

|        |                                                                                                          |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|        | Předmluva k českému vydání . . . . .                                                                     | 5  |
|        | Seznam nejdůležitějších symbolů . . . . .                                                                | 12 |
| I.     | ÚVOD . . . . .                                                                                           | 17 |
| 1.     | <i>Historický přehled</i> . . . . .                                                                      | 17 |
| 2.     | <i>Současné tranzistory řízené elektrickým polem</i> . . . . .                                           | 19 |
|        | Literatura . . . . .                                                                                     | 21 |
| II.    | STRUKTURA MIS . . . . .                                                                                  | 22 |
| 3.     | <i>Úvod</i> . . . . .                                                                                    | 22 |
| 4.     | <i>Elektrofyzikální model ideální struktury MIS</i> . . . . .                                            | 22 |
| 4.1.   | Náboj rozložený pod povrchem polovodiče . . . . .                                                        | 25 |
| 4.2.   | Charakteristika kapacita—napětí ideální struktury MIS . . . . .                                          | 31 |
| 4.2.1. | Charakteristika kapacita—napětí při nízkých kmitočtech . . . . .                                         | 32 |
| 4.2.2. | Charakteristika kapacita—napětí při vysokých kmitočtech . . . . .                                        | 34 |
| 4.2.3. | Nerovnovážná charakteristika kapacita—napětí . . . . .                                                   | 35 |
| 5.     | <i>Elektrofyzikální model skutečné struktury MIS</i> . . . . .                                           | 36 |
| 5.1.   | Klasifikace povrchových stavů a nábojů ve struktuře MIS . . . . .                                        | 36 |
| 5.2.   | Metody určení elektrofyzikálních parametrů skutečné struktury MIS . . . . .                              | 38 |
| 5.2.1. | Kapacitní porovnávací metody zkoumání struktur MIS . . . . .                                             | 39 |
| 5.2.2. | Přímé admitanční metody zkoumání struktur MIS . . . . .                                                  | 44 |
| 5.2.3. | Zhodnocení metod zkoumání struktur MIS . . . . .                                                         | 54 |
| 6.     | <i>Vliv kontaktního potenciálového rozdílu, teploty a osvětlení na parametry struktury MIS</i> . . . . . | 55 |
| 6.1.   | Vliv kontaktního potenciálového rozdílu . . . . .                                                        | 55 |
| 6.2.   | Vliv teploty . . . . .                                                                                   | 59 |
| 6.3.   | Vliv osvětlení . . . . .                                                                                 | 60 |
| 7.     | <i>Vodivost a průraz dielektrické vrstvy ve struktuře MIS</i> . . . . .                                  | 62 |
| 7.1.   | Transport náboje v dielektrické vrstvě struktury MIS . . . . .                                           | 62 |
| 7.1.1. | Schottkyho proud . . . . .                                                                               | 62 |
| 7.1.2. | Tunelový proud . . . . .                                                                                 | 63 |
| 7.1.3. | Proud Frenkela—Poolèa . . . . .                                                                          | 64 |
| 7.1.4. | Proud omezený rozloženým nábojem . . . . .                                                               | 64 |
| 7.1.5. | Přeskokový proud . . . . .                                                                               | 65 |
| 7.1.6. | Ionový proud . . . . .                                                                                   | 65 |
| 7.1.7. | Průchod proudu v některých strukturách MIS . . . . .                                                     | 65 |
| 7.2.   | Průraz vrstvy SiO <sub>2</sub> ve struktuře MOS . . . . .                                                | 69 |
| 8.     | <i>Druhy používaných dielektrických vrstev a fyzikálně-chemické vlastnosti struktury MIS</i> . . . . .   | 71 |
| 8.1.   | Vrstva SiO <sub>2</sub> ve struktuře MOS . . . . .                                                       | 71 |
| 8.1.1. | Pohyblivý náboj ve vrstvě oxidu . . . . .                                                                | 72 |
| 8.1.2. | Vázaný náboj $Q_{ss}$ povrchových stavů . . . . .                                                        | 77 |

|         |                                                                                                     |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.3.  | Proměnný náboj $Q_{st}$ povrchových stavů . . . . .                                                 | 78  |
| 8.1.4.  | Vliv parametrů vytváření oxidu a vliv oteplení na povrchové stavy . . . . .                         | 81  |
| 8.1.5.  | Fyzikálně-chemické znázornění povrchových stavů . . . . .                                           | 82  |
| 8.2.    | Vrstva $Si_3N_4$ ve struktuře MNS . . . . .                                                         | 85  |
| 8.3.    | Vrstva $Al_2O_3$ ve struktuře MAS . . . . .                                                         | 86  |
| 8.4.    | Podvojně vrstvy dielektrika ve struktuře MIS . . . . .                                              | 87  |
| 8.4.1.  | Struktura M — $P_2O_5$ , $SiO_2$ — $SiO_2$ —Si . . . . .                                            | 87  |
| 8.4.2.  | Struktura MNOS (M— $Si_3N_4$ — $SiO_2$ —Si) . . . . .                                               | 88  |
| 8.4.3.  | Struktura MAOS (M— $Al_2O_3$ — $SiO_2$ —Si) . . . . .                                               | 88  |
|         | Literatura . . . . .                                                                                | 89  |
| III.    | POLOVODIČOVÉ DIODY MIS . . . . .                                                                    | 99  |
| 9.      | <i>Povrchový varaktor MIS</i> . . . . .                                                             | 99  |
| 10.     | <i>Průraz a tunelování v podpovrchové oblasti polovodiče; elektroluminiscenční metoda</i> . . . . . | 100 |
| 11.     | <i>Tunelová dioda MIS</i> . . . . .                                                                 | 103 |
|         | Literatura . . . . .                                                                                | 106 |
| IV.     | FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY, CHARAKTERISTIKY A PARAMETRY TRANZISTORU MIS . . . . .                            | 108 |
| 12.     | <i>Úvod</i> . . . . .                                                                               | 108 |
| 13.     | <i>Princip činnosti, základní fyzikální děje</i> . . . . .                                          | 110 |
| 13.1.   | Uzemněný emitor, kolektor a podložka ( $U_{GS} \neq 0$ ) . . . . .                                  | 111 |
| 13.2.   | Uzemněný emitor a podložka, $U_{GS} < 0$ , $U_{DS} < 0$ . . . . .                                   | 112 |
| 13.3.   | Vliv napětí podložky, $U_{BS} \neq 0$ . . . . .                                                     | 114 |
| 14.     | <i>Voltampérové charakteristiky tranzistoru MIS</i> . . . . .                                       | 114 |
| 14.1.   | Voltampérové charakteristiky zjednodušeného modelu tranzistoru MIS . . . . .                        | 115 |
| 14.1.1. | Charakteristiky a označení čtyř typů tranzistoru MIS . . . . .                                      | 119 |
| 14.2.   | Skutečné voltampérové charakteristiky tranzistoru MIS . . . . .                                     | 121 |
| 14.2.1. | Vliv změn náboje $Q_B$ v závislosti na délce kanálu . . . . .                                       | 121 |
| 14.2.2. | Prahové napětí . . . . .                                                                            | 123 |
| 14.2.3. | Vliv sériových odporů emitoru a kolektoru . . . . .                                                 | 127 |
| 14.2.4. | Zpětná vazba kolektor—kanál . . . . .                                                               | 128 |
| 14.2.5. | Pohyblivost nosičů proudu v kanále tranzistoru MIS . . . . .                                        | 133 |
| 14.2.6. | Vliv difúzního proudu . . . . .                                                                     | 137 |
| 14.2.7. | Činnost tranzistoru MIS v předprahové oblasti . . . . .                                             | 138 |
| 14.2.8. | Průraz v tranzistoru MIS . . . . .                                                                  | 139 |
| 15.     | <i>Náhradní obvody a dynamické parametry</i> . . . . .                                              | 143 |
| 15.1.   | Modely ideálního tranzistoru . . . . .                                                              | 143 |
| 15.1.1. | Modely pro velké signály . . . . .                                                                  | 143 |
| 15.1.2. | Modely pro malé nízkofrekvenční signály . . . . .                                                   | 146 |
| 15.1.3. | Modely pro malé vysokofrekvenční signály . . . . .                                                  | 151 |
| 15.2.   | Modely skutečného tranzistoru . . . . .                                                             | 153 |
| 15.2.1. | Modely pro velké signály a malé nízkofrekvenční signály . . . . .                                   | 153 |
| 15.2.2. | Modely pro malé vysokofrekvenční signály . . . . .                                                  | 156 |
| 16.     | <i>Statické parametry</i> . . . . .                                                                 | 159 |
| 17.     | <i>Vliv teploty na parametry tranzistoru MIS</i> . . . . .                                          | 160 |
| 18.     | <i>Model pro návrh počítačem (shrnutí kapitoly)</i> . . . . .                                       | 162 |
|         | Literatura . . . . .                                                                                | 167 |



|         |                                                                                               |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V.      | DRUHY TRANZISTORŮ MIS. KONSTRUKCE A TECHNOLOGIE                                               | 173 |
| 19.     | Tranzistor MOS s obohacovaným kanálem                                                         | 173 |
| 19.1.   | Tranzistor MOS s obohacovaným kanálem typu P                                                  | 173 |
| 19.2.   | Tranzistor MOS s obohacovaným kanálem typu N                                                  | 175 |
| 20.     | Tranzistor MOS s ochuzovaným kanálem                                                          | 176 |
| 21.     | Doplňkový (komplementární) pár tranzistorů MOS                                                | 180 |
| 22.     | Tranzistory zhotovené metodou samomaskování                                                   | 182 |
| 22.1.   | Samomaskování hradlem                                                                         | 182 |
| 22.1.1. | Tranzistor s křemíkovým hradlem                                                               | 182 |
| 22.1.2. | Tranzistor s molybdenovým nebo wolframovým hradlem RMOST                                      | 184 |
| 22.1.3. | Implantace iontů v oblastech emitoru a kolektoru                                              | 185 |
| 22.2.   | Samomaskování pomocí místní oxidace                                                           | 186 |
| 22.2.1. | Výrobní postup LOCOS                                                                          | 186 |
| 22.2.2. | Metoda tlustých oxidových vrstev (SATO)                                                       | 187 |
| 22.2.3. | Výrobní postup LOCOS II                                                                       | 187 |
| 23.     | Tranzistor zhotovený metodou dvojí difúze D/MOS                                               | 189 |
| 24.     | Tranzistor MOS na izolační podložce                                                           | 190 |
| 25.     | Jiné druhy tranzistorů MIS                                                                    | 192 |
| 25.1.   | Tranzistor MIS jako paměťový prvek                                                            | 192 |
| 25.2.   | Dvouhradlový tranzistor MOS (tetroda MOS)                                                     | 195 |
| 25.3.   | Tranzistor VMOS                                                                               | 196 |
| 26.     | Některé otázky technologie tranzistorů MIS                                                    | 196 |
| 26.1.   | Ochrana dielektrika hradla před průrazem                                                      | 196 |
| 26.2.   | Způsoby snížení prahového napětí $U_T$                                                        | 197 |
|         | Literatura                                                                                    | 199 |
| VI.     | ŠUMY V TRANZISTORECH MIS                                                                      | 203 |
| 27.     | Úvod                                                                                          | 203 |
| 27.1.   | Zdroje šumu                                                                                   | 203 |
| 27.2.   | Parametry charakterizující šumové vlastnosti aktivní součástky                                | 204 |
| 28.     | Termický šum                                                                                  | 208 |
| 29.     | Šum „ $1/f$ “                                                                                 | 212 |
|         | Literatura                                                                                    | 215 |
| VII.    | VLIV IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ NA ČINNOST TRANZISTORŮ MIS                                            | 217 |
| 30.     | Úvod                                                                                          | 217 |
| 31.     | Závislost charakteristik tranzistoru MIS na ionizačním záření                                 | 218 |
| 32.     | Vlastnosti náboje $Q_t$ — experimentální zkoumání                                             | 219 |
| 32.1.   | Druh záření a pohlcená dávka                                                                  | 219 |
| 32.2.   | Polarizace struktury během ozařování                                                          | 220 |
| 33.     | Fenomenologické modely vzniku náboje $Q_t$ a vzniku povrchových stavů $N_{st}$ vlivem ozaření | 221 |
| 34.     | Zlepšení odolnosti tranzistorů MIS proti ionizačnímu záření                                   | 223 |
| 34.1.   | Vliv technologie výroby struktury M—SiO <sub>2</sub> —Si                                      | 223 |
| 35.     | Odstranění následků záření                                                                    | 225 |
|         | Literatura                                                                                    | 225 |

|         |                                                                                                 |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| VIII.   | MĚŘENÍ PARAMETRŮ TRANZISTORŮ MIS A TESTOVÁNÍ ČIPŮ<br>INTEGROVANÝCH OBVODŮ MIS . . . . .         | 229 |
| 36.     | Úvod . . . . .                                                                                  | 229 |
| 37.     | Měření funkčních parametrů tranzistorů MIS . . . . .                                            | 229 |
| 37.1.   | Voltampérové charakteristiky . . . . .                                                          | 229 |
| 37.2.   | Statické parametry . . . . .                                                                    | 230 |
| 37.3.   | Parametry při malých hodnotách signálu . . . . .                                                | 231 |
| 38.     | Měření fyzikálních parametrů struktury tranzistoru MIS . . . . .                                | 232 |
| 38.1.   | Činitel $\beta$ . . . . .                                                                       | 232 |
| 38.2.   | Pohyblivost . . . . .                                                                           | 233 |
| 38.3.   | Délka kanálu . . . . .                                                                          | 234 |
| 38.4.   | Sériové odpory emitoru a kolektoru . . . . .                                                    | 235 |
| 38.5.   | Rozložení koncentrace příměsí . . . . .                                                         | 236 |
| 38.6.   | Parametry povrchových stavů . . . . .                                                           | 236 |
| 39.     | Testování čipů integrovaných obvodů MIS . . . . .                                               | 237 |
|         | Literatura . . . . .                                                                            | 238 |
| IX.     | TRANZISTOR MIS V ANALOGOVÝCH OBVODECH . . . . .                                                 | 240 |
| 40.     | Nízkofrekvenční zesilovače . . . . .                                                            | 240 |
| 40.1.   | Základní zapojení tranzistoru MIS . . . . .                                                     | 240 |
| 40.1.1. | Zapojení se společným emitorem . . . . .                                                        | 240 |
| 40.1.2. | Zapojení se společným kolektorem . . . . .                                                      | 244 |
| 40.1.3. | Zapojení se společným hradlem . . . . .                                                         | 248 |
| 40.1.4. | Symetrizační zesilovač (fázový invertor) . . . . .                                              | 250 |
| 40.2.   | Napájení a stabilizace pracovního bodu . . . . .                                                | 251 |
| 40.2.1. | Volba pracovního bodu . . . . .                                                                 | 251 |
| 40.2.2. | Napájecí obvody tranzistoru MIS . . . . .                                                       | 252 |
| 40.3.   | Tranzistor MIS jako odporová zátěž . . . . .                                                    | 254 |
| 40.3.1. | Obvod s izolovanými tranzistory, podložka spojená s emitorem . . . . .                          | 255 |
| 40.3.2. | Obvod s tranzistory na společné podložce . . . . .                                              | 258 |
| 40.3.3. | Obvod s izolovanými tranzistory o opačném typu kanálu . . . . .                                 | 259 |
| 40.4.   | Zesilovač s tranzistorem MIS a tranzistorem bipolárním (hybridní, tj.<br>smíšený pár) . . . . . | 259 |
| 40.4.1. | Zesilovač s výstupním tranzistorem v zapojení SE . . . . .                                      | 260 |
| 40.4.2. | Zesilovač s výstupním tranzistorem v zapojení SB . . . . .                                      | 262 |
| 40.4.3. | Zesilovač s výstupním tranzistorem v zapojení SC . . . . .                                      | 263 |
| 40.5.   | Nelineární zkreslení . . . . .                                                                  | 266 |
| 40.5.1. | Harmonické složky nelineárních zkreslení . . . . .                                              | 267 |
| 40.5.2. | Intermodulační zkreslení . . . . .                                                              | 268 |
| 40.5.3. | Zkreslení křížovou modulací . . . . .                                                           | 269 |
| 41.     | Stejnoseměrné zesilovače . . . . .                                                              | 270 |
| 41.1.   | Úvod . . . . .                                                                                  | 270 |
| 41.2.   | Kompenzace teplotního driftu . . . . .                                                          | 271 |
| 41.2.1. | Zesilovač s nulovým driftem . . . . .                                                           | 272 |
| 41.2.2. | Vliv změny pracovního bodu a prahového napětí . . . . .                                         | 274 |
| 41.2.3. | Souměrný zesilovač . . . . .                                                                    | 275 |
| 41.2.4. | Svodový proud hradla . . . . .                                                                  | 277 |
| 41.2.5. | Příklady návrhu typických řešení . . . . .                                                      | 278 |
| 42.     | Vysokofrekvenční zesilovače . . . . .                                                           | 280 |
| 42.1.   | Kaskádový zesilovač . . . . .                                                                   | 281 |
| 42.2.   | Směšovače . . . . .                                                                             | 283 |



|         |                                                                                                                                |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 43.     | <i>Tranzistor MIS jako odpor řízený napětím</i>                                                                                | 285 |
| 43.1.   | Úvod                                                                                                                           | 285 |
| 43.2.   | Dělič řízený napětím                                                                                                           | 288 |
| 43.3.   | Obvody posouvačů fáze                                                                                                          | 289 |
| 43.4.   | Použití v analogových násobičích a děličích                                                                                    | 289 |
| 44.     | <i>Tranzistor MIS jako spínač v analogových obvodech</i>                                                                       | 291 |
| 44.1.   | Úvod                                                                                                                           | 291 |
| 44.2.   | Paralelní střídač                                                                                                              | 292 |
| 44.3.   | Sériový a sériově-paralelní střídač                                                                                            | 294 |
| 44.4.   | Analogový člen                                                                                                                 | 295 |
|         | Literatura                                                                                                                     | 298 |
| X.      | <b>MONOLITICKÉ INTEGROVANÉ OBVODY MIS</b>                                                                                      | 300 |
| 45.     | <i>Úvod</i>                                                                                                                    | 300 |
| 46.     | <i>Logické obvody</i>                                                                                                          | 302 |
| 46.1.   | Statické logické obvody s tranzistory stejného typu vodivosti kanálů                                                           | 303 |
| 46.1.1. | Invertor s oběma tranzistory s obohacovanými kanály typu P                                                                     | 303 |
| 46.1.2. | Invertor s tranzistorem s obohacovaným kanálem typu P a následujícím tranzistorem s ochuzovaným kanálem typu P (PEMIS — PDMIS) | 313 |
| 46.1.3. | Porovnání statických invertorů se zatěžovacími tranzistory MIS                                                                 | 314 |
| 46.1.4. | Logické funkční členy                                                                                                          | 317 |
| 46.2.   | Doplňkové (komplementární) logické obvody                                                                                      | 319 |
| 46.2.1. | Invertor složený z doplňkového páru tranzistorů MOS (doplňkový, tj. komplementární invertor)                                   | 320 |
| 46.2.2. | Doplňkové logické funkční členy                                                                                                | 325 |
| 46.3.   | Několikafázové dynamické logické obvody                                                                                        | 327 |
| 46.3.1. | Logické obvody dvoufázové proporcionální                                                                                       | 328 |
| 46.3.2. | Logické obvody dvoufázové neproporcionální                                                                                     | 329 |
| 46.3.3. | Logické obvody čtyřfázové                                                                                                      | 330 |
| 47.     | <i>Paměti MIS</i>                                                                                                              | 333 |
| 47.1.   | Prvky pamětí s libovolným výběrem informace, sestavené z tranzistorů o stejném typu vodivosti                                  | 335 |
| 47.1.1. | Prvky statické paměti                                                                                                          | 335 |
| 47.1.2. | Prvky dynamické paměti                                                                                                         | 336 |
| 47.2.   | Posuvné registry s tranzistory o stejném typu vodivosti kanálu                                                                 | 339 |
| 47.3.   | Prvky doplňkové (komplementární) paměti                                                                                        | 341 |
| 47.4.   | Pevná paměť (ROM) v provedení MIS                                                                                              | 343 |
| 48.     | <i>Součástky s nábojovou vazbou</i>                                                                                            | 344 |
| 48.1.   | Součástky typu BB                                                                                                              | 345 |
| 48.2.   | Součástky typu CC                                                                                                              | 346 |
|         | Literatura                                                                                                                     | 352 |
|         | Rejstřík                                                                                                                       | 356 |