos informace, tiskárny, paměťová média, holografie), metrologie (přesná měření délek a úhlů), stavebnictví (dálkoměry), chemie (výroba extrémně čistých materiálů, separace izotopů), vojenství (zbraně, navigace, ...).

### 5.3.1 Podmínky pro stimulovanou emisi

Existence aktivního prostředí s dostatečně velkým zesílením fotonů mechanismem stimulované emise. Podle toho, jakým skupenstvím je toto prostředí tvořeno, nese laser název: plynový laser (argonové, helium-neonové,  $\text{CO}_2$ , ...), kapalinový laser (speciální anorganická barviva, odtud název barvivové lasery), pevnolátkové lasery (rubínové, neodymové; zvláštní skupinou jsou polovodičové lasery).

Existence kladné zpětné vazby, která je nutná, aby generace fotonů po určité době neustala. Kladná zpětná vazba se realizuje dvěma planparalelními zrcadly (tvoří rezonátor).

Aby v aktivním prostředí převládla stimulovaná emise nad ostatními protipůsobícími jevy (např. absorbcí) a došlo k ustálené generaci fotonů, musí být na vyšších energetických hladinách více částic

než na nižších. Tohoto stavu, který se obvykle nazývá *inverzní obsazení hladin*, lze docílit buzením aktivního prostředí ozářením, elektrickým výbojem, chemickou reakcí, popřípadě injekcí nosičů v PN přechodu. Inverzním obsazením se přitom rozumí obsazení inverzní vůči rovnováženému stavu (nedochází k buzení, nižší energetické hladiny jsou obsazeny více než vyšší [Maxwell-Boltzmannův zákon]).

### 5.3.2 Polovodičový laser

Využívají pro buzení injekce minoritních nosičů náboje v PN přechodu. Odtud plyne jejich častý název injekční laser.

Zasilování světla stimulované emisí záření. Fabri-Perotův rezonátor (na optické záření) – přesná vzdálenost – souvisí s  $\lambda$ . Paprsky prochází skrz materiál, strhávají další. Na jedné straně zrcadlo se 100% odrazem, na druhé straně s 98% odrazem.

Koherentní záření – téměř monochromatické, zářivý výkon ve velmi úzké části spektra (kvazimono-chromatické), zúžení vlnového svazku se vhodně dá soustředit a navázat na optickou soustavu i optické vlákno. Prostorová koherence – rovinná vlnoplocha, časová koherence – všude rovinná vlnoploch. Polarizované.

Heterogenní krystal, na bocích vrstvičky kovů, které tvoří zrcadla. Při malém proudu se chová jako LED, až při proudové hustotě 20 až 60 mA/mm<sup>2</sup> na rozhraní, mění se spontánní na koherentní  $\Rightarrow$  chlazení. Polarizační rovina kolmá k PN přechodu. Reakční doba na napěťový impulz řádově ps (výhledově fs – buzení optických kabelů), velké šířky pásma.



## Kapitola 6

# Fotocitlivé prvky

Fotoelektrické detektory mění energii optického záření na elektrický signál prostřednictvím interakce elektronů nebo atomů materiálu a fotonů dopadajícího záření. Mezi nejdůležitější parametry patří: citlivost (změna výstupní elektrické veličiny při ozáření detektoru), spektrální charakteristika (udává citlivost detektoru pro určitou vlnovou délku), dynamické vlastnosti (určují množství informace zpracovatelné za jednotku času), šumové vlastnosti (určují dosažitelnou citlivost), voltampérová charakteristika, pracovní teplota (pro oblast mikrovln je nutné detektory chladit).

### 6.1 Fotorezistor

Pracuje na principu vnitřního fotoelektrického jevu – nelineární. Poměrně pomalý (závisí na osvětlení). Snižuje svůj odpor s rostoucím ozářením. Základem fotoodporu je monokrystal polovodiče, polykrytalická tenká vrstva nanesená na nosné destičce nebo spékané tyčinky či destičky, které jsou opatřeny dvěma kontakty a uloženy v hermetickém pouzdru zaručujícím přístup záření. Spektrální oblast, v níž pracují, je dána absorpční hranou (maximální vlnová délka, při níž může ještě dojít k absorpci). Z materiálů se užívá například CdS. Použití – pomalé měření (automatické zapínání osvětlení, indikace soumraku).

### 6.2 Fotodiody

PN a PIN fotodiody pracují na následujícím principu. Foton, který vstupuje do polovodiče s dostatečnou energií může být absorbován, přičemž vzniklý volný elektron a díra vytváří v polovodiči napětí (fotovoltaický jev) nebo zvětšují jeho vodivost (fotovodivostní jev). Maximální vlnová délka, při níž může ještě dojít k absorpci, tzv. absorpční hrana, je dána vztahem

$$\lambda_{max} = \frac{1,24}{\Delta W} \quad [\mu\text{m}; \text{eV}].$$

Voltampérová charakteristika PN a PIN diody zasahuje do tří kvadrantů. Ve fotovoltaickém (hradlovém) režimu (IV. kvadrant) se dioda chová jako aktivní prvek. Dopadají-li na fotodiodu v hradlovém režimu fotony o energii větší než je šířka zakázaného pásu  $\Delta W$ , dochází k jejich absorpci za vzniku párů elektron–díra. To znamená uvolnění elektronů do vodivostního pásu a děr do valenčního pásu.

Vedle slunečních článků jsou fotodiody provozovány v hradlovém režimu jako detektory s vysokou citlivostí. To je dáno tím, že jediným zdrojem v obvodu je právě fotodiody, což znamená výrazné omezení šumu ve srovnání s režimem fotovoltaickým („za tmy proud neteče“).

Ve fotovodivostním (odporovém) režimu se dioda chová jako pasivní prvek, jehož elektrický odpor klesá s intenzitou ozáření. Proto je fotodiody v sérii s ochranným rezistorem připojena ke zdroji

napětí, který ji polarizuje do závěrného směru. Dopadající fotony generují volné elektrony a díry jako v případě fotovoltaického režimu. V tomto případě je však z důvodu závěrné polarizace na PN přechodu vyšší intenzita elektrického pole a tato oblast je širší a proto generované volné elektrony driftují vyšší rychlostí ke kontaktu katody, zatímco díry ke kontaktu anody. S rostoucí rychlostí nosičů se zvyšuje přenosová rychlost fotodiody (frekvenční šířka pásma). Proto se lze nejčastěji setkat s fotodiódou PIN, na jejíž střední oblasti o veliké ploše s téměř vlastní (intrinsickou) vodivostí o velikém odporu se dosáhne vysoké intenzity elektrického pole (rovnoměrně rozloženého). Toto pole zvyšuje rychlost nosičů a tím i šířku pásma. Nevýhodou je generace teplotně závislého proudu za tmy, což s sebou přináší přídatný šum a znemožňuje měření signálů s nízkou úrovní.

Nedostačuje-li citlivost těchto fotodiód, je možné použít *lavinových PIN fotodiód*, které vykazují vlastní zesílení. Toto zesílení fotoproudu je způsobeno přiložením velkého závěrného napětí, které urychluje dopadajícími fotony vzniklé nosiče náboje natolik, že při srážce s mřížkou krystalu polovodiče dojde k vyražení dalších (sekundárních) elektronů. Výhoda vlastního zesílení je vykoupena náročnější konstrukcí fotodiody a nutností polarizace diody. K tomu je zapotřebí kvalitní stabilizovaný zdroj napětí (Ge asi 30 V, Si 300 V), přičemž potřebná hodnota napětí je pro každou diodu (i ze stejného materiálu) různá.

### 6.2.1 Solární články

Pracují v hradlovém režimu fotodiody.  $I_k = 20 \div 25 \text{ mA/cm}^2$ ,  $0,5 \div 0,55 \text{ V}$  na článek, provozní napětí  $0,45 \text{ V}$  na článek (úbytek na vnitřním odporu). Křemíkové fotodiody – odpor přizpůsobený diodě,  $I = 0,15 \text{ mA/cm}^2$  při  $U = 0,45 \text{ V}$ . Účinnosti: amorfni Si 6 až 7 %, polykrystalický 8 až 12 %, monokrystal 15 až 18 %. Spektrální charakteristika  $0,9 \mu\text{m}$ , Ga  $0,4 \mu\text{m}$ . Materiály Si, Ge, Se, GaAs, GaInAs, GaAlAsSb. Nesmí navlhnout  $\rightarrow$  zničení. Pracovní teploty  $-30 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 6.2.2 Fotodioda v komunikacích

Do frekvence desítek GHz. Lavinová fotodioda – zesílení 50 až 150.

## 6.3 Fototranzistor

Chybí vývod báze (nahrazen světlem, v pouzdře okénko). Citlivější než fotodioda (zesílení 10 až  $100 \times$ ), lavinová fotodioda ale citlivější. Ve výstupních charakteristikách figuruje místo proudu báze jako parametr dopadající zářivý výkon. Bez dopadajícího záření (za tmy) je  $I_B = 0$  a tranzistorem teče proud za tmy  $I_{CE0} \cdot h_{21E}$ , který je větší než u fotodiód. Odezva jednotky až desítky  $\mu\text{s}$ .

Nevýhodou je nízká hodnota  $h_{21E}$  pro malé úrovně ozáření a špatné frekvenční vlastnosti (typicky do stovek kHz).

## 6.4 Fototyristr

Přívod vláknovým kabelem nebo je v pouzdře s fotodiódou. Nesmí být ohříván.

## 6.5 Fotonka, fotonásobič

Založena na principu vnějšího fotoelektrického jevu (při dopadu fotonů vhodné energie dojde k vystoupení elektronů z materiálu do okolního prostředí, materiály s touto vlastností nazýváme emitéry).

U fotonky jsou elektrony vystupující z emitéru přitahovány elektrodou kladně polarizovanou vůči potenciálu emitéru. Významnou vlastností fotonek je jejich rychlost (nejrychlejší dobu náběhu až 10 ps).

Pokud elektrony z vystupujícího emitéru urychlíme vnějším elektrostatickým polem, udělíme jim dostatečnou energii a soustředíme je na elektrodu pokrytou materiálem o dobré emisní schopnosti (Ag-Mg, Al-Mg, Cu-Be), dojde na této elektrodě k sekundární emisi elektronů. Elektrony mají potom nižší energii, ale jejich počet se zvětší. Na tomto principu pracují fotolektrické násobiče (fotonásobiče). Konstrukčně náročné. Užívají se tam, kde je zapotřebí extrémní zesílení (citlivost), tj.  $10^5$  až  $10^9$  a krátká doba nárůstu signálu, tj. jednotky ns.

# Kapitola 7

## Displeje

### 7.1 S malou hustotou zobrazované informace

Užití pro alfanumerické indikátory – písmena abecedy, číslice. Výstupy kalkulaček, pokladen, ... Dělíme na aktivní (sami generují světlo) a pasivní (negerují světlo, ale řídí jeho průchod). Požadované vlastnosti: dobrá čitelnost za světla, šera, tmy; malá spotřeba; rychlá odezva; připojitelné ke zdroji informace.

#### 7.1.1 S malým počtem předem připravených znaků

*Digitrony* – elektronka, jednotlivé číslice ve formě drátků. Výboj ve zředěném plynu – svítí hlavně katoda. Poměrně vysoké napětí – okolo 150 V. Poměrně malý proud – 1 až 5 mA. Viditelný pouze ten znak, který má napětí. Rozsvícení znaku 10  $\mu$ s, zhasnutí 40  $\mu$ s

#### 7.1.2 Segmentový systém

Sedmisegmentové prvky. Aktivní fluorescence (18 až 25 V, při zobrazení všech sedmi segmentů proud 20 mA), elektroluminiscenční diody (doba odezvy 10 ns), kapalně krystalové.

#### 7.1.3 Bodové matice soustavy bodů

Bodové matice s elektroluminiscenčními diodami. Jeden bod jednou nebo dvojicí elektroluminiscenčních barev. Bodové matice s doutnavým výbojem – jako paměti (křížové adresování, nadprahové napětí)

### 7.2 S velkou hustotou zobrazované informace

Obrazovky, světelné maticové panely, plošné LCD panely.

#### 7.2.1 Elektroluminiscenční diody

AsGa, GaP. Proud do 50 mA, impulzní až ampéry. Pracovní teplota  $-50 \div +80$  °C. Závěrné napětí  $-2$  V.

#### 7.2.2 Segmentovky

Soustava diod, anoda spojena dohromady. Maticové soustavy (původně  $5 \times 7$  bodů).

### 7.2.3 Kapaln  krystaly

Označovany LCD (liquid crystal display). Princip znám od zaatku století. Látky v tzv. mezof zi (v kapaln  stavu, ale ještě některé vlastnosti pevn  látky) (mezomorfní látky). První využití bylo v medicíně – nanesen  a změna barvy, kde byl zánět. Jedná se o olejovitou, hustou kapalinu, zpravidla jedovatou. Skládá se zhruba ze dvaceti slozek organických látek. Zpoatku kapaln  krystaly pracovaly pouze v úzkém teplotním pásmu.

*Smectick  fáze* – molekuly tyčinkového tvaru, dva směry pohybu a jedna rotace, vzdálenost vrstev 2 nm, rovnob žn  se stěnami. *Nemtick  fáze* – molekuly pohyb ve t
ech směrech a v jednom rotace, r zn  délky molekul, kolm  ke st n m. *Cholesterick  fáze* – vrstvy proti sobě otočeny a svírají mezi sebou urit  úhel, tloušťky vrstev 5 aŹ 100  $\mu\text{m}$ , orientace podle st n (někdy drážkování skel), změna elektrickým polem.

*Transmisn * – dole na displeji světlo, *reflexní* – dole na displeji zrcadlo. Napájení p vodn  10 aŹ 15 V, dnes 3 aŹ 8 V, 30 aŹ 100 Hz tak, aby nedr ždilo oko (z důvodu životnosti – elektrolytick  proces). Parmitivita  $\varepsilon = 3 \div 30$ , m rn  odpor  $\rho = 10^5 \div 10^9 \Omega\text{m}$ , p
 ikon  $0,3 \mu\text{W}/\text{mm}^2$  (nejmenší ve srovnání s ostatními displeji). Pro čtení za tmy je t
eba prosv tlen  – fólie – stovky voltů → m ni. Pracovní teplota p vodn  5 aŹ 60  $^\circ\text{C}$ , dnes –5 aŹ 75  $^\circ\text{C}$ .

Nevýhody: musíme pozorovat pod urit m úhlem, omezen  teplotního rozsahu. Výhody: velmi mal  spot
eba, naprosto rovinn  obraz, mal  hloubka displeje, nepatrn  ovládací výkon (na 0,5 mil onu bod  stačí 1 W, barevn  trojnásobek)

### 7.2.4 Bodov  systémy

#### Pasivn  soustava TND (twisted nematic display)

Elektrick  pole – polarizace světla – dvojlom. Účinek závisí na  $\lambda$ , slab  kontrast. Nematick  fáze krystalu.

#### Pasivn  STND (super twisted nematic display)

Větší kontrast, dnes se nepoužívají. OranŹov  pozadí.

#### DSTND (double super twisted nematic display)

Dvě vrstvy kapln ch krystalů za sebou, ovládána pouze 1 (kompenzace vlnov  délky). Větší hmotnost i hloubka. Lepší kontrast, 16,7 milionů barev.

#### TFT displeje (think film transistor)

Aktivn  krystaly. Kratší reakční doba, omezen  st n . M n  se jen bod, kde změna.

#### FLCD – fotoelektrick  displej

Fotoelektrick  buňka, pamatuje se stav ze elektrování. Stupně šedi vznikají rychl m p
ep n n m ern  a b l . P
i opakování 30 aŹ 80 Hz nepotřebují obnovování. Jsou t žk . Na 15" 1280  $\times$  1024 bod .

#### PD – plazmov  displeje

Směs plynů Ne, Ar. 102  $\times$  66 cm – vážilo by 90 kg.

**PALC (plasma adress liquid crystal)**

450 drážek vyplněných plazmou – výboj v plazmě způsobí změnu LC. Výborná kvalita až 50".  
I 3D displeje – současně dva obrazy (pro pravé i levé oko)  $\Rightarrow$  prostorový vjem, každé oko vnímá jiný obraz díky mikroskopické mřížce, pozorovatel musí být v jednom místě.

**FED (field emission display)**

Studené katody, emise elektronů. Výhody: dobrá sledovatelnost, vysoká rozlišovací schopnost, přirozené barvy, jednoduché elektronické zařízení, malá spotřeba energie, nízká hmotnost, malý hloubkový rozměr, rovinná ploch obrazu ( $\Rightarrow$  bez zkreslení), není problém s rušením, nejsou vady obrazu.

## Kapitola 8

# Analogové integrované obvody

Analogové obvody jsou určeny pro práci se signálem, jehož hodnota se v rozmezí jmenovitého rozsahu může měnit spojitě (existuje tedy nekonečně mnoho dovolených hodnot [úrovní] signálu na vstupu i výstupu).

### 8.1 Klasifikace integrovaných obvodů

Podle technologie výroby rozlišujeme *monolitické* IO, ve kterých jsou jednotlivé prvky vyrobeny a propojeny na jedné základní destičce polovodičového materiálu čipu (všechny prvky jsou uvnitř jednoho monokrystalu, oddělené pouze jemnými podrobnostmi fyzikální a chemické struktury) a *hybridní* IO, které jsou vytvořeny kombinací diskretních prvků a IO vyrobených různými technologiemi.

Nejběžnějším materiálem pro monolytické IO je křemík. Postupně se začínají uplatňovat i polovodiče sloučeninové, především arsenit galitý (AsGa), ale pouze pro IO se speciálním určením. Pro hybridní IO je charakteristické řešení užití podložky z jakostní speciální keramiky (často na bázi oxidu hlinitého), na které jsou vrstvou technikou vytvořeny spojové dráhy a rezistory. Do této sítě se tmelením, pájením a termokompresním svařováním připojují další součástky. Technologie tenkých vrstev spočívá v tom, že se v určitém pořadí nanášejí soustava různých vrstev na izolační podložku. Vrstvy jsou vodivé, izolační, odporové a dielektrické pro kondenzátory. Poté se v jednotlivých vrstvách tvoří vodiče, odpory a kondenzátory. Odlišujeme technologii tenkovrstvou (napařování, tloušťka desítky  $\mu\text{m}$ ) a tlustovrstvou (nanášejí se, tloušťka desítky  $\mu\text{m}$ ).

Podle hustoty integrace (týká se pouze monolytických obvodů) rozlišujeme obvody SSI (standard scale integration) – do sta prvků na čipu, MSI (medium scale integration) – do 1000, LSI (large ... ) – do  $10^4$ , VLSI (very large ... ) – do  $10^5$ , ELSI (extremely large ... ) s počtem součástek  $> 10^5$ . Toto třídění se přestává, vzhledem ke stálému zvyšování počtu součástek na čipu, užívat. Dnes se užívá častěji klasifikace podle lineárního rozměru nejmenšího technologicky reprodukovatelného detailu ve vytvářené struktuře. Tak se mluví např. o  $2\ \mu\text{m}$  technologii, o technologii  $1,2\ \mu\text{m}$ ,  $0,6\ \mu\text{m}$ ,  $0,3\ \mu\text{m}$ , ...

### 8.2 Operační zesilovače

Potlačení součtového zesílení (CMR – common mode rejection) udává vliv napětí vůči zemi na vstupu na výstup. Má být co největší, protože OZ je diferenční zesilovač. Nesymetrie vstupů se zjišťuje tak, že se vstupy zkratují a na výstupu se objeví nějaké chybové napětí (OZ je diferenční zesilovač, proto by mělo být nulové)  $\Rightarrow$  kompenzace. OZ je stejnosměrný zesilovač. Střídají se v něm zesilovací stupně PNP a NPN (jinak by se muselo zvětšovat napájecí napětí dalších stupňů).

Blokově znázorněný OZ se skládá ze tří částí. První je vstupní diferenční zesilovač, který pracuje v můstkovém zapojení. Následuje druhá střední část, která má zajistit co největší zesílení. Třetí výstupní část, kde se využívá komplementární nebo kvazikomplementární zapojení koncového zesilovače.

### 8.2.1 Ideální a reálný OZ

	ideální OZ	reálný OZ
napěťové zesílení $A_0$	$\infty$	$10^3 \div 10^7$
napájecí napětí $\pm U_{cc}$		$\pm 2 \text{ V} \div \pm 200 \text{ V}$
klidový vstupní proud	0	$10^{-15} \div 10^{-7} \text{ A}$
mezní kmitočet	$\infty$	$10^3, 10^6, 10^8 \text{ Hz}$
rychlost přeběhu		$10^{-4} \text{ V/s}$
potlačení součtového signálu	$-\infty$	120 dB
proudová nesouměrnost vstupů	0	$10^{-8} \div 10^{-15} \text{ A}$
napěťová nesymetrie	0	$10^{-6} \div 10^{-2}$
diferenciální výstupní odpor	0	$1 \div 1000 \Omega$
diferenciální vstupní odpor	$\infty$	$10^5 \div 10^{15} \Omega$
nejmenší zatěžovací odpor		$1 \div 10^5 \Omega$
délka náběžné hrany	0	$10^{-9} \div 10^{-4} \text{ s}$
citlivost na napájecí napětí		$10^{-5} \text{ V/V}$
vstupní šumové napětí		$10^{-7} \text{ V}$

### 8.2.2 Použití OZ

**Komparátor, komparátor s hysterézí**

**Rozdílový nebo součtový zesilovač**

**Derivátor, integrátor**

**Invertující a neinvertující zesilovač**

**Klopné obvody**

## 8.3 Stabilizátory napětí

## 8.4 Výkonové zesilovače

### 8.4.1 Koncové komplementární zesilovače

Nejsou potřeba koncové výkonové zesilovače, stačí nízkovýkonové komplementární tranzistory.

### 8.4.2 Kvazikomplementární zesilovače



## Kapitola 9

# Logické integrované obvody

Číslicový obvod má pracovat se signálem diskretním, který má konečný počet přípustných hodnot. Počet hodnot diskretního signálu je zpravidla velmi malý, nejčastěji dvě.

Logické obvody se dělí na kombinační a sekvenční. U kombinačního obvodu je výstup funkcí pouze vstupů, kdežto u sekvenčního je výstup kombinací jak vstupů, tak i předchozích stavů (paměť). Podle jiného kritéria můžeme logické obvody rozdělit na synchronní (hodinový signál) a asynchronní.

### 9.1 Základní typy

#### 9.1.1 Bipolární technologie

##### DTL – diod-transistor logic

„1“ odpovídá napětí +12 V, „0“ 0 V. Díky relativně velkému napětí je odolné vůči rušení. Obvody mají velkou spotřebu. Dodnes v těžkých provozech.

##### TTL – transistor-transistor logic

Charakteristické je užívání víceemitorových tranzistorů. Obvod nejde použít v kaskádě bez oddělení (obvody se navzájem ovlivňují)  $\Rightarrow$  s otevřeným kolektorem. 10 až 30 ns, 1 až 10 mW. Lze zrychlit přidáním Schottkyho diody (vede při 0,4 až 0,5 V) – zabraňuje přesycení  $\Rightarrow$  technologie STTL. Další technologie založené na TTL jsou AS TTL – advantage schotky, LS TTL – low schotky – snížená spotřeba, ALS TTL, LV – low voltage technology – snížené napájení.

	vstup	výstup
„0“	0 až 0,8 V	0 až 0,4 V
„1“	2,0 V až $U_{cc}$	2,0 V až $U_{cc}$

##### ECL – emitter cuppled logic

Logický zisk až 15 (lze připojit 15 vstupů na jeden výstup), až 1,5 GHz, 30 mW na hradlo.

	vstup	výstup
„0“	<3,6 V	<4,2 V
„1“	>4,7 V	5 V

##### MTL – merged transistor logic

Někdy se jí říká injekční logika.

### 9.1.2 Unipolární technologie

Příkon na vstupu teoreticky nula, prakticky vybíjení nebo nabíjení kapacit. Velmi vysoký vstupní odpor  $10^{10}$  až  $10^{15} \Omega$  – uplatňuje se pouze kapacita tranzistoru. Uplatňují se pouze majoritní nosiče náboje. Prvek MOS lze vytvořit na ploše 6 až  $10\times$  menší než bipolární tranzistrou. Menší napěťový zisk než bipolární tranzistor  $\Rightarrow$  větší ovládací napětí.

### 9.1.3 NMOS technologie

Kanál typu N (na schematické značce tranzistoru šipka ven). Vede při  $U_{GS} > 0$ , prahové napětí  $U_T = +2 \text{ V}$ . Výhoda, že lze celý logický obvod udělat jedním prvkem (tranzistory s trvale propojeným C a G funguje jako odpor). Funguje v rozmezí napájecího napětí  $U_{cc}$  od 3 do 18 V.

### PMOS technologie

Vede při  $U_{GS} < 0$ , prahové napětí  $U_T = -2 \text{ V}$ .

### CMOS technologie

Jedná se o kombinaci N a P kanálu. Funguje v rozmezí napájecího napětí  $U_{cc}$  od 3 do 18 V. Výhody: malá spotřeba, levá výroba, velká hustota prvků na čipu, necitlivost na napájecí napětí, logický zisk až 50 – uplatňuje se zvětšování kapacity  $\Rightarrow$  snížení rychlosti, zpoždění desítky ns, závisí na  $U_{cc}$  i na teplotě.

### MNOS technologie

M znamená metal a N nitrid – vysoká permitivita – sníží se prahové napětí, větší rychlost.

## 9.2 Kombinační obvody

### 9.3 Sekvenční obvody

#### 9.3.1 Klopné obvody

#### 9.3.2 Posuvné registry

## Kapitola 10

# Paměti

1. kapacita – počet b nebo B
2. organizace paměti – počet b ve slově, ...
3. způsob výběru paměti – libovolný, okamžité; sekvenční – vybavovací doba, magnetické paměti
4. způsob adresování – adresovatelná – zadám konkrétní adresu; neadresovatelná – vybereme celý soubor; *asociativní paměti* – adresa se vybírá podle obsahu
5. energeticky závislé nebo nezávislé paměti
6. destruktivní nebo nedestruktivní čtení
7. statické paměti – informace v klopných obvodech; dynamické paměti – obsah sám mizí, musí se obnovovat, informace v kondenzátorech

Rozlišujeme tyto hlavní typy adresovatelných pamětí s nedestruktivním čtením:

- *Paměti s libovolným (náhodným) přístupem*, označované zkratkou RAM (random access memory) nebo také RWM (read / write memory). Jejich typickou vlastností je, že libovolná adresa je přístupná pro zapsání vkládané informace, vloženou informaci lze kdykoliv nedestruktivním způsobem přečíst.
- *Pevné paměti*, označované zkratkou ROM (read only memory), do nichž je informace vložena již při výrobě jednou provždy a dá se jen číst.
- *Programovatelná pevná paměť PROM* (programmable ROM) – možné pomocí speciálního zařízení jednou naprogramovat speciálním destruktivním způsobem. Po vložení dat se chová už jako pevná paměť.
- *Vymazatelná programovatelná paměť EPROM* (erasable PROM). Lze ji naprogramovat jako programovatelnou pevnou paměť, ale uložené informace lze opět vymazat, zpravidla důkladným ozářením (typicky 10 min) velkou intenzitou ultrafialového záření. Proto je charakteristickým vzhledovým prvkem pro tyto paměti okénko z taveného křemene, umístěné na svrchní straně pouzdra tak, aby ultrafialové záření mělo při mazání přístup k povrchu integrovaného obvodu. mazatelná UV záření (dlouho), plovoucí hradlo – 30 V
- *Elektronicky vymazatelná programovatelná pevná paměť EEPROM* (electronically erasable PROM), ve které se mazání programovatelné pevné paměti provádí elektronicky.

- REEPROM – možné přeprogramovat, mazání (dlouho)
- MRM – mostly read memory – většinou pro čtení
- EAPROM – elektricky mazatelná

Pro všechny programovatelné pevné paměti platí, že uložené informace se při vypnutí napájení neztratí, mazání vymazatelných typů trvá poměrně dlouho, vymazatelné typy snesou jen omezený počet cyklů mazání a zápisu.

Paměti mívají tři stavy vstupů – „0“, „1“ a stav vysoké impedance (odpojení od sběrnice) – vybavovací vstup.

## 10.1 Prvky s nábojovou vazbou

Označovány CCD – charge cuppled devices. Vychází z technologie unipolárních tranzistorů. Na povrchu monokrystalického substrátu P je vytvořena velmi tenká dielektrická izolace (nejčastěji  $\text{SiO}_2$ ) a na ní řada těsně sousedících vzájemně izolovaných elektrod. Elektrody jsou periodicky připojeny k řadě sběrnic. Na začátku a na konci struktury jsou v substrátu vytvořeny ostrůvky  $\text{N}^+$ , z nichž vedou ohmické kontakty k vnějšímu zdroji signálu a zátěži.

Princip práce spočívá v tom, že na sběrnících mohou být různá napětí. Při nenulovém napětí na sběrnici vznikne ekvivalent vodivého kanálu N. Protože se nejedná o kanál v pravém slova smyslu, užívá se termín *potenciálová jáma*, její „hloubka“ závisí na přivedeném napětí. Tam, kde sousedí „mělká“ a „hluboká“ jáma, existuje s povrchem rovnoběžná (laterální) složka intenzity elektrického pole, směřující od hluboké jámy k mělké. Proto budou elektrony z „mělké“ jámy přesunuty do jámy „hluboké“. Volné elektrony jsou v kanálu N (potenciálové jámě) nositeli majoritními, takže pravděpodobnost jejich rekombinace je malá a mohou se v ní udržet poměrně dlouho.

Velikou výhodou je, že výstupní náboj je přesným analogovým obrazem vstupního náboje. Toho se užívá při zpracování signálu v různých aplikacích. Součástí CCD jsou základním funkčním dílem moderních televizních kamer. Vyznačují se výbornou linearitou jak pro elektrickou odezvu na buzení jasek zobrazované scény, tak i pro obrazový rozklad. Navíc jsou proti vakuovým snímačům mnohonásobně menší, mají lepší poměr signálu k šumu, netrpí setrvačností, lépe snášejí mechanické otřesy a jsou prakticky necitlivé na vnější magnetické pole. V optoelektronické (kamerové) aplikaci se náboj pro uložení v potenciálových jámách jednotlivých buněk vytváří obdobně, jako ve fotodiódě.

## Kapitola 11

# Usměrňovače, násobiče

### 11.1 Usměrňovače

#### 11.1.1 Jednocestný usměrňovač

#### 11.1.2 Dvoucestný usměrňovač

#### 11.1.3 Můstkový usměrňovač

#### 11.1.4 Usměrňovač s nárazovou tlumivkou

### 11.2 Násobiče napětí

#### 11.2.1 Zdvojovač napětí

Při kladné půlvlňě se první kondenzátor na hodnotu  $U$ , při záporné půlvlňě se nabije druhý kondenzátor. Protože jsou kondenzátory spojeny v sérii, na výstupu dostaneme napětí o velikost  $2U$ .

#### 11.2.2 Násobič napětí

Kondenzátor  $C_0$  se nabije záporné půlvlňě na hodnotu  $U$ . V kladné půlvlňě se kondenzátor  $C_1$  nabije vlivem sériového zapojení zdroje a  $C_0$  na hodnotu  $2U$ .  $C_1$  potom nabije  $C_2$ , který nabije  $C_3$ ,  
...

# Kapitola 12

## Logické funkce

Logickou funkci můžeme vyjádřit několika způsoby: slovně, graficky (pomocí mapy [Svobodova, Karnaughova], vývojovým diagramem), tabulkou (pravdivostní funkcí) nebo algebraickým vzorcem (Booleova algebra).

### 12.1 Booleova algebra

komutativní zákony

$$x + y = y + x$$

$$x \cdot y = y \cdot x$$

asociativní zákony

$$(x + y) + z = x + (y + z)$$

$$(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$$

distributivní zákony

$$(x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z$$

$$x \cdot y + z = (x + z) \cdot (y + z)$$

zákon o vyloučeném třetím

$$x + \bar{x} = 1$$

zákon o neutrálnosti nuly

$$x \cdot \bar{x} = 0$$

zákon o neutrálnosti jedničky

$$x + 0 = x$$

zákon agresivity nuly

$$x \cdot 1 = x$$

zákon agresivity jedničky

$$x \cdot 0 = 0$$

$$x \cdot 1 = 1$$

zákon o idempotenci prvků

$$x + x = x$$

zákon absorbce

$$x \cdot x = x$$

$$x + x \cdot y = x$$

zákon absorbce negace

$$x + \bar{x} \cdot y = x + y$$

zákon dvojité negace

$$x \cdot (\bar{x} + y) = xy$$

$$\bar{\bar{x}} = x$$

De Morganovy zákony

$$\bar{x} \cdot \bar{y} = \overline{x + y}$$

$$\bar{x} + \bar{y} = \overline{x \cdot y}$$

## 12.2 Minimalizační metody

### 12.2.1 Karnaughovy mapy

### 12.2.2 Quine-McCluskeyho metoda

Tato metoda vychází ze stejných principů jako metoda karnaughových map. *Implikantem funkce*  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  budeme nazývat každou konjunkci  $K(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Implikant budeme nazývat *prostým* (minimálním), když vypuštěním kteréhokoliv souboru proměnné přestane být implikantem booleovy funkce. *Prostým implikantem* je tedy každá konjunkce minimální součtové formy dané funkce. Vlastní minimalizační metoda se uskutečňuje ve dvou etapách. V první etapě se stanoví všechny prosté implikanty. Ve druhé se pak provádí výběr minimálního počtu prostých implikantů, jejichž logický součet tvoří minimální formu.

#### Stanovení prostých implikantů

Vychází se z pravdivostní tabulky dané booleovy funkce. Dva stavy, kterým odpovídají konjunkce nazýváme sousedními stavy. Sousední stavy odpovídají sousedním políčkům v karnaughově mapě. Tyto dva stavy se pak zobrazují novým zkráceným stavem, kde dvě proměnné, v níž se sousední stavy liší, zapíšeme pomlčkou.

#### Postup při tvorbě prostých implikantů

Jednotlivé stavy roztřídíme do skupin tak, že každá skupina obsahuje pouze stavy se stejným počtem jedniček v nich obsažených. Poté seřadíme skupiny stavů pod sebe např. podle stoupajícího počtu jedniček a v nich připišeme příslušný stavový index.

### 12.2.3 Petrickova metoda

Nechť  $\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_p\}$  je množina všech prostých implikantů a  $\{b_1, b_2, \dots, b_q\}$  množina všech jednotlivých stavů dané funkce. Pak tabulku pokrytí definujeme jako matici  $TP = (c_{ij})$ , kde  $c_{ij} = 1$ , jestliže mezi prvky  $a_i$  a  $b_j$  je splněn vztah pokrytí. V opačném případě bude  $c_{ij} = 0$ . Matice má  $p$  řádků a  $q$  sloupců. Platí  $c_{1j} = \sum_{i=1}^p c_{ij}$ ,  $c_{2j} = \sum_{i=1}^p c_{ij}$ .  $c_{1i}$  udává počet stavů, který udává implikant  $a_i$  a podobně  $c_{2j}$  udává počet implikantů, které pokrývají stav  $b_j$ . Výraz

$$Z = \prod_{j=1}^q (a_1 c_{1j} + a_2 c_{2j} + \dots + a_p c_{pj})$$

vyjadřuje tvar Petrickovy funkce, která obsahuje  $q$  závorek (tj. tolik, kolik je sloupců v tabulce pokrytí). Pro tabulku pokrytí budeme moci zapsat, jestliže prosté implikanty označíme shora dolů  $a_1, \dots, a_6$

# Kapitola 13

## Logické obvody

### 13.1 Kombinační obvody

### 13.2 Sekvenční obvody

#### 13.2.1 Klopný obvod RS

Má dva vstupy S a R (set a reset). Vstup S nastavuje výstup Q do „1“, vstup R do „0“. Samotný nepracuje se signálem CLK.

#### 13.2.2 Klopný obvod RS-T

Podobný klopnému obvodu RS, má navíc vstup po hodiny CLK. Do „1“ se výstup Q dostane tehdy, když  $R=„1“$  a  $CLK=„1“$ .

#### 13.2.3 Klopný obvod D

Při vzestupné hraně impulsu v CLK se přeneše to, co je na vstupu D na výstup Q. R (reset) nuluje klopný obvod, S (set) nastavuje klopný obvod do „1“. Vstupy R i S jsou aktivní v „0“.

#### 13.2.4 Klopný obvod JK

Výstupy se mění při sestupné hraně v CLK.

#### 13.2.5 Klopný obvod T

Každý hodinový pulz mění stav.



## Kapitola 14

# Dvojkový doplněk

Označme si symbolem  $A$  libovolné číslo, pro které platí  $|A| < 1$ . Symbolem  $A_2$  si označme číslo  $A$  zobrazené ve dvojkovém doplňku. Platí

$$\text{pro } A \geq 0: A_2 = A$$

$$\text{pro } A < 0: A_2 = 2 + A = 2 - |A|.$$

Převod do dvojkového doplňku plyne z těchto vztahů. Jinou možností je

### 14.1 Sčítání

$$A \geq 0 < 1, B \geq 0 < 1$$

Proto  $A_2 = A$  a  $B_2 = B$  a pro součet platí  $A_2 + B_2 = A + B < 2$ . Abych měl jistotu, že součet  $< 1$ , musím před sčítáním vydělit 2.

$$A \geq 0 < 1, B < 0$$

Potom  $A_2 = A$  a  $B_2 = 2 + B$ . Pro součet platí  $1 < A_2 + B_2 = A + 2 + B < 3$ . Rovněž platí  $-1 < A + B < 1$ . Situace se rozpadne na dva případy.

$0 \geq A + B < 1 \Rightarrow 2 < A_2 + B_2 < 3$ . Abych výsledek dostal do požadovaného intervalu, odečtu 2. Potom  $A_2 + B_2 - 2 = (A + B + 2) - 2 = A + B$ . Tedy výsledek je, díky ztrátě přenosu na nejvyšším řádu, v pořádku.

$-1 < A + B < 0$ . Potom součet je v intervalu  $1 < A_2 + B_2 = A + B + 2 < 2$ . Dostaneme tedy správný výsledek.

$$-1 < A < 0, -1 < B < 0$$

Platí  $A_2 = A + 2, B_2 = B + 2$ . Pro součet platí  $-2 < A + B < 0$ . Pro součet ve dvojkovém doplňku proto platí  $2 < A_2 + B_2 = A + B + 4 < 4$ . Odděleně posoudíme dva případy.

$-1 < A + B < 0 \Rightarrow 3 < A_2 + B_2 = A + B + 4 < 4$ . Po odečtení 2 musí platit  $1 < A_2 + B_2 - 2 = A + B + 2 < 2$ . Protože  $(A + B)_2 = A + B + 2$ , je výsledek v pořádku.

$-2 < A + B < -1 \Rightarrow 2 < A_2 + B_2 = A + B + 4 < 3$ . Po odečtení 2 vyjde  $0 < A_2 + B_2 - 2 = A + B + 2 < 1$ .

## 14.2 Násobení a dělení dvěma

Kladné číslo se dělí posunem o 1 místo vpravo, zleva se doplňují jedničky. Záporné číslo se dělí dvěma posunem o 1 místo vpravo, ale zleva se doplňují jedničky.

## Kapitola 15

# Multiplexery, dekodéry

### 15.1 Multiplexer

Multiplexer v podstatě realizuje logickou funkci

$$Y = \bar{S} (\overline{ABCD}_0 + \overline{ABCD}_1 + \overline{ABCD}_2 + \dots + ABCD_7).$$

$\bar{S}$  je vybavovací vstup,  $A, B$  a  $C$  jsou adresové vodiče (vybírání se jimi  $D_x$ ) a  $D_0, \dots, D_7$  jsou datové vodiče (z nich se vybírá jeden).

### 15.2 Demultiplexer

### 15.3 Pevná paměť

Lze jí realizovat libovolnou logickou funkci – stačí do paměti zapsat pravdivostní tabulku požadované funkce. Vhodné zejména pro dekodéry

## Kapitola 16

# Diskretizace, kvantování

### 16.1 Diskrtizace v čase

Nejčastěji interpretujeme výstupní posloupnost čísel z AD převodníku jako velikosti vstupního signálu v určitých okamžicích (většinou s konstantním rozestupem). Otázkou je, zda výstupní analogový signál, převedný AD převodníkem na číselnou posloupnost, neztrácí příliš mnoho ze svého informačního obsahu. Dostatečně rychlým vzorkováním lze dosáhnout toho, že vzorkovaná signál neztrácí vůči vstupnímu žádnou informaci.

#### Sahannon-Kotělníkův teorém

$$f_v \geq 2f_{max},$$

kde  $f_v$  je vzorkovací frekvence a  $f_{max}$  je frekvence nejvyšší obsažené přenášené harmonické.

### 16.2 Kvantování v amplitudě

Kvantizátor převádí analogový signál na kvantovaný (na výstupu diskrétní počet hodnot). Je několik možností, jak „upravit“ signál na potřebné množství úrovní: zaokrouhlovat, oseknot shora, oseknot zdola (nejbližší vyšší úroveň). Výstup z kvantizátoru se skládá ze vstupní hodnoty a chyby, která vznikla kvantováním. Označíme-li si kvantizační krok při kvantování v amplitudě symbolem  $q$ , je maximální hodnota chyby  $\varepsilon$  při zaokrouhlování  $\varepsilon = \langle -\frac{q}{2}; \frac{q}{2} \rangle$ . Je-li kvantizační krok  $q$  dostatečně malý vůči rozsahu vstupních hodnot analogové veličiny, potom může kterákoliv velikost chyby z intervalu nastat se stejnou hustotou pravděpodobnosti.

Snižováním  $q$  lze omezovat vliv chyb, způsobených AD převodem, na signál. Pro převodníky převádějící na  $n$ -bitová čísla signál o vstupním rozsahu  $U$  je  $q = 2^{-n}U$ , vliv kvantování v amplitudě lze tedy úspěšně omezovat zvyšováním počtu bitů  $n$ .

### 16.3 Podmínky uchování informace

### 16.4 Převodníky a jejich charakteristiky

# Kapitola 17

## LTIS

Je-li  $x(t)$  vstupní signál a  $y(t)$  výstupní signál, je výstupní signál určitou transformací vstupního signálu, takže  $y(t) = \mathcal{T}\{x(t)\}$ .

Časová invariantnost znamená, že systém odpovídá na určitý vstupní signál  $x(t)$  stále stejným výstupním signálem  $y(t)$ . Pokud budíme vstup systému signálem  $x(t)$  posunutým v čase,  $x(t - t_0)$ , potom systém odpoví odezvou  $y(t)$  stejně posunutou v čase,  $y(t - t_0)$ .

Lineární systém je takový, který na  $k$ -násobek vstupního signálu  $kx(t)$ , odpovídá  $k$ -násobkem výstupního signálu  $ky(t)$  a na sumu vstupních signálů  $\sum_i k_i x_i(t)$  odpovídá sumou odezev  $\sum_i k_i y_i(t)$ .

### 17.1 Odezva LTIS na některé speciální signály

#### 17.1.1 Odezva na Dirakův impulz

Přivedeme-li na vstup systému Dirakův impulz, systém „odpoví“ průběhem  $y(t)$ , který označujeme jako  $h(t)$ . Funkci  $h(t)$  nazýváme impulzová (impulzní) odezva systému.

#### 17.1.2 Odezva na jednotkový skok

Systém „odpoví“, na tento vstupní signál, časovým průběhem  $y(t)$ , který v tomto případě označujeme  $a(t)$

#### 17.1.3 Odezva na vstupní sinusový signál

Systém odpoví (po ustálení po dostatečně dlouhé době) sinusovým signálem o stejném kmitočtu, jako má vstupní signál. Výstupní sinusovka může mít jinou amplitudu a vůči vstupní sinusovce může být fázově posunuta. Matematicky zapsáno  $x(t) = \sin \omega_0 t$ ,  $y(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$ .

### 17.2 Vztahy mezi vstupním a výstupním signálem

Lineární časově invariantní systém, na jehož vstup působí signál  $x(t)$ , který má impulzní odezvu  $h(t)$ , lze popsat jak v časové, tak v kmitočtové oblasti vztahy:

$$y(t) = h(t) * x(t)$$

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega),$$

příčemž

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \mathcal{F}\{x(t)\} & x(t) &= \mathcal{F}^{-1}\{X(\omega)\} \\ H(\omega) &= \mathcal{F}\{h(t)\} & h(t) &= \mathcal{F}^{-1}\{H(\omega)\} \\ Y(\omega) &= \mathcal{F}\{y(t)\} & y(t) &= \mathcal{F}^{-1}\{Y(\omega)\}. \end{aligned}$$

$h(t)$  je odezva systému na jednotkový impulz přivedený na vstup systému v čase  $t = 0$ . Má-li být systém kauzální, musí  $h(t) = 0$  pro  $t < 0$ .

Pro výpočet odezvy lineárního časově invariantního systému (LTIS) na vstupní signál  $x(t)$  můžeme použít následující vztahy, které vyplývají z vlastostí konvoluce a Dirakovy funkce ( $a'(t) = h(t)$ )

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^t x(\tau) h(t - \tau) d\tau \\ y(t) &= \int_0^{\infty} x(t - \tau) h(\tau) d\tau \\ y(t) &= \int_{-\infty}^t x'(\tau) a(t - \tau) d\tau \\ y(t) &= \int_0^{\infty} x'(t - \tau) a(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Přenos  $H(\omega)$  lze určit pomocí zkušebního kosinusového signálu. Budeme-li přivádět na vstup lineárního časově invariantního systému kosinusovku o amplitudě  $A$ , poto změřením poměru amplitud výstupní a vstupní kosinusovky najdeme  $|H(\omega)|$  a změřením fázového posuvu výstupní kosinusovky vůči vstupní najdeme  $\arg H(\omega) = \varphi(\omega)$ .

### 17.3 DLTIS

V číslicových systémech namísto s analogovými signály pracujeme s číselnými posloupnostmi. Vstupní signál je představován číselnou posloupností  $\{x(nT), n \in \mathbb{Z}\}$ , výstupní signál (odezva) číselnou posloupností  $\{y(nT), n \in \mathbb{Z}\}$ . Zápis  $x(nT)$  připomíná, že toto číslo může představovat velikost signálu v čase  $nT$ , kde  $T$  je perioda vzorků signálu. Pokud budeme uvažovat (vstupní) signál jen jako číselnou posloupnost bez bližšího vztahu k času, můžeme vzorky signálu zapisovat jen s indexem  $n$ ,  $x(n)$ . Pro mnohé případy použití číslicového zpracování je časová složka významná (např. pro filtraci signálu), proto se budeme přidržovat zápisu  $x(nT)$ .

Diskrétní lineární časově invariantní systém převádí vstupní signál (posloupnost)  $\{x(nT)\}$  na výstupní posloupnost (signál)  $\{y(nT)\}$ , takže  $\{y(nT)\} = \mathcal{T}\{x(nT)\}$ . Impulzní odezva číslicového systému je jeho odezva na jediný vstupní vzorek aplikovaný v čase  $t = 0$ . Vstupní signál (posloupnost) je  $\{x(nT) = 1$  pro  $n = 0, x(nT) = 0$  pro  $n \neq 0\}$ . Při určování impulzní odezvy číslicového systému předpokládáme, že před aplikací jednotkového impulzu je systém ustálen.

Pro lineární diskrétní časově invariantní systémy platí zákon superpozice – vstupní signál rozložíme na vhodné části, najdeme odezvy na jednotlivé části a odezvy složíme. Dostaneme tak odezvu na vstupní signál. Vstupní signál  $\{x(nT)\}$  můžeme rozložit na soustavu jednotlivých vzorků, ty považujeme za impulzy velikosti  $x(iT)$  umístěné v okamžicích  $iT$ . Odezva na takové impulzy je  $x(iT)\{h(nT - iT)\}$ . Celá výstupní posloupnost jako odezva na vstupní signál  $\{x(nT)\}$  je pak sumou všech odezev, odezev pro všechna  $i$ .

$$\{y(nT)\} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x(iT)\{h(nT - iT)\},$$

odkud plyne

$$y(nT) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} x(iT)h(nT - iT)$$

(pro kauzální systém je  $h(nT - iT) = 0$  pro  $nT - iT < 0$  a proto horní mez proměnné  $i$  je  $n$ ).

## Kapitola 18

# Kódování

### 18.1 Jednotky

#### 18.1.1 Jednotky pro měření informace

Každá zpráva nese určité množství informace o nějaké události. Množství informace spojujeme s neočekávaností události, o které hovoří zpráva. Čím je událost méně očekávána, tím více informace zpráva nese. Množství přijaté informace

$$I = \log_2 \frac{P_2}{P_1} = \log_2 P_2 - \log_2 P_1 \quad [\text{bit}],$$

kde  $P_1$  je pravděpodobnost události před přijetím zprávy a  $P_2$  pravděpodobnost události po přijetí zprávy. V případě, že po přijetí zprávy je naše znalost o události taková, že je jisté, že se koná ( $P_2 = 1$ ), potom se vztah pro určení množství informace ve zprávě zjednoduší na  $I = -\log_2 P_1$ .

#### 18.1.2 Entropie diskretních zpráv

Diskretní zpráva je taková, jejíž přenos se děje po symbolech – písmenech abecedy, číslicích. Nechť počet všech symbolů v abecedě je  $m$  a počet předaných symbolů  $n$ . V oněch  $n$  symbolech mohou být symboly abecedy zastoupeny různě, získáme tak různé  $n$ -tice symbolů, kterých je dohromady  $m^n$ . Bude-li pravděpodobnost výskytu každé z možných  $n$ -tic symbolů stejná, pak pravděpodobnost výskytu některé konkrétní  $n$ -tice bude  $P_1 = \frac{1}{m^n}$  a množství informace v jedné zprávě o  $n$  symbolech bude  $I = -\log_2 P_1 = -\log_2 \frac{1}{m^n} = \log_2 m^n = n \log_2 m$ . Entropie takové zprávy, čili množství informace na jeden symbol, bude

$$H = \frac{I}{n} = \log_2 m \quad [\text{bit/symbol}].$$

Běžně při přenosu zpráv ale není pravděpodobnost přenosu každé z  $n$ -tic stejná, navíc i symboly jsou užívány s různou pravděpodobností.

$$I_N = -(n_1 \log_2 P_1 + n_2 \log_2 P_2 + \dots + n_m \log_2 P_m)$$

Průměrné množství informace na jeden symbol je

$$\begin{aligned} H = \frac{I_N}{N} &= -\left(\frac{n_1}{N} \log_2 P_1 + \frac{n_2}{N} \log_2 P_2 + \dots + \frac{n_m}{N} \log_2 P_m\right) = \\ &= -(P_1 \log_2 P_1 + P_2 \log_2 P_2 + \dots + P_m \log_2 P_m) \quad [\text{bit/symbol}]. \end{aligned}$$

Největší entropii má taková abeceda symbolů, jejíž symboly jsou používány se stejnou četností. Nejsou-li symboly používány se stejnou četností, je entropie nižší. Předávání zpráv ve formě textu



se děje s entropií silně sníženou vůči maximu. Nejen že se jednotlivé symboly (písmena) vyskytují s různými pravděpodobnostmi, ale i mezi předávanými písmeny existuje silná korelace.

Skutečnost, že danou abecedu nevyužíváme pro přenos s nejvyšší entropií, zachycuje pojem *redundance* neboli *nadbytečnost*. Definuje se vztahem

$$R = \frac{H_{max} - H}{H_{max}} = 1 - \frac{H}{H_{max}}.$$

Poměr  $\frac{H}{H_{max}}$  vlastně udává, s jakou efektivitou využíváme maximálně dosažitelnou entropii. Při dané abecedě bychom mohli tedy informaci posílat rychleji. To, že plně nevyužíváme možnosti abecedy, nás však z druhé strany chrání před poruchami. Bez nadbytečnosti by bylo možné zprávu správně pochopit jen při velmi nízké úrovni poruch.

### 18.1.3 Entropie spojitých zpráv

### 18.1.4 Informační kapacita

## 18.2 Kódování bez rušení

Kódem se nazývá systém korespondence mezi diskrétními prvky zprávy – symboly, písmeny abecedy – a signály, s jejichž pomocí se tyto symboly zaznamenávají nebo předávají po spojovém kanálu. Kódování tedy spočívá v přeměně předávané zprávy na posloupnost relativně jednoduchých elektrických signálů.

### 18.2.1 Střední výkon

### 18.2.2 Počet úrovní

Kolik má mít zakódovaný signál úrovní, aby byl přenos co nejefektivnější? V praxi se nejčastěji volí dvouúrovňový signál. Šum neruší, dokud zůstanou úrovně (šumem ovlivněné) v tolerančním pásmu. Pro přenos právě dvou úrovní je třeba nejmenší výkon při daném rušení (neboli daný šum nejméně ruší), nejmenší potřebná energie, ale je pomalejší.

### 18.2.3 Huffmanovo kódování

Při kódování je následující postup. Nejprve přenášené symboly seřadíme podle pravděpodobnosti výskytu. Ze dvou symbolů s nejnižší pravděpodobností vytvoříme symbol nový, jehož pravděpodobnost je dána součtem pravděpodobností výskytu symbolů, ze kterých vznikl. Symboly znovu setřídíme a pokračujeme stejným způsobem, až vzniknou jen dva symboly. Poté „jdeme zpět“ a přiřazujeme „0“ a „1“ pro každou úroveň.

### 18.2.4 Fanovo kódování

Symboly se rozdělí na dvě skupiny, které by měly, pokud možno, mít stejnou pravděpodobnost a měly by jít dále dělit obdobným způsobem. Nakonec opět přiřadíme „0“ a „1“.

## 18.3 Kódování s nadbytečností

Když je rušení při přenosu příliš velké, pak se volí  $N < N_0$ , kde  $N_0$  je počet znaků možný a  $N$  počet znaků užívaných. Je dobré konkrétní kód volit tak, aby při změně jednoho bitu nastala chyba (přijmul by se nedovolený znak). Při vysílání zpráv vysíláme některou z  $N$  kombinací. V důsledku

chyby se může právě vysílaná kombinace změnit na některou z  $N_0 - 1$  kombinací, tj. pro danou kombinaci zjistíme právě  $N_0 - 1$  různých chyb. Můžeme vysílat kteroukoliv z  $N$  dovolených kombinací, pro každou z nich rozlišíme  $N_0 - 1$  chyb. Celkově máme tedy  $N(N_0 - 1)$  různých případů chyb. Vysíláme-li právě některou dovolenou kombinaci, pak vlivem chyby může tato kombinace přejít na  $N_0 - N$  kombinací nedovolených, a takové kombinace jsme schopni zjistit. Pro  $N$  kombinací je tedy zjistitelných  $N(N_0 - N)$  chyb. Každé dovolené kombinaci přiřadím jednu nebo několik kombinací nedovolených – nejlépe podle pravděpodobnosti, ze které dovolené kombinace příslušná nedovolená vznikne.

### 18.3.1 Hamingova kódová vzdálenost

Je to nejmenší ze vzdáleností dvojic kódových slov. Určuje schopnost kódu objevovat a opravovat chyby. Pro odhalování jednonásobných chyb ( $q = 1$ ) postačuje Hamingova kódová vzdálenost  $\varrho = 2$ . Pro odhalení všech chyb s násobností  $q_d$  a menší postačuje, aby dovolené kombinace měly Hamingovu kódovou vzdálenost  $\varrho \geq q_d + 1$ .

Chybná kombinace je opravitelná (jednoznačně), pokud její vzdálenost k dovolené kombinaci, ze které tato chybná kombinace vznikla, je menší než vzdálenost ke kterékoliv jiné dovolené kombinaci. Chceme-li jednoznačně opravovat chybné kombinace s násobností chyby  $q_c$  a menší, potom musí platit  $\varrho \geq 2q_c + 1$ . Není-li pravděpodobnost chybného přenosu symbolu příliš velká, pak se při použití kódů s opravou zvyšuje pravděpodobnost správného přenosu symbolu. Pokud je pravděpodobnost chyby při přenosu symbolu vysoká, je použití kódů s nadbytečností málo efektivní.

### 18.3.2

Používají se také dekodovací zařízení „erasure channel“, které přijímají „0“ nebo „1“. Navíc mají definovanou neurčitou oblast, kdy není rozhodnuto, zda byla přijmuta „0“ nebo „1“, ale dosadí se symbol neurčitosti. Vychází se z toho, že je snazší určit, jaké znaky mají být na místě symbolů neurčitosti, než opravovat kódy, kde jsou všechny dvojkové znaky kombinace jasné, ale některé z nich jsou přijaty chybně. Při dané kódové vzdálenosti  $\varrho$  je největší násobnost opravitelných symbolů neurčitosti  $t$  rovna násobnosti zjistitelných chyb,  $\varrho \geq t + 1$ . Skutečnost že vím, na kterém místě kombinace není jasné, zda jde o znak „0“ nebo „1“ způsobuje, že postačuje pouze kódová vzdálenost pro odhalení chyby k tomu, abych chybu opravil.

# Kapitola 19

## Kódy

Systematické a cyklické kódy patří k nejběžnějším *blokovým kódům*. Blokované kódy mají pro každý přenášený symbol zvláštní kódovou kombinaci (způsob zakódování nezáleží na zakódování jiného bloku). Kódové kombinace systematických i cyklických kódů se dělí na základní (informační) a kontrolní (prověřovací). Každá z těchto skupin symbolů ve všech kódových kombinacích zaujímá tytéž pozice. Tyto kódy se obvykle značí  $(n, k)$  kódy, kde  $n$  je délka kódu a  $k$  počet informačních znaků v kódové kombinaci. Písmenem  $N$  bude dále značen počet kódových kombinací (znaků, symbolů) kódu.

*Lineární kód* je takový, jehož kódová slova tvoří lineární prostor (součet dvou kódových slov je rovněž kódové slovo).

### 19.1 Systematické kódy

Do kódových kombinací systematického kódu se zahrnuje nulový vektor (samé nuly). Sestaví se *vytvářející matice*  $\mathbb{G}$ , která má  $k$  nenulových lineárně nezávislých vektorů. Sestavuje se tak, že se nejdříve sestaví čtvercová diagonální matice o  $k$  řádcích a sloupcích. Poté se řádky doplní o  $n - k$  znaků (zprava), které slouží kontrole. Kontrolní znaky se dopisují tak, aby počet jedniček v každém řádku nebyl menší než zadaná Hamingova kódová vzdálenost  $\varrho$  (tato kódová vzdálenost samozřejmě musí být dodržena mezi všemi vektory vytvářející matice  $\mathbb{G}$ ). Zbývajících  $N - k - 1$  vektorů ( $k$  vektorů je ve vytvářející matici, jeden vektor je nulový) se získá jako lineární kombinace vektorů vytvářející matice. Nelze-li kód sestavit pro zadané  $n$ , je nutné  $n$  zvětšit.

Nyní potřebujeme sestavit *prověřovací (kontrolní) matici*  $\mathbb{H}$ . Vektor této matice má délku  $n$  a vyžaduje se od něj, aby jeho skalární součin s kterýmkoliv vektorem vytvářející matice byl nulový. Hledáme tedy prověřovací matici  $\mathbb{H}$ , pro kterou platí  $\mathbb{G} \cdot \mathbb{H}^T = 0$  (0 představuje nulovou matici). Z toho lze již vypočítat kontrolní matici  $\mathbb{H}$ .

### 19.2 Cyklické kódy

Výchozí údaje pro sestavení cyklického kódu jsou tytéž, jako údaje pro sestavení systematického kódu. Odlišnost tkví v tom, že systematický kód lze vytvořit pro libovolnou kombinaci  $(n, k)$ , zatímco cyklické kódy lze sestavit je pro některé kombinace  $(n, k)$ . Cyklické kódy nevyužívají kombinaci s nulovými prvky, proto počet kombinací je o jednu nižší než počet kombinací, které může využít systematický kód.

Pro zápis vektorů cyklického kódu se používá polynomiální formy. Vektor s prvky  $a_0 a_1 \dots a_{n-1}$  se

zapíše

$$v(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_{n-1}x^{n-1}.$$

Násobíme-li  $v(x)$  proměnnou  $x$ , dostáváme rotace. Aby došlo k přenosu prvku zprava doleva, formálně se zavádí  $x^n = 1$ . Po vynásobení  $v(x)$  proměnnou  $x$  se tak  $a_{n-1}$  ocitne zcela vlevo. Násobením  $v(x)$  proměnnou  $x$  získáme

$$v(x) \cdot x = v'(x) = a_{n-1} + a_0x + a_1x^2 + \cdots + a_{n-2}x^{n-1}.$$

Je zřejmé, že při takovémto způsobu vytváření mohou vytvořit pouze  $n$  kombinací.

Sestavení cyklického kódu začíná určením vytvářecího (generujícího) polynomu  $g(x)$  stupně  $n - k$ . Tento polynom se obvykle vybírá z tabulek, kde jsou vytvářecí polynomy cyklických kódů uvedeny pro kombinace  $(n, k)$ , pro které existují. Vytvářecí polynom musí beze zbytku dělit polynom  $1 + x^n$ . Operace s polynomy se provádějí podle pravidel aritmetiky modulo 2. Podle vytvářecího polynomu se vytvoří vytvářecí matice  $\mathbb{G}$ , která má  $k$  řádků. První řádek matice  $\mathbb{G}$  tvoří koeficienty u mocnin  $x$  vytvářecího polynomu, který se zprava doplní nulami tak, aby měl  $n$  prvků. Další řádky matice se pak doplňují tak, že postupně přesouváme prvky prvního řádku o 1, o 2,  $\dots$  místa doprava (znaky vysunuté z matice vpravo se umísťují v matici na levé straně). Kód má mít  $N$  kombinací, ve vytvářecí matici jich je jen  $k$ . Zbývající najdu jako lineární kombinace vektorů vytvářecí matice.

Kontrolní polynom  $h(x)$  získáme tak, že polynom  $1 + x^n$  dělíme generačním polynomem  $g(x)$ . Vzhledem k tomu, že generační polynom je stupně  $n - k$  a dělený polynom je stupně  $n$ , je kontrolní polynom  $h(x)$  stupně  $n - (n - k) = k$ .

# Rejstřík

- ALS TTL, 33
- AS TTL, 33
- blokový kód, 51
- CCD, 36
- cholesterická fáze, 29
- CMOS, 34
- CMR, 31
- diak, 18
- difuze příměsí, 14
- digitron, 28
- diody
  - difuzní, 11
  - Esakiho, 8
  - hrotové, 10
  - kapacitní, 8
  - PIN, 9
  - planární, 11
  - plošné difuzní, 11
  - plošné slitinové, 11
  - s přivařeným hrotem, 10
  - Schottkyho, 9
  - spínací, 7
  - stabilizační, 8
  - tunelové, 8
  - usměrňovací, 7
  - vysokofrekvenční, 7
  - Zenerovy, 7
- diskretizace, 44
- displeje
  - aktivní, 28
  - DSTND, 29
  - FED, 30
  - FLCD, 29
  - PALC, 30
  - pasivní, 28
  - PD, 29
  - STND, 29
  - TFT, 29
  - TND, 29
  - DLTIS, 46
  - DSTND, 29
  - DTL, 33
  - dvojkový doplněk, 41
    - násobení a dělení dvěma, 42
    - sčítání, 41
  - ECL, 33
  - EEPROM, 35
  - elektrochemické leptání, 14
  - elektroluminiscence, 22
  - ELSI, 31
  - entropie, 48
  - epitaxní růst, 14
  - EPROM, 35
  - FED, 30
  - filamentace, 20
  - FLCD, 29
  - fotodioda, 25
    - lavinová PIN, 26
  - fotoelektrický displej, 29
  - fotoelektrický jev
    - vnitřní, 22
    - vnější, 22
  - fotoemise, 22
  - fotoluminiscence, 22
  - fotonka, 27
  - fotonásobič, 27
  - fotorezistor, 25
  - fototranzistor, 26
  - fototyristor, 26
  - fotovodivostní jev, 25
  - fotovodivostní režim, 25
  - fotovolatický jev, 25
  - fotovoltaický režim, 25
  - funkce
    - Petriczkova, 39
  - generující polynom, 52

- GTO, 20
- Hamingova kódová vzdálenost, 50
- hradlový režim, 25
- hybridní IO, 31
- IGBT, 17
- IGCT, 21
- IGFET, 16
- implikant funkce, 39
- impulzní odezva, 45
- integrované obvody
  - hybridní, 31
  - monolytické, 31
- inverzní dioda, 9
- inverzní obsazení hladin, 24
- iontová implantace, 14
- kapalné krystaly, 29
- katodoluminiscence, 22
- klopný obvod
  - D, 40
  - JK, 40
  - RS, 40
  - RS-T, 40
- koherence
  - prostorová, 24
  - časová, 24
- koherentní záření, 23
- kombinační obvody, 33
- kontrolní matice, 51
- kvantizační krok, 44
- kvantizátor, 44
- kvantová účinnost, 22
- kvantování, 44
- kód
  - blokový, 51
  - lineární, 51
- kódování
  - Fanovo, 49
  - Huffmanovo, 49
- laser, 23
  - polovodičový, 24
- LED, 23
- lineární kód, 51
- logika
  - DTL, 33
  - ECL, 33
  - MTL, 33
  - TTL, 33
  - LS TTL, 33
  - LSI, 31
  - LTIS, 45
- matice
  - kontrolní, 51
  - prověřovací, 51
  - vytvářecí, 51
- mezní přímka, 13
- MISFET, 16
- MNOS, 34
- monolytické IO, 31
- MOS, 16
- MSI, 31
- MTL, 33
- multiplexer, 43
- nadbytečnost, 49
- nekoherentní záření, 22
- nematická fáze, 29
- NMOS, 34
- obsazení hladin
  - inverzní, 24
- odezva
  - impulzní, 45
- odporový režim, 25
- operační zesilovač, 31
- PALC, 30
- paměť, 35
  - asociativní, 35
  - pevná, 35
  - programovatelná pevná, 35
  - s libovolným přístupem, 35
  - s náhodným přístupem, 35
- paměť
  - elektronicky vymazatelná programovatelná, 35
  - vymazatelná programovatelná, 35
- PD, 29
- Petriczkova funkce, 39
- plazmový displej, 29
- PMOS, 34
- polynom

- generující, 52
- vytvářecí, 52
- potenciálová jáma, 36
- PROM, 35
- prostý implikant, 39
- proud
  - doznívání, 20
- proudový zesilovací činitel, 12
- prověřovací matice, 51
- průraz diody
  - lavinový, 10
  - tepelný, 10
  - zenerův, 10
- RAM, 35
- redundance, 49
- reflexní, 29
- rezonátor
  - Fabri-Perotův, 24
- ROM, 35
- saturační napětí, 13
- sekvenční obvody, 33
- smektická fáze, 29
- solární články, 26
- SSI, 31
- STND, 29
- STTL, 33
- tažení monokrystalu, 13
- teplotní součinitel, 7
- TFT, 17, 29
- TND, 29
- transmisní, 29
- tranzistor
  - slitinový, 13
- triak, 20
- TTL, 33
- tyristor, 18
  - vypínací, 20
- varaktor, 8
- varikap, 8
- VLSI, 31
- vnitřní fotoelektrický jev, 22
- vnější fotoelektrický jev, 22
- vypínací doba, 20
- vypínací zesílení, 20
- vytvářecí matice, 51
- vytvářecí polynom, 52
- zesilovač
  - operační, 31
  - ideální, 32
  - reálný, 32
- záření
  - koherentní, 23, 24
  - nekoherentní, 22