

A-62: C-55
T2 EX. 1

2-621-27



2-621-278-2/1

MICHEL GIRARD



Institut Universitaire de Technologie, Cachan
Département Automatismes et Electronique de Puissance



COMPOSANTS ACTIFS DISCRETS

2

McGRAW-HILL

Paris — Auckland — Bogota — Caracas — Hambourg — Jakarta
— Lisbonne — Londres — Madrid — Mexico — Milan — Montréal
— New Delhi — New York — Panama — San Juan — São Paulo
— Singapour — Sydney — Tokyo — Toronto.

1990

Table des matières

Chapitre 4. Transistors à effet de champ	1
4.1. Présentation, principe, théorie des transistors à effet de champ	1
4.1.1. Idée directrice, principes simplifiés, domaines d'application	1
4.1.1.1. Conduction dans un barreau semiconducteur	1
4.1.1.2. Classification des transistors à effet de champ	2
4.1.1.3. Symbolisation	3
4.1.1.4. Domaines d'application des transistors à effet de champ	5
4.1.2. Transistors à jonction	7
4.1.2.1. Jonction PN	7
4.1.2.2. Étude qualitative du transistor à jonction JFET canal N	8
4.1.2.3. Étude quantitative du transistor à jonction JFET canal N	12
4.1.2.4. Relations simplifiées associées au transistor JFET	15
4.1.3. Transistors à grille isolée MOSFET	16
4.1.3.1. Condensateur métal-oxyde-semiconducteur	17
4.1.3.2. Étude qualitative du transistor NMOS à enrichissement	24
4.1.3.3. Étude qualitative du transistor NMOS à appauvrissement	28
4.1.3.4. Étude quantitative des MOSFET, relations simplifiées	31
4.1.4. Résumé des caractéristiques des transistors à effet de champ	34
4.1.5. Exercices	34
4.2. Aspect technologique des transistors à effet de champ	43
4.2.1. Fabrication des FET	43
4.2.1.1. Transistor à jonction JFET canal N	43
4.2.1.2. Transistors NMOS	44
4.2.1.3. Exemples de procédés de fabrication et de géométries réelles	46
4.2.2. Caractéristiques statiques réelles	49
4.2.2.1. Caractéristiques statiques du JET canal N	50
4.2.2.2. Caractéristiques statiques des NMOS	56
4.2.3. Influence de la température	60
4.2.3.1. Variation des paramètres du JFET canal N	60
4.2.3.2. Variation des paramètres des transistors NMOS	62

4.2.3.3.	Résistance thermique – limitation de puissance	64
4.2.4.	Dispersion de fabrication	64
4.2.4.1.	Transistors à jonction JFET canal N	65
4.2.4.2.	Transistors NMOS	65
4.2.5.	Point de repos et polarisation	66
4.2.5.1.	Droites de charges statique et dynamique	66
4.2.5.2.	Polarisation des transistors à effet de champ	67
4.2.6.	Association de transistors FET et bipolaires	77
4.2.7.	Transistors à effet de champ spéciaux	79
4.2.7.1.	Transistors JFET pour amplificateurs différentiels	79
4.2.7.2.	Transistors JFET utilisés en diode	79
4.2.7.3.	Transistors MESFET	80
4.2.7.4.	Transistors à effet de champ à double grille	81
4.2.7.5.	Transistors à effet de champ de puissance	82
4.2.8.	Exemples de caractéristiques	82
4.3.	Applications quasi statiques des transistors à effet de champ	95
4.3.1.	Sources à courant constant	95
4.3.1.1.	Utilisation d'un transistor JFET canal N	96
4.3.1.2.	Utilisation de deux transistors JFET	97
4.3.1.3.	Utilisation des transistors NMOS	99
4.3.2.	Fonctionnement en interrupteur statique	100
4.3.2.1.	Transistor JFET et NMOS à déplétion	101
4.3.2.2.	Transistor NMOS à enrichissement	102
4.3.3.	Fonctionnement en résistance commandée	102
4.3.3.1.	Exemples d'application	103
4.3.3.2.	Problème de la distorsion	105
4.3.3.3.	Étude théorique de la distorsion	107
4.3.4.	Exercices	109
4.4.	Amplificateurs continus et basses fréquences	113
4.4.1.	Schémas équivalents du transistor à effet de champ en régime lentement variable	113
4.4.1.1.	Paramètres naturels du JFET	113
4.4.1.2.	Détermination des paramètres du JFET	113
4.4.1.3.	Exemples de caractéristiques de composants discrets ..	115
4.4.2.	Montages fondamentaux	118
4.4.2.1.	Montages source commune	118
4.4.2.2.	Montage à charge répartie	120
4.4.2.3.	Montage drain commun	121
4.4.2.4.	Montage grille commune	122
4.4.2.5.	Montage cascode	124
4.4.2.6.	Amplificateur différentiel	125
4.4.2.7.	Détermination de la valeur des condensateurs	127
4.4.3.	Influence d'une charge active	128

4.4.3.1.	Charges actives	128
4.4.3.2.	Technologie JFET	130
4.4.3.3.	Technologie MOS	131
4.4.3.4.	Influence de la tension substrat source	134
4.4.4.	Association transistors FET-transistors bipolaires	135
4.4.4.1.	Mise en cascade simple	136
4.4.4.2.	Contre-réactions partielles	137
4.4.5.	Contrôle automatique de gain	139
4.4.5.1.	CAG d'un montage source commune	139
4.4.5.2.	CAG d'un montage à amplificateur opérationnel	141
4.4.5.3.	CAG d'un montage émetteur commun	142
4.4.5.4.	CAG d'un montage cascode	142
4.4.6.	Imperfections des amplificateurs continus et basses fréquences .	143
4.4.6.1.	Imperfections statiques	143
4.4.6.2.	Bruit dans les transistors à effet de champ	149
4.4.6.3.	Distorsion dans les montages	151
4.4.6.4.	Phénomène de latch-up dans les JFET « dual »	152
4.4.7.	Exercices	152
4.5.	Amplificateurs vidéofréquences, radiofréquences et hyperfréquences ...	172
4.5.1.	Transistors à effet de champ hautes fréquences	172
4.5.1.1.	Technologies utilisées	172
4.5.1.2.	Paramètres naturels du JFET	172
4.5.1.3.	Paramètres naturels du MESFET	175
4.5.1.4.	Paramètres naturels du MOSFET	175
4.5.1.5.	Schéma équivalent en paramètres y	177
4.5.1.6.	Schéma équivalent en paramètres s	178
4.5.2.	Amplificateurs vidéofréquences	180
4.5.2.1.	Impédance d'entrée d'un JFET	180
4.5.2.2.	Structures de base, pour amplificateurs vidéofréquences	181
4.5.2.3.	Exemples de réalisations	182
4.5.3.	Amplificateurs radiofréquences	185
4.5.3.1.	Structures de base pour amplificateurs radiofréquences	185
4.5.3.2.	Détection, mélange de fréquences et multiplication de fréquences	188
4.5.3.3.	Utilisation des transistors à effet de champ double grille TECDG	189
4.5.4.	Amplificateurs micro-ondes	191
4.5.4.1.	Amplificateur adapté simple	191
4.5.4.2.	Amplificateur à contre-réaction résistive	192
4.5.4.3.	Amplificateur équilibré	193
4.5.4.4.	Amplificateur distribué	193
4.5.5.	Exercices	195

Chapitre 5. Commutation faible et forte puissance	201
5.1. Composants faible puissance en commutation	201
5.1.1. Diodes en commutation	201
5.1.1.1. Diode normale en petits signaux	202
5.1.1.2. Diode normale en grands signaux	203
5.1.1.3. Diminution du temps de stockage dans les diodes	204
5.1.2. Transistors bipolaires en commutation	206
5.1.2.1. Transistors bipolaires en petits signaux	206
5.1.2.2. Transistors bipolaires en grands signaux	208
5.1.2.3. Fonctionnement en sursaturation et surblocage	210
5.1.2.4. Amélioration des temps de commutation du transistor bipolaire	214
5.1.2.4. Puissance dissipée dans un transistor en commutation	216
5.1.3. Transistors à effet de champ en commutation	217
5.1.3.1. Transistor JFET en petits signaux	217
5.1.3.2. Transistor JFET en grands signaux	218
5.1.3.3. Cas des transistors MOSFET	221
5.1.3.4. Exemples de valeurs et amélioration des temps de commutation	223
5.1.4. Composants de l'optoélectronique en commutation	225
5.1.4.1. Émetteurs de lumière	225
5.1.4.2. Récepteurs de lumière	226
5.1.4.3. Optoisolateurs	227
5.2. Applications de la commutation faible puissance	228
5.2.1. Quelques schémas tests	229
5.2.2. Exemples de drivers pour transistors	230
5.2.2.1. Driver à transistors bipolaires	230
5.2.2.2. Drivers à transistors à effet de champ	230
5.2.3. Bascules à transistors	233
5.2.3.1. Bascules bistables	233
5.2.3.2. Bascules monostables	235
5.2.3.3. Bascules astables	238
5.2.3.4. Trigger de Schmitt	240
5.2.4. Exemples d'utilisation des optocoupleurs	242
5.2.4.1. Optocoupleur diode-transistor bipolaire	242
5.2.4.2. Optocoupleur diode-JFET	243
5.3. Les composants de puissance en commutation	244
5.3.1. Composants « linéaires » en commutation	244
5.3.1.1. Diodes	244
5.3.1.2. Transistors bipolaires	245
5.3.1.3. Transistors à effet de champ	248
5.3.2. Composants à avalanche	252
5.3.2.1. Thyristors	252

5.3.2.2.	Triac	258
5.3.2.3.	Optocoupleurs à thyristors et triacs	259
5.4.	Composants à avalanche de faible puissance	260
5.4.1.	Thyristor tétrode	261
5.4.2.	Transistor unijonction	261
5.4.3.	Transistor unijonction programmable	264
5.4.4.	Dipôles actifs à avalanche	265
5.5.	Problèmes thermiques en régime impulsionnel	267
5.5.1.	Problèmes thermiques en général	267
5.5.1.1.	Fatigue thermique des transistors de puissance	267
5.5.2.	Régime impulsionnel	268
5.5.2.1.	Impédance thermique	268
5.5.2.2.	Série d'impulsions	269
5.5.2.3.	Impulsion unique	270
5.5.3.	Boîtiers et radiateurs	271
Chapitre 6. Intégration des fonctions analogiques		279
6.1.	Présentation succincte des circuits intégrés analogiques	279
6.1.1.	Fonctions linéaires classiques	279
6.1.1.1.	Famille des amplificateurs opérationnels	279
6.1.1.2.	Famille des régulateurs	280
6.1.1.3.	Famille des comparateurs de tensions	280
6.1.2.	Commutateurs analogiques	281
6.1.3.	Fonctions spéciales	281
6.2.	Technologie des fonctions linéaires classiques	282
6.2.1.	Technologie bipolaire	282
6.2.1.1.	Composants de base	282
6.2.1.2.	Fonctions de base	287
6.2.2.	Technologie MOS	299
6.2.2.1.	Composants de base	300
6.2.2.2.	Fonctions de base	301
6.2.3.	Technologie BIFET et BIMOS	314
6.2.3.1.	Technologie BIFET	314
6.2.3.2.	Technologie BIMOS	315
6.2.4.	Quelques exemples de fonctions linéaires	315
6.2.4.1.	Comparaison des technologies bipolaires et MOS	315
6.2.4.2.	Amplificateur opérationnel bipolaire 741	316
6.2.4.3.	Amplificateur opérationnel BIFET, LT1055	318
6.2.4.4.	Amplificateur opérationnel CMOS, ICL7611	319
6.3.	Commutateurs analogiques	320
6.3.1.	Généralités	320
6.3.1.1.	Composants utilisés	320
6.3.1.2.	Domaines d'application des commutateurs analogiques	320

6.3.1.3.	Schémas équivalents statiques d'un commutateur à transistors à effet de champ	321
6.3.1.4.	Schémas équivalents dynamiques d'un commutateur à transistor à effet de champ	322
6.3.1.5.	Caractéristiques utilisées	322
6.3.2.	Commutateurs à JFET	325
6.3.2.1.	Principe de la commande	325
6.3.2.2.	Procédés de commande	326
6.3.2.3.	Exemples de circuits intégrés commercialisés	329
6.3.3.	Commutateurs à MOSFET	333
6.3.3.1.	Principe de la commande	334
6.3.3.2.	Exemples réels et procédés de commande	335
6.3.4.	Commutateurs CMOS	337
6.3.4.1.	Principe de la commande	337
6.3.4.2.	Exemples pratiques de commutateurs	339
6.3.5.	Optocommutateurs diode-JFET	345
6.3.6.	Comparaison des commutateurs	346
6.3.7.	Quelques exemples d'application des commutateurs	347
6.3.7.1.	Commutateurs simples	347
6.3.7.2.	Multiplexeurs	348
6.3.8.	Technique et application des capacités commutées	350
6.3.8.1.	Principe	350
6.3.8.2.	Filtres à capacités commutées	351
6.3.8.3.	Alimentations à découpage	355
6.3.8.4.	Autres applications des capacités commutées	356
6.4.	Circuits spéciaux	356
6.4.1.	Convertisseur numérique-analogique	357
6.4.2.	Réseau de diodes	358
6.4.3.	Circuit intégré radiofréquences	359
6.4.4.	Circuits intégrés en arséniure de gallium	360
6.4.5.	Dispositifs à transfert de charge CCD	361
Chapitre 7. Intégration des fonctions logiques (ou numériques)		365
7.1.	Présentation succincte des circuits intégrés numériques	365
7.1.1.	Essai de classifications	365
7.1.1.1.	Classification en fonction du nombre de composants	365
7.1.1.2.	Classification en fonction de la technologie	367
7.1.2.	Caractéristiques statistiques	369
7.1.2.1.	Caractéristiques d'entrée et de sortie	369
7.1.2.2.	Caractéristiques d'alimentation	373
7.1.3.	Caractéristiques dynamiques	374
7.1.3.1.	Temps de réponse	374
7.1.3.2.	Facteur de mérite	375

7.2. Circuits bipolaires saturés	375
7.2.1. Famille TTL	375
7.2.1.1. Principe de l'inverseur TTL standard 7404	376
7.2.1.2. Différents types d'inverseurs TTL	378
7.2.1.3. Autres opérateurs TTL	381
7.2.1.4. Caractéristiques et performances des circuits TTL	385
7.2.2. Famille I ² L	387
7.2.2.1. Principe et caractéristiques de l'I ² L	387
7.2.2.2. Réalisation des fonctions numériques	388
7.3. Circuits bipolaires non saturés	390
7.3.1. Famille TTL Schotky	390
7.3.1.1. Présentation de la technologie TTL Schotky	390
7.3.1.2. Inverseurs TTL Schotky	393
7.3.1.3. Caractéristiques et performances des circuits TTL Schotky	395
7.3.2. Famille ECL	399
7.3.2.1. Présentation de la technologie ECL	399
7.3.2.2. Élément de base de la technologie ECL	399
7.3.2.3. Évolution de l'opérateur $\overline{\text{OU-OU}}$	401
7.3.2.4. Principe de l'assemblage d'opérateurs ECL	404
7.3.2.5. Caractéristiques et performances de la technologie ECL	407
7.4. Circuits MOS	408
7.4.1. Famille NMOS	408
7.4.1.1. Présentation de la technologie NMOS	408
7.4.1.2. Inverseurs NMOS	409
7.4.1.3. Autres opérateurs NMOS	412
7.4.1.4. Caractéristiques et performances de la technologie NMOS	414
7.4.2. Famille CMOS	416
7.4.2.1. Présentation de la technologie CMOS	416
7.4.2.2. Inverseurs CMOS	418
7.4.2.3. Autres opérateurs CMOS	420
7.4.2.4. Caractéristiques et performances de la technologie CMOS	422
7.5. Circuits BICMOS	428
7.5.1. Présentation de la technologie BICMOS	428
7.5.2. Opérateurs BICMOS	429
7.5.3. Caractéristiques de la technologie BICMOS	431
7.6. Circuits GaAs	431
7.6.1. Présentation de la technologie GaAs	431
7.6.2. Opérateurs GaAs	432
7.6.2.1. Opérateurs à FETD	432
7.6.2.2. Opérateurs à FETE	434

7.6.3. Caractéristiques et performances de la technologie GaAs	435
7.7. Circuits d'interface	436
7.7.1. Interfaces TTL vers d'autres technologies	436
7.7.1.1. Interfaces TTL → CMOS	436
7.7.1.2. Interfaces TTL → ECL	438
7.7.2. Interfaces CMOS vers d'autres technologies	439
7.7.2.1. Interfaces CMOS → TTL	439
7.7.2.2. Interface CMOS → ECL	440
7.7.3. Interfaces ECL vers d'autres technologies	440
7.7.3.1. Interfaces ECL → TTL	441
7.7.3.2. Interface ECL → CMOS	441
7.7.3.3. Interface ECL → BICMOS	442
Chapitre 8. Circuits intégrés spécifiques – ASIC	443
8.1. Présentation générale des ASIC	443
8.1.1. Qu'est-ce qu'un ASIC ?	443
8.1.2. Le monde des ASIC	444
8.1.2.1. ASIC programmables sur site	444
8.1.2.2. ASIC programmables chez les « fondeurs »	446
8.1.2.3. Procédure de conception des ASIC	448
8.1.3. Avantages et inconvénients des ASIC	449
8.1.3.1. Avantages	449
8.1.3.2. Inconvénients	449
8.1.4. Quelques chiffres	450
8.2. Technologie des ASIC	452
8.2.1. Rappels concernant les mémoires électriques	452
8.2.1.1. Mémoires mortes ROM	452
8.2.1.2. Mémoires vives RAM	454
8.2.1.3. Mémoires mortes PROM	456
8.2.1.4. Mémoires mortes EPROM	457
8.2.1.5. Mémoires mortes EEPROM	459
8.2.2. ASIC programmables sur site	459
8.2.2.1. PLA ou FPLA	459
8.2.2.2. PLD, EPLD ou EEPLD combinatoires	461
8.2.2.3. PLD, EPLD ou EEPLD séquentiels	462
8.2.2.4. Matrices programmables	463
8.2.2.5. Réseaux prédifusés programmables	467
8.2.3. ASIC programmables chez le « fondeur »	468
8.2.3.1. Réseaux prédifusés	468
8.2.3.2. Réseaux précaractérisés	472
8.2.4. Boîtiers pour ASIC	473
8.3. Exemples d'ASIC	474
8.3.1. Réseau prédifusé numérique	474
8.3.2. Réseau prédifusé analogique	479

8.4. Mini glossaire des ASIC	485
Chapitre 9. Simulation analogique	489
9.1. Modèle SPICE	489
9.1.1. Introduction	489
9.1.2. Diodes	490
9.1.2.1. Désignation en Net List	490
9.1.2.2. Paramètres SPICE	490
9.1.2.3. Exemples de paramètres utilisés en simulation	492
9.1.3. Transistors bipolaires (BJT, NPN et PNP)	492
9.1.3.1. Désignation en Net List	492
9.1.3.2. Paramètres SPICE	492
9.1.3.3. Exemples de paramètres utilisés en simulation	494
9.1.4. Transistors JFET (N et P)	494
9.1.4.1. Désignation en Net List	494
9.1.4.2. Paramètres SPICE	494
9.1.4.3. Exemple de paramètres utilisés en simulation	495
9.1.5. Transistors MOSFET	495
9.1.5.1. Désignation en Net List	495
9.1.5.2. Paramètres SPICE	496
9.1.5.3. Exemples de paramètres utilisés en simulation	497
9.2. Exemples simples de simulation analogique	497
9.2.1. Méthodologie	497
9.2.2. Effet de la température sur une jonction-application à un thermomètre	498
9.2.3. Caractéristiques I_C (V_{CE}) pour un transistor bipolaire <i>NPN</i>	500
9.2.4. Influence de la température sur une polarisation	502
9.2.5. Réponse en fréquence des montages fondamentaux	503
9.2.6. Amplificateur opérationnel en technologie bipolaire	509
9.2.7. Amplificateur opérationnel en technologie CMOS	514
9.2.8. Réponse en fréquence en boucle ouverte d'un amplificateur opérationnel	518
9.2.9. Opérateurs TTL à éléments discrets	519
Bibliographie	525