

前書き i

第 I 部ダイオード 1

1 序章 3

1.1 回路設計法の歴史.	3
1.2 モデルの重要性.	5
1.3 この本の目的.	7
1.3.1 机上計算.	7
1.3.2 シミュレーション.	8
1.3.3 設計仕様書.	9
1.3.4 ブロック分け.	10
1.3.5 BB 作成.	10

2 ダイオードの基礎 13

2.1 基礎方程式.	13
2.1.1 ポアソンの方程式.	14
2.1.2 電流密度方程式.	15
2.1.3 連続の方程式.	16

main : 2005/6/24(12:37)

vi 目次

2.2 PN 接合の解析.	16
2.2.1 空乏層近似 (階段接合)	19
2.2.2 空乏層近似 (傾斜 PN 接合)	21
2.2.3 境界条件.	22
2.2.4 直流動作.	24
2.2.5 交流動作 (低周波の場合)	29
2.2.6 交流動作 (高周波の場合)	31
2.2.7 接合容量.	35
2.3 逆方向動作.	36
2.3.1 飽和電流.	36
2.3.2 なたれ降伏.	37
2.3.3 ツナー降伏.	39

3 ダイオードの等価回路 41

3.1 リンビルの集中モデル.	41
3.2 サーの伝送線路モデル.	44
3.3 ダイオード小信号用等価回路.	45
3.4 ダイオード接続トランジスタの等価回路.	46

4 雑音・温度特性 51

4.1 雑音特性.	51
4.2 温度特性.	52

5 その他の接合 55

5.1 ヘテロ接合ダイオード.	55
5.1.1 ヘテロ接合とホモ接合.	56
5.1.2 Anderson モデル.	57
5.1.3 トンネル・モデル.	60

main : 2005/6/24(12:37)

目次 vii

5.2 ショットキー接合ダイオード.	62
5.2.1 金属・半導体接合.	62
5.2.2 オーミック接合.	65

第 II 部トランジスタ 67

6	トランジスタ開発の歴史	69
6.1	トランジスタ開発の年表	69
6.2	アーリーの等価回路	72
6.3	電荷制御等価回路	73
6.3.1	電荷制御等価回路の導出	74
6.3.2	2集中等価回路	78
6.4	エバース・モル・モデル	80
6.5	ガンメル・プーン・モデル	83
6.6	ハイブリッド π 等価回路	86
7	モデルの分類	89
7.1	EM1モデル	89
7.1.1	Injection version of EM1 model	89
7.1.2	Transport version of EM1 model	90
7.1.3	Ebers-Moll static model	91
7.2	EM2モデル	94
7.2.1	EM2大信号モデル	94
7.2.2	EM2小信号モデル	95
7.3	EM3モデル	98
7.3.1	ベース幅変調効果（アーリー効果）	98
7.3.2	b の電流、電圧変化	98
7.3.3	コレクタ・ベース容量のベース抵抗上の分割	100
main : 2005/6/24(12:37)		
viii 目次		
7.3.4	高電流領域での t_F の上昇	100
7.3.5	パラメータの温度依存性	100
7.4	ガンメル・プーン・モデル	101
7.4.1	ガンメル・プーン・直流モデル式	102
7.4.2	交流モデル	103
7.4.3	雑音モデル	103
7.4.4	ベース抵抗モデル	104
7.4.5	ベース・エミッタ接合容量	107
7.4.6	コレクタ・ベース接合容量	108
7.4.7	コレクタ・サブ間容量	109
8	四端子網 (Z, Y, H, G, S)	111
8.1	四端子網の定義	111
8.2	四端子網の相互関係	113
8.3	四端子網の電源を用いた表現	114
8.4	Sパラメータ	114
8.5	四端子パラメータとの関係	116
9	回路設計への適用	119
9.1	どのようなモデルをどの様に使うか	120
9.1.1	実素子とガンメル・プーン・モデルとの違い	120
9.2	簡略化等価回路	124
9.2.1	簡略化した直流等価回路	124
9.2.2	簡略化した交流等価回路	125
9.2.3	ベース抵抗を吸収する方法	128
9.2.4	飽和領域の表現	129
9.2.5	カットオフ領域の表現	130
9.3	簡略等価回路の応用	130

9.3.1	エミッタ側から見たインピーダンス	131
main : 2005/6/24(12:37)		
目次 ix		
9.3.2	ベース側から見たインピーダンス	133
9.3.3	コレクタ側からみた場合	135
9.4	MOS における簡略化モデル	136
9.4.1	飽和状態におけるモデル	136
9.4.2	カットオフ領域におけるモデル	138
9.5	パルス回路への応用	138
9.5.1	2つの等価回路の説明	139
9.5.2	静特性での方程式	140
9.5.3	過渡応答	142
9.5.4	ターンオフ過程	148
10	雑音と温度特性	151
10.1	雑音	151
10.1.1	ショット・ノイズ	152
10.1.2	熱雑音	152
10.1.3	フリッカー・ノイズ	153
10.1.4	バースト・ノイズ (ポップコーン・ノイズ)	153
10.1.5	アバランシェ・ノイズ	153
10.2	雑音の等価回路	153
10.3	入力換算等価雑音とその性質	155
10.4	トランジスタの入力換算等価雑音の性質	157
10.4.1	接地方式の違い	158
10.4.2	帰還の影響	158
10.5	トランジスタの温度特性	160
10.5.1	S P I C E の温度パラメータ	160
10.5.2	消費電力をパラメータに反映させる方法	162
11	ガンメル・プーン・モデルのパラメータ測定法	163
11.1	S P I C E パラメータ一覧表	163
main : 2005/6/24(12:37)		
x 目次		
11.2	パラメータ測定法	163
11.2.1	DCパラメータの求め方 (1)	164
11.2.2	DCパラメータの求め方 (2)	166
11.2.3	容量パラメータの測定	168
11.2.4	CJE, VJE, MJE, CJC, VJC, MJC, XCJC, TF, CJEM, VJEM の求め方	169
11.2.5	ベース抵抗の求め方	171
11.2.6	エミッタ抵抗の求め方	175
11.2.7	コレクタ抵抗の求め方	177
11.2.8	P T F の求め方	177
11.2.9	Eg の求め方	178
11.3	まとめ	178
12	MEXTRAM モデル	183
12.1	新しく導入された項目	184
12.2	等価回路図	185
12.3	MEXTRAM の定数	190
12.4	電流の記述	191

12.4.1	メイン電流	191
12.4.2	ベース電流	192
12.4.3	弱なだれ電流	193
12.5	抵抗の記述	195
12.5.1	固定抵抗	195
12.5.2	可変ベース抵抗	195
12.5.3	コレクタ抵抗	196
12.6	電荷の記述	200
12.6.1	エミッタ空間電荷	200
12.6.2	コレクタ空間電荷	200
12.6.3	疑似飽和でのコレクタ転送時間	201

main : 2005/6/24(12:37)

目次 xi

12.6.4	外部コレクタ空間電荷 QTEX XQTEX	202
12.6.5	空間電荷 QTS	202
12.6.6	蓄積ベース電荷 QBE、QBC	203
12.6.7	中性エミッタ電荷 QN	203
12.6.8	蓄積エピレイヤー電荷 QEPI	204
12.6.9	外部電荷 QEX	204
12.7	逆電流利得の拡張モデル	205
12.7.1	電流	205
12.7.2	電荷	206
12.7.3	内部ベースの高周波分布効果	206
12.8	雑音モデル	207
12.8.1	熱雑音	207
12.8.2	コレクタ電流ショット雑音	207
12.8.3	順方向ベース電流ショット雑音と $1=f$ 雑音	208
12.8.4	エミッタ・ベース側壁電流ショット雑音と $1=f$ 雑音	208
12.8.5	逆ベース電流ショット雑音と $1=f$ 雑音	208
12.8.6	外部電流ショット雑音と $1=f$ 雑音	208
12.9	温度特性	208
12.9.1	ケルビンへの変換	209
12.9.2	熱電圧	209
12.9.3	抵抗	209
12.9.4	空間容量	209
12.9.5	ベース電荷	210
12.9.6	電流利得	211
12.9.7	電流と電圧	212
12.9.8	転送時間	212
12.9.9	なだれパラメータ	213

13 VBIC 215

main : 2005/6/24(12:37)

xii 目次

13.1	VBIC モデルの概要	215
13.2	モデルの説明	218
13.3	温度特性	225
A	数学公式集 227	
A.1	微分・積分	227
A.2	ベクトル解析	229

A.3	行列式	232
A.4	三角関数	233
A.5	複素関数	234
A.6	双曲線関数	236
A.6.1	実数関数の双曲線関数	236
A.6.2	複素関数の双曲線関数	237
A.7	フーリエ解析	239
A.7.1	フーリエ級数	239
A.7.2	フーリエ積分	239
A.8	ラプラス変換	240
A.9	数学定数	241
B	各種表	243
B.1	信号	243
B.2	物性	244
C	SPICE モデル・パラメータ	245
C.1	ダイオードの SPICE モデル・パラメータ	245
C.2	トランジスタの SPICE モデル・パラメータ	249