

# Indice

Autori e Curatori	XVII
Prefazione	XIX
Ringraziamenti dell'Editore	XXIII
Guida alla lettura	XXV

## Parte I Elettronica dello stato solido e dispositivi

<b>Capitolo 1</b> Introduzione all'elettronica	1
<b>1.1</b> Breve storia dell'elettronica: dai tubi a vuoto ai sistemi a scala di integrazione gigantesca	2
<b>1.2</b> Classificazione dei segnali elettronici	6
1.2.1 Segnali digitali	6
1.2.2 Segnali analogici	7
1.2.3 Conversione D/A e A/D: i ponti fra i domini analogico e digitale	7
<b>1.3</b> Convenzioni sulle notazioni	9
<b>1.4</b> Metodologia per la soluzione dei problemi	10
<b>1.5</b> Richiami di teoria dei circuiti	12
1.5.1 Partitore di tensione e di corrente	12
1.5.2 Rappresentazioni circuitali di Thévenin e Norton	13
<b>1.6</b> Spettro di frequenza dei segnali elettronici	18
<b>1.7</b> Amplificatori	19
1.7.1 L'amplificatore operazionale ideale	20
1.7.2 Risposta in frequenza degli amplificatori	22
<b>1.8</b> Variazione dei valori dei componenti nella progettazione circuitali	23
1.8.1 Il modello matematico delle tolleranze	23
1.8.2 Analisi del caso peggiore	23
1.8.3 Analisi Monte Carlo	25
1.8.4 Coefficienti di temperatura	28
<b>1.9</b> Precisione numerica	30
Riferimenti bibliografici	30
Lecture addizionali	30
<b>Capitolo 2</b> Elettronica dello stato solido	31
<b>2.1</b> Materiali dell'elettronica a stato solido	32
<b>2.2</b> Modello a legame covalente	33
<b>2.3</b> Correnti di deriva e mobilità nei semiconduttori	36
2.3.1 Corrente di deriva	36
2.3.2 Mobilità	36

2.3.3 Saturazione della velocità di deriva	37
<b>2.4</b> Resistività del silicio intrinseco	38
<b>2.5</b> Impurità nei semiconduttori	39
2.5.1 Impurità di tipo donatore per il silicio	39
2.5.2 Impurità di tipo accettore per il silicio	39
<b>2.6</b> Concentrazioni degli elettroni e delle lacune nei semiconduttori estrinseci	40
2.6.1 Semiconduttore di tipo $n$ ( $N_D > N_A$ )	40
2.6.2 Semiconduttore di tipo $p$ ( $N_A > N_D$ )	41
<b>2.7</b> Mobilità e resistività nei semiconduttori estrinseci	42
<b>2.8</b> Corrente di diffusione	46
<b>2.9</b> Corrente totale	47
<b>2.10</b> Modello a bande di energia	47
2.10.1 Generazione di coppie elettrone-lacuna in un semiconduttore intrinseco	48
2.10.2 Modello a bande di energia per un semiconduttore estrinseco	48
2.10.3 Semiconduttori compensati	50
<b>2.11</b> Cenni sulla fabbricazione dei circuiti integrati	50
Lecture addizionali	52
<b>Capitolo 3</b> Diodo a stato solido e circuiti a diodi	53
<b>3.1</b> Il diodo a giunzione $pn$	54
<b>3.2</b> Analisi elettrostatica della giunzione $pn$	54
3.2.1 Correnti nel diodo	57
3.2.2 Caratteristica $i-v$ del diodo	58
<b>3.3</b> L'equazione del diodo: un modello matematico per il diodo	60
<b>3.4</b> Diodo in polarizzazione inversa, nulla e diretta	63
3.4.1 Polarizzazione inversa	63
3.4.2 Polarizzazione nulla	63
3.4.3 Polarizzazione diretta	63
<b>3.5</b> Coefficiente di temperatura del diodo	65
<b>3.6</b> Il diodo in polarizzazione inversa	67
3.6.1 La corrente di saturazione nei diodi reali	68
3.6.2 Rottura della giunzione	68
3.6.3 Modello del diodo in regione di rottura	69
<b>3.7</b> Capacità della giunzione $pn$	70

3.7.1	Polarizzazione inversa	70	<b>4.2</b>	Il modello di trasporto del transistor <i>nnp</i>	111
3.7.2	Polarizzazione diretta	70	4.2.1	Caratteristiche in condizioni di funzionamento diretto	112
<b>3.8</b>	Diodo a barriera Schottky	71	4.2.2	Caratteristiche in condizioni di funzionamento inverso	113
<b>3.9</b>	Modello SPICE e layout del diodo	71	4.2.3	Il modello di trasporto completo in condizioni arbitrarie di polarizzazione	115
<b>3.10</b>	Analisi dei circuiti a diodi	73	<b>4.3</b>	Il transistor <i>pnp</i>	117
3.10.1	Analisi grafica con la retta di carico	74	<b>4.4</b>	Rappresentazioni circuitali del modello di trasporto	118
3.10.2	Analisi con il modello matematico del diodo	75	4.4.1	Un'altra analisi della regione attiva diretta	119
3.10.3	Analisi con il modello del diodo ideale	79	<b>4.5</b>	Il modello di Ebers-Moll (argomento avanzato)	119
3.10.4	Modello a caduta di tensione costante	81	4.5.1	Caratteristiche del transistor <i>nnp</i> in polarizzazione diretta	120
3.10.5	Confronto tra i metodi di analisi	82	4.5.2	Caratteristiche del transistor in polarizzazione inversa	120
<b>3.11</b>	Circuiti a più diodi	82	4.5.3	Il modello di Ebers-Moll del transistor <i>nnp</i>	120
3.11.1	Un circuito a 3 diodi	82	4.5.4	Il modello di Ebers-Moll del transistor <i>pnp</i>	121
<b>3.12</b>	Analisi di diodi polarizzati nella regione di rottura	85	4.5.5	Rappresentazioni circuitali equivalenti per il modello di Ebers-Moll	121
3.12.1	Analisi grafica con la retta di carico	85	<b>4.6</b>	Caratteristiche <i>i-v</i> del transistor bipolare	121
3.12.2	Analisi con il modello lineare a tratti	85	4.6.1	Caratteristiche di uscita	122
3.12.3	Regolatori di tensione	86	4.6.2	Caratteristiche di trasferimento	123
3.12.4	Analisi in cui si tiene conto della resistenza di Zener	87	<b>4.7</b>	Regioni di funzionamento del transistor bipolare	124
3.12.5	Regolazione di linea e di carico	88	<b>4.8</b>	Forme semplificate del modello di trasporto	125
<b>3.13</b>	Raddrizzatore a semionda	88	4.8.1	Modello semplificato per la regione di interdizione	125
3.13.1	Raddrizzatori a semionda con carico resistivo	89	4.8.2	Modello semplificato per la regione attiva diretta	127
3.13.2	Raddrizzatore con filtro capacitivo	90	4.8.3	I diodi nei circuiti integrati bipolari	132
3.13.3	Raddrizzatore a semionda con carico <i>RC</i>	91	4.8.4	Modello semplificato per la regione attiva inversa	133
3.13.4	Intervallo di conduzione e ondulatione della tensione	92	4.8.5	Modello semplificato per la regione di saturazione	135
3.13.5	Corrente del diodo	94	<b>4.9</b>	Effetti non ideali nel transistor bipolare	138
3.13.6	Corrente di spunto	95	4.9.1	Tensioni di rottura delle giunzioni	138
3.13.7	Specifica relativa alla tensione inversa di picco	95	4.9.2	Trasporto dei portatori minoritari nella regione di base	138
3.13.8	Dissipazione di potenza del diodo	96	4.9.3	Tempo di transito in base	140
3.13.9	Raddrizzatore a semionda con tensione di uscita negativa	97	4.9.4	Capacità di diffusione	141
<b>3.14</b>	Raddrizzatore a doppia semionda	98	4.9.5	Dipendenza del guadagno di corrente a emettitore comune dalla frequenza	142
3.14.1	Raddrizzatore a doppia semionda con tensione di uscita negativa	100	4.9.6	Effetto Early	143
<b>3.15</b>	Raddrizzatore a ponte a doppia semionda	100	4.9.7	Modelli per l'effetto Early	143
<b>3.16</b>	Confronto tra i raddrizzatori e criteri di progetto	101	4.9.8	Origine dell'effetto Early	144
<b>3.17</b>	Il diodo in commutazione	104	<b>4.10</b>	Transconduttanza	144
<b>3.18</b>	Fotodiodi, celle solari e diodi emettitori di luce	106	<b>4.11</b>	Tecnologia bipolare e modello SPICE del BJT	145
3.18.1	Fotodiodi e fotorivelatori	106	4.11.1	Descrizione qualitativa	145
3.18.2	Generazione di potenza elettrica con celle solari	107	4.11.2	Equazioni del modello SPICE	146
3.18.3	Diodi emettitori di luce	108	4.11.3	Transistori bipolari avanzati	147
Riferimenti bibliografici		108	<b>4.12</b>	Polarizzazione del BJT	148
Lecture addizionali		108			
<b>Capitolo 4</b>	Il transistor bipolare a giunzione	109			
<b>4.1</b>	Struttura del transistor bipolare a giunzione	110			

## VI Indice

4.12.1	Rete di polarizzazione a quattro resistori	149
4.12.2	Obiettivi di progetto relativi alla rete di polarizzazione a quattro resistori	152
4.12.3	Analisi iterativa della rete di polarizzazione a 4 resistori	156
<b>4.13</b>	Tolleranze nei circuiti di polarizzazione	157
4.13.1	Analisi del caso peggiore	157
4.13.2	Analisi Monte Carlo	159
	Riferimenti bibliografici	162
	Lecture addizionali	162
<b>Capitolo 5</b>	<b>Transistori a effetto di campo</b>	<b>163</b>
<b>5.1</b>	Il condensatore MOS	164
5.1.1	Regione di accumulazione	165
5.1.2	Regione di svuotamento	165
5.1.3	Regione di inversione	165
<b>5.2</b>	MOSFET a canale $n$ (NMOS)	166
5.2.1	Analisi qualitativa del comportamento $i-v$ del transistor NMOS	167
5.2.2	Regione di triodo del transistor NMOS	168
5.2.3	Resistenza di conduzione	171
5.2.4	Transconduttanza	172
5.2.5	Regione di saturazione del transistor NMOS	173
5.2.6	Modello matematico della regione di saturazione	174
5.2.7	Transconduttanza in saturazione	175
5.2.8	Efficienza di transconduttanza in saturazione	176
5.2.9	Modulazione della lunghezza di canale	176
5.2.10	Caratteristiche di trasferimento e transistori a svuotamento	177
5.2.11	Effetto body	178
<b>5.3</b>	MOSFET a canale $p$ (PMOS)	180
<b>5.4</b>	Simboli circuitali del MOSFET	182
<b>5.5</b>	Simmetria dei transistori MOS	183
<b>5.6</b>	Capacità del MOSFET	184
5.6.1	Capacità del transistor NMOS nella regione di triodo	184
5.6.2	Capacità nella regione di saturazione	185
5.6.3	Capacità nella regione di interdizione	185
<b>5.7</b>	Modello SPICE del MOSFET	186
<b>5.8</b>	Riduzione delle dimensioni del transistor MOS	188
5.8.1	Corrente di drain	188
5.8.2	Capacità di gate	188
5.8.3	Densità di integrazione e di potenza	188
5.8.4	Il prodotto ritardo-potenza	189
5.8.5	Frequenza di transizione	189
5.8.6	Limitazioni del funzionamento a campi elevati	190
5.8.7	Modello Unificato del MOSFET	191
5.8.8	Corrente di sottosoglia	192

<b>5.9</b>	Un unico modello per tutte le regioni	193
5.9.1	Il modello interpolante	193
5.9.2	Il modello interpolante in regione di saturazione	193
5.9.3	Efficienza di transconduttanza	193
<b>5.10</b>	Fabbricazione del transistor MOS e regole di progetto	195
5.10.1	Dimensione minima e tolleranza di allineamento	196
5.10.2	Layout del transistor MOS	196
<b>5.11</b>	Polarizzazione del MOSFET	199
5.11.1	Caratteristiche della polarizzazione	199
5.11.2	Polarizzazione con rete a quattro resistori	201
5.11.3	Polarizzazione con tensione gate-source costante	204
5.11.4	Analisi basata sul metodo della retta di carico	204
5.11.5	Analisi con effetto body	205
5.11.6	Analisi con il Modello Unificato	207
5.11.7	Confronto dei risultati	208
5.11.8	Polarizzazione con rete a due resistori	209
<b>5.12</b>	Polarizzazione dei transistori PMOS	209
<b>5.13</b>	Polarizzazione dell'invertitore CMOS usato come amplificatore	212
	Riferimenti bibliografici	213
	Lecture addizionali	213

## Parte II Elettronica digitale

<b>Capitolo 6</b>	<b>Introduzione all'elettronica digitale</b>	<b>215</b>
<b>6.1</b>	Porte logiche ideali	216
<b>6.2</b>	Definizione dei livelli logici e dei margini di rumore	217
6.2.1	Livelli logici	218
6.2.2	Margini di rumore	219
6.2.3	Criteri di progetto per una porta logica	220
<b>6.3</b>	Risposta dinamica di una porta logica	220
6.3.1	Tempi di salita e di discesa	220
6.3.2	Ritardo di propagazione	221
6.3.3	Prodotto ritardo-potenza	222
<b>6.4</b>	Richiami di algebra booleana	223
<b>6.5</b>	Progetto di circuiti logici NMOS	224
6.5.1	Invertitore NMOS con carico resistivo	225
6.5.2	Progetto del rapporto $W/L$ di $M_S$	226
6.5.3	Progetto del resistore di carico	227
6.5.4	Rappresentazione con retta di carico	227
6.5.5	La resistenza on del MOSFET	228
6.5.6	Analisi dei margini di rumore	230
6.5.7	Calcolo di $V_{IL}$ e di $V_{OH}$	230
6.5.8	Calcolo di $V_{IH}$ e di $V_{OL}$	230
6.5.9	Margini di rumore per l'invertitore con carico resistivo	231

6.5.10	Il problema del resistore di carico	232	<b>7.2</b>	Caratteristiche statiche dell'invertitore CMOS	282
<b>6.6</b>	Utilizzo di dispositivi attivi in alternativa al resistore di carico	233	7.2.1	Caratteristica di trasferimento dell'invertitore CMOS	283
6.6.1	Invertitore NMOS con dispositivo di carico in saturazione	234	7.2.2	Margini di rumore per l'invertitore CMOS	285
6.6.2	Invertitore NMOS con dispositivo di carico in regione lineare	243	<b>7.3</b>	Comportamento dinamico dell'invertitore CMOS	287
6.6.3	Invertitore NMOS con dispositivo di carico a svuotamento	244	7.3.1	Stima del ritardo di propagazione	287
<b>6.7</b>	Confronto fra gli invertitori NMOS	246	7.3.2	Tempi di salita e discesa	289
<b>6.8</b>	Effetto della saturazione della velocità sul progetto statico dell'invertitore	247	7.3.3	Riscaldamento delle prestazioni	289
6.8.1	Progetto del transistoro di commutazione	248	7.3.4	Effetto della saturazione della velocità sui ritardi dell'invertitore CMOS	291
6.8.2	Progetto del transistoro di carico	248	7.3.5	Ritardo di una cascata di invertitori	292
6.8.3	Riassunto degli effetti della saturazione della velocità	249	<b>7.4</b>	Dissipazione di potenza e prodotto ritardo-potenza nelle logiche CMOS	293
<b>6.9</b>	Porte logiche NMOS elementari	249	7.4.1	Dissipazione di potenza statica	293
6.9.1	Porte NOR	250	7.4.2	Dissipazione di potenza dinamica	294
6.9.2	Porte NAND	251	7.4.3	Prodotto ritardo-potenza	295
6.9.3	Layout delle porte NOR e NAND in tecnologia NMOS con carico a svuotamento	252	<b>7.5</b>	Porte NOR e NAND CMOS	296
<b>6.10</b>	Porte logiche NMOS complesse	253	7.5.1	Porte logiche NOR CMOS	297
<b>6.11</b>	Dissipazione di potenza	257	<b>7.6</b>	Porte logiche CMOS complesse	301
6.11.1	Dissipazione di potenza statica	257	<b>7.7</b>	Progetto e prestazioni di porte logiche ad area minima	305
6.11.2	Dissipazione di potenza dinamica	257	<b>7.8</b>	Circuiti di buffer	308
6.11.3	Dimensionamento delle porte logiche NMOS rispetto alla potenza dissipata	259	7.8.1	Ritardo di un circuito disaccoppiatore (buffer)	308
<b>6.12</b>	Comportamento dinamico delle porte NMOS	260	7.8.2	Numero ottimo di stadi	309
6.12.1	Capacità nei circuiti logici MOS	260	<b>7.9</b>	La porta di trasmissione CMOS	311
6.12.2	Risposta dinamica dell'invertitore NMOS con carico resistivo	261	<b>7.10</b>	Circuito bistabile	312
6.12.3	Risposta dinamica dell'invertitore NMOS con carico a svuotamento	268	7.10.1	Latch bistabile	312
6.12.4	Invertitore NMOS con carico in saturazione	270	7.10.2	Flip-flop RS	314
6.12.5	Confronto delle risposte dinamiche degli invertitori NMOS	270	7.10.3	Il latch di tipo D a porte di trasmissione	315
6.12.6	Effetto della saturazione della velocità sui ritardi di propagazione dell'invertitore	272	7.10.4	Flip-flop D master-slave	316
6.12.7	Dimensionamento basato su simulazioni di un circuito di riferimento	272	<b>7.11</b>	Il problema del latchup	317
6.12.8	Misura del ritardo intrinseco tramite oscillatore ad anello	273		Riferimenti bibliografici	320
6.12.9	Invertitore in assenza di carico	274	<b>Capitolo 8</b>	Memorie MOS e circuiti sequenziali	323
<b>6.13</b>	Porte logiche PMOS	276	<b>8.1</b>	Memorie ad accesso casuale	324
6.13.1	Invertitore PMOS	276	8.1.1	Architettura delle RAM	324
6.13.2	Porte logiche NOR e NAND	276	8.1.2	Un chip di memoria da 256 Mb	325
Riferimenti bibliografici		277	<b>8.2</b>	Celle di memoria statiche	327
Letture aggiuntive		277	8.2.1	La cella di memoria a sei transistori (6-T)	327
<b>Capitolo 7</b>	Progetto di circuiti logici MOS complementari (CMOS)	279	8.2.2	Lettura di un dato nella cella 6-T	328
<b>7.1</b>	Tecnologia dell'invertitore CMOS	280	8.2.3	Scrittura di un dato nella cella 6-T	331
7.1.1	Layout dell'invertitore CMOS	281	<b>8.3</b>	Celle di memoria dinamiche	333
			8.3.1	La cella di memoria a un transistoro	334
			8.3.2	Scrittura di un dato nella cella 1-T	335
			8.3.3	Lettura di un dato nella cella 1-T	337
			8.3.4	La cella di memoria a quattro transistori (4-T)	338
			<b>8.4</b>	Amplificatori di lettura	339
			8.4.1	Amplificatore di lettura per la cella 6-T	339

## VIII Indice

8.4.2	Amplificatore di lettura per la cella 1-T	341	10.2	Condensatori di accoppiamento e di bypass	393
8.4.3	Circuiti con tensione più elevata sulla wordline	343	10.3	Utilizzo dei circuiti equivalenti DC e AC	395
8.4.4	Amplificatori di lettura con segnale di clock	343	10.3.1	Regole per le analisi in DC e in AC	395
8.5	Decodificatori di indirizzo	345	10.4	Introduzione ai modelli per piccoli segnali del diodo	399
8.5.1	Decodificatori NOR	345	10.4.1	Interpretazione grafica del comportamento per piccoli segnali del diodo	399
8.5.2	Decodificatori NAND	346	10.4.2	Modello per piccoli segnali del diodo	400
8.5.3	Decodificatori di colonna a pass-transistor	347	10.5	Modelli per piccoli segnali per i transistori bipolari a giunzione	402
8.6	Memorie a sola lettura (ROM)	349	10.5.1	Il modello ibrido a $\pi$	403
8.7	Memorie flash	352	10.5.2	Interpretazione grafica della transconduttanza	404
8.7.1	La tecnologia a gate isolato	352	10.5.3	Guadagno di corrente per piccoli segnali	405
8.7.2	Realizzazione con porte NOR	353	10.5.4	Il guadagno di tensione intrinseco del BJT	405
8.7.3	Realizzazione con porte NAND	354	10.5.5	Forme equivalenti del modello per piccoli segnali	406
	Riferimenti bibliografici	355	10.5.6	Modello ibrido a $\pi$ semplificato	407
			10.5.7	Definizione di piccolo segnale per un transistoro bipolare	407
			10.5.8	Modello per piccoli segnali per il transistoro <i>pnp</i>	409
			10.5.9	Confronto fra analisi AC e analisi in transitorio in SPICE	410

## Parte III Elettronica analogica

<b>Capitolo 9</b>	Introduzione agli amplificatori	357	10.6	L'amplificatore a emettitore comune (C-E)	410
9.1	Un esempio di sistema elettronico analogico	358	10.6.1	Guadagno di tensione dell'amplificatore a emettitore comune	411
9.2	Amplificazione	359	10.6.2	Resistenza di ingresso	412
9.2.1	Guadagno di tensione	360	10.6.3	Guadagno di tensione complessivo	412
9.2.2	Guadagno di corrente	360	10.7	Limiti importanti e semplificazioni dei modelli	412
9.2.3	Guadagno di potenza	361	10.7.1	Guida per il progetto dell'amplificatore a emettitore comune con carico resistivo	413
9.2.4	Posizione dell'amplificatore	361	10.7.2	Limite superiore del guadagno dell'emettitore comune	414
9.2.5	Rappresentazione del guadagno in decibel	362	10.7.3	Limiti per la condizione di piccolo segnale nell'amplificatore a emettitore comune	414
9.3	Modelli a doppio bipolo	364	10.8	Modello per piccoli segnali per i transistori a effetto di campo	416
9.3.1	I parametri <i>g</i>	364	10.8.1	Modello per piccoli segnali del MOSFET	417
9.4	Disadattamento delle impedenze del generatore e di carico	368	10.8.2	Guadagno di tensione intrinseco del MOSFET	418
9.5	L'amplificatore differenziale	370	10.8.3	Definizione di piccolo segnale per un MOSFET	419
9.5.1	Caratteristica di trasferimento di tensione dell'amplificatore differenziale	371	10.8.4	L'effetto body nel modello per piccoli segnali del MOSFET	420
9.5.2	Guadagno di tensione	371	10.8.5	Modello per piccoli segnali per il transistoro PMOS	421
9.6	Distorsione negli amplificatori	373	10.8.6	Modello per piccoli segnali per il transistoro MOS in debole inversione	422
9.7	Modello dell'amplificatore differenziale	374	10.9	Confronto fra i modelli per piccoli segnali del BJT e del MOS	422
9.8	Risposta in frequenza degli amplificatori	376			
9.8.1	Diagrammi di Bode	376			
9.8.2	Amplificatori passa-basso	377			
9.8.3	Amplificatori passa-alto	381			
9.8.4	Amplificatori passa-banda	383			
9.8.5	Calcoli sui diagrammi di Bode	386			
	Riferimenti bibliografici	388			
	Lecture addizionali	388			
<b>Capitolo 10</b>	Il transistoro come amplificatore e amplificazione lineare	389			
10.1	Il transistoro come amplificatore	390			
10.1.1	L'amplificatore a BJT	390			
10.1.2	L'amplificatore a MOSFET	392			

<b>10.10</b>	L'amplificatore a source comune (C-S)	425	11.3.3	Guadagno di tensione complessivo	470
10.10.1	Guadagno di tensione ai terminali per l'amplificatore a source comune	425	11.3.4	Dinamica del segnale di ingresso dell'inseguitore	470
10.10.2	Guadagno di tensione complessivo per l'amplificatore a source comune	426	11.3.5	Resistenza al terminale di emettitore	471
10.10.3	Guida per il progetto di amplificatori a source comune	426	11.3.6	Guadagno di corrente	472
10.10.4	Limiti per la condizione di piccolo segnale nell'amplificatore a source comune	427	11.3.7	Riepilogo delle caratteristiche degli amplificatori C-C e C-D	472
10.10.5	Resistenze di ingresso degli amplificatori a emettitore comune e a source comune	429	<b>11.4</b>	Amplificatori non invertenti – Circuiti a base comune e a gate comune	476
10.10.6	Resistenza di uscita del collettore comune e dell'emettitore comune	431	11.4.1	Guadagno di tensione ai terminali e resistenza di ingresso	476
10.10.7	Confronto degli amplificatori	433	11.4.2	Guadagno di tensione complessivo	477
<b>10.11</b>	Riepilogo degli amplificatori a emettitore comune e a sorgente comune	433	11.4.3	Dinamica del segnale di ingresso	478
10.11.1	Condizioni in cui è possibile trascurare la resistenza di uscita del transistor	433	11.4.4	Resistenza ai terminali di collettore e drain	479
<b>10.12</b>	Dissipazione di potenza ed escursione del segnale	434	11.4.5	Guadagno di corrente	480
10.12.1	Dissipazione di potenza	434	11.4.6	Resistenze di ingresso e di uscita complessive per gli amplificatori non invertenti	480
10.12.2	Escursione massima del segnale di uscita	435	11.4.7	Riepilogo delle caratteristiche degli amplificatori C-B e C-G	483
<b>Capitolo 11</b>	Amplificatori a singolo transistor e multistadio	439	<b>11.5</b>	Rassegna e confronto degli amplificatori elementari	485
<b>11.1</b>	Classificazione degli amplificatori	440	11.5.1	Gli amplificatori a BJT	485
11.1.1	Applicazione e prelievo del segnale – Il BJT	441	11.5.2	Gli amplificatori a MOSFET	486
11.1.2	Applicazione e prelievo del segnale – Il MOSFET	441	<b>11.6</b>	Amplificatori a source comune basati su invertitori a MOS	488
11.1.3	Amplificatori a emettitore comune (C-E) e a source comune (C-S)	442	11.6.1	Stima del guadagno di tensione	489
11.1.4	Amplificatori a collettore comune (C-C) e a drain comune (C-D)	443	11.6.2	Analisi dettagliata	489
11.1.5	Amplificatori a base comune (C-B) e a gate comune (C-G)	444	11.6.3	Soluzioni alternative per il carico	490
11.1.6	Modello di piccolo segnale	445	11.6.4	Resistenze di ingresso e uscita	491
<b>11.2</b>	Amplificatori invertenti – Circuiti a emettitore comune e a source comune	446	<b>11.7</b>	Progetto dei condensatori di accoppiamento e di bypass	494
11.2.1	L'amplificatore a emettitore comune (C-E)	446	11.7.1	Amplificatori a emettitore comune e a source comune	494
11.2.2	Confronto tra gli esempi a emettitore comune	458	11.7.2	Amplificatori a collettore comune e a drain comune	497
11.2.3	L'amplificatore a source comune	459	11.7.3	Amplificatori a base comune e a gate comune	500
11.2.4	Limite di piccolo segnale dell'amplificatore a source comune	461	11.7.4	Fissare la frequenza di taglio inferiore	502
11.2.5	Caratteristiche degli amplificatori a emettitore e source comuni	464	<b>11.8</b>	Esempi di progetto di amplificatori	503
11.2.6	Riepilogo delle caratteristiche degli amplificatori C-E e C-S	465	11.8.1	Verifica del progetto dell'amplificatore a base comune con il metodo Monte Carlo	511
11.2.7	Rappresentazione mediante transistori equivalenti	466	<b>11.9</b>	Amplificatori multistadio accoppiati in AC	516
<b>11.3</b>	Circuiti inseguitori – Amplificatori a collettore comune e a drain comune	466	11.9.1	Amplificatore a tre stadi accoppiato in AC	516
11.3.1	Guadagno di tensione ai terminali	468	11.9.2	Guadagno di tensione	518
11.3.2	Resistenza di ingresso	469	11.9.3	Resistenza di ingresso	519
			11.9.4	Guadagno di tensione complessivo	519
			11.9.5	Resistenza di uscita	520
			11.9.6	Guadagno di corrente e di potenza	521
			11.9.7	Dinamica del segnale di ingresso	521
			11.9.8	Stima della frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore multistadio	525
			<b>11.10</b>	Introduzione agli amplificatori accoppiati in continua	526

11.10.1	Un amplificatore a tre stadi accoppiati in DC	526	12.6.5	Polo dominante dell'amplificatore a source comune	568
11.10.2	Amplificatori a due transistori accoppiati in DC	528	12.6.6	Stima di $\omega_H$ con il metodo delle costanti di tempo a circuito aperto	568
Lecture	addizionali	530	12.6.7	Amplificatore a source comune con resistenza di source	571
<b>Capitolo 12</b>	<b>Risposta in frequenza</b>	<b>531</b>	12.6.8	Poli dell'emettitore comune con resistenza sull'emettitore	572
<b>12.1</b>	Risposta in frequenza degli amplificatori	532	<b>12.7</b>	Risposta in alta frequenza degli amplificatori a base comune e a gate comune	575
12.1.1	Risposta alle basse frequenze	533	<b>12.8</b>	Risposta in alta frequenza degli amplificatori a collettore comune e a drain comune	577
12.1.2	Stima di $\omega_L$ in assenza di polo dominante	533	<b>12.9</b>	Riepilogo della risposta in alta frequenza degli amplificatori a singolo stadio	579
12.1.3	Risposta alle alte frequenze	536	12.9.1	Limitazioni guadagno-banda degli amplificatori	580
12.1.4	Stima di $\omega_H$ in assenza di polo dominante	536	<b>12.10</b>	Risposta in frequenza degli amplificatori multistadio	580
<b>12.2</b>	Determinazione diretta di poli e zeri in bassa frequenza – L'amplificatore a source comune	537	12.10.1	Amplificatore differenziale	581
<b>12.3</b>	Stima di $\omega_L$ con il metodo delle costanti di tempo in cortocircuito	542	12.10.2	La connessione in cascata collettore-comune/base-comune	582
12.3.1	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a emettitore comune	543	12.10.3	Risposta in alta frequenza dell'amplificatore cascode	583
12.3.2	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a source comune	546	12.10.4	Frequenza di taglio dello specchio di corrente	584
12.3.3	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a base comune	547	12.10.5	Esempio di amplificatore a tre stadi	585
12.3.4	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a gate comune	548	<b>12.11</b>	Introduzione ai circuiti a radiofrequenza	592
12.3.5	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a collettore comune	549	12.11.1	Amplificatori a radiofrequenza	593
12.3.6	Stima di $\omega_L$ per l'amplificatore a drain comune	549	12.11.2	L'amplificatore <i>shunt-peaked</i>	593
<b>12.4</b>	Modelli del transistor alle alte frequenze	550	12.11.3	Amplificatore accordato a singolo stadio	595
12.4.1	Modello ibrido a $\pi$ dipendente dalla frequenza per il transistor bipolare	550	12.11.4	Utilizzo dell'induttore a presa intermedia – L'autotrasformatore	598
12.4.2	Modello SPICE per $C_\pi$ e $C_\mu$	551	12.11.5	Circuiti accordati multipli – Sintonizzazione sincrona e scalata	599
12.4.3	Frequenza di transizione $f_T$	551	12.11.6	L'amplificatore a source comune a degenerazione induttiva	601
12.4.4	Modello in alta frequenza per il MOSFET	554	<b>12.12</b>	Mixer e modulatori bilanciati	602
12.4.5	Modello SPICE per $C_{GS}$ e $C_{GD}$	555	12.12.1	Principi di funzionamento del mixer	603
12.4.6	Dipendenza di $f_T$ dalla lunghezza di canale	555	12.12.2	Mixer bilanciato (balanced)	605
12.4.7	Limitazioni dei modelli ad alta frequenza	557	12.12.3	La coppia differenziale come mixer bilanciato	606
<b>12.5</b>	Resistenza di base e di gate nel modello ibrido a $\pi$	557	12.12.4	Mixer doppiamente bilanciato (double-balanced)	606
12.5.1	Effetto della resistenza di base e di gate sull'amplificazione di centro banda	558	12.12.5	Il mixer di Jones – Un modulatore/mixer doppiamente bilanciato	610
<b>12.6</b>	Analisi ad alta frequenza degli amplificatori a emettitore comune e a source comune	559	Riferimenti bibliografici		612
12.6.1	L'effetto Miller	560	<b>Capitolo 13</b>	<b>Amplificatori operazionali ideali</b>	<b>613</b>
12.6.2	Risposta in alta frequenza degli amplificatori a emettitore comune e a source comune	562	<b>13.1</b>	L'amplificatore differenziale e l'amplificatore operazionale ideali	614
12.6.3	Analisi diretta della caratteristica di trasferimento dell'emettitore comune	564	13.1.1	I ipotesi per l'analisi con operazionali ideali	614
12.6.4	Poli dell'amplificatore C-E	564	<b>13.2</b>	Circuiti con amplificatori operazionali ideali	615
			13.2.1	L'amplificatore invertente	616
			13.2.2	L'amplificatore di transresistenza – Un convertitore corrente-tensione	620

13.2.3	L'amplificatore non invertente	621	14.6.3	Calcolo della resistenza di uscita	664
13.2.4	Buffer a guadagno unitario o inseguitore di tensione	623	14.6.4	Riepilogo dell'amplificatore con retroazione parallelo-parallelo	664
13.2.5	L'amplificatore sommatore	625	<b>14.7</b>	Retroazione serie-serie – Amplificatore di transconduttanza	667
13.2.6	L'amplificatore sottrattore	626	14.7.1	Calcolo del guadagno ad anello chiuso	667
<b>13.3</b>	Funzione di trasferimento e risposta in frequenza	629	14.7.2	Calcolo della resistenza di ingresso	668
13.3.1	Filtro attivo passa-basso	629	14.7.3	Calcolo della resistenza di uscita	668
13.3.2	Filtro attivo passa-alto	632	14.7.4	Riepilogo dell'amplificatore con retroazione serie-serie	669
13.3.3	Integratore	633	<b>14.8</b>	Retroazione parallelo-serie – Amplificatore di corrente	671
13.3.4	Derivatore	636	14.8.1	Calcolo del guadagno ad anello chiuso	671
Riferimenti bibliografici		637	14.8.2	Calcolo della resistenza di ingresso	672
Letture aggiuntive		637	14.8.3	Calcolo della resistenza di uscita	672
<b>Capitolo 14</b>	Operazionali non ideali e stabilità della retroazione degli amplificatori operazionali	<b>639</b>	14.8.4	Riepilogo dell'amplificatore con retroazione parallelo-serie	673
<b>14.1</b>	Sistemi con retroazione	640	<b>14.9</b>	Calcolo del guadagno di anello con iniezioni successive di tensione e corrente	675
14.1.1	Analisi del guadagno ad anello chiuso	640	14.9.1	Semplificazioni	678
14.1.2	Errore di guadagno	641	<b>14.10</b>	Riduzione della distorsione per mezzo della retroazione	678
<b>14.2</b>	Analisi di circuiti con amplificatori operazionali non ideali	642	<b>14.11</b>	Cause di errore in continua e limitazioni dell'escursione in uscita	680
14.2.1	Guadagno finito ad anello aperto	642	14.11.1	Tensione di offset all'ingresso	680
14.2.2	Resistenza di uscita diversa da zero	645	14.11.2	Bilanciamento della tensione di offset	682
14.2.3	Resistenza di ingresso di valore finito	649	14.11.3	Correnti di polarizzazione e di offset all'ingresso	682
14.2.4	Riepilogo delle caratteristiche delle configurazioni non ideali invertente e non invertente	652	14.11.4	Limiti della tensione e della corrente di uscita	684
<b>14.3</b>	Circuiti con retroazione serie e parallelo	653	<b>14.12</b>	Reiezione di modo comune e resistenza di ingresso	686
14.3.1	Categorie di amplificatori con retroazione	653	14.12.1	Valore finito per il rapporto di reiezione del modo comune	686
14.3.2	Amplificatore di tensione, retroazione serie-parallelo	653	14.12.2	Perché è importante il CMRR?	688
14.3.3	Amplificatore di transimpedenza, retroazione parallelo-parallelo	654	14.12.3	Errore nel guadagno dell'inseguitore di tensione dovuto al CMRR	691
14.3.4	Amplificatore di corrente, retroazione parallelo-serie	654	14.12.4	Resistenza di ingresso di modo comune	693
14.3.5	Amplificatore di transconduttanza, retroazione serie-serie	655	14.12.5	Interpretazione alternativa della reiezione di modo comune	693
<b>14.4</b>	Metodo generale per il calcolo del guadagno di amplificatori retroazionati	655	14.12.6	Rapporto di reiezione della tensione di alimentazione	694
14.4.1	Analisi del guadagno ad anello chiuso	655	<b>14.13</b>	Risposta in frequenza e larghezza di banda degli amplificatori operazionali	696
14.4.2	Calcolo della resistenza con il teorema di Blackman	655	14.13.1	Risposta in frequenza dell'amplificatore non invertente	698
<b>14.5</b>	Retroazione serie-parallelo – Amplificatore di tensione	656	14.13.2	Risposta in frequenza dell'amplificatore invertente	700
14.5.1	Calcolo del guadagno ad anello chiuso	656	14.13.3	Controllo della risposta in frequenza mediante la retroazione	703
14.5.2	Calcolo della resistenza di ingresso	657	14.13.4	Funzionamento ad ampi segnali: slew rate e larghezza di banda a piena potenza	704
14.5.3	Calcolo della resistenza di uscita	658	14.13.5	Macromodello per la risposta in frequenza dell'amplificatore operazionale	705
14.5.4	Riepilogo dell'amplificatore con retroazione serie-parallelo	659			
<b>14.6</b>	Retroazione parallelo-parallelo – Amplificatore di transresistenza	662			
14.6.1	Calcolo del guadagno ad anello chiuso	663			
14.6.2	Calcolo della resistenza di ingresso	663			



## XII Indice

14.13.6	Macromodelli completi di amplificatori operazionali in SPICE	706	15.8.1	Un raddrizzatore di precisione a semionda	782
14.13.7	Esempi di amplificatori operazionali commerciali per applicazioni generali	706	15.8.2	Circuito raddrizzatore di precisione senza saturazione	782
<b>14.14</b>	Stabilità degli amplificatori retroazionati	707	<b>15.9</b>	Circuiti a retroazione positiva	784
14.14.1	Il diagramma di Nyquist	707	15.9.1	Il comparatore e il trigger di Schmitt	784
14.14.2	Sistemi del primo ordine	708	15.9.2	Il multivibratore astabile	786
14.14.3	Sistemi del secondo ordine e margine di fase	709	15.9.3	Il multivibratore monostabile (one shot)	789
14.14.4	Risposta al gradino e margine di fase	710		Lecture addizionali	791
14.14.5	Sistemi del terzo ordine e margine di guadagno	713	<b>Capitolo 16</b>	Amplificatori differenziali e operazionali	793
14.14.6	Analisi della stabilità mediante i diagrammi di Bode	714	<b>16.1</b>	Amplificatori differenziali	794
	Riferimenti bibliografici	719	16.1.1	Amplificatori differenziali a transistori bipolari e a MOS	794
<b>Capitolo 15</b>	Applicazioni degli amplificatori operazionali	721	16.1.2	Analisi in DC dell'amplificatore differenziale a transistori bipolari	795
<b>15.1</b>	Connessione in cascata di amplificatori	722	16.1.3	Caratteristica di trasferimento di piccolo segnale dell'amplificatore differenziale a transistori bipolari	797
15.1.1	Rappresentazione a doppio bipolo	722	16.1.4	Analisi in AC dell'amplificatore differenziale a transistori bipolari	798
15.1.2	Osservazioni sulla terminologia relativa agli amplificatori	724	16.1.5	Guadagno e resistenza di ingresso di modo differenziale	799
15.1.3	Risposta in frequenza di amplificatori a più stadi	726	16.1.6	Guadagno e resistenza di ingresso di modo comune	801
<b>15.2</b>	Amplificatore per strumentazione	734	16.1.7	Rapporto di reiezione di modo comune	802
<b>15.3</b>	Filtri attivi	736	16.1.8	Analisi del modo differenziale e del modo comune utilizzando metà circuito	804
15.3.1	Filtro passa-basso	736	16.1.9	Polarizzazione con generatori di corrente elettronici	806
15.3.2	Filtro passa-alto con guadagno maggiore di 1	740	16.1.10	Modello SPICE del generatore elettronico di corrente	807
15.3.3	Filtro passa-banda	742	16.1.11	Analisi in DC dell'amplificatore differenziale a MOSFET	808
15.3.4	Filtro biquadratico Tow-Thomas	743	16.1.12	Segnali di ingresso di modo differenziale	810
15.3.5	Sensibilità	747	16.1.13	Caratteristica di trasferimento di piccolo segnale per l'amplificatore differenziale a MOS	810
15.3.6	Variazione delle impedenze e della frequenza secondo un fattore di scala	747	16.1.14	Segnali di ingresso di modo comune	811
<b>15.4</b>	Circuiti a capacità commutate	749	16.1.15	Modello a doppio bipolo per la coppia differenziale	812
15.4.1	Integratore a capacità commutate	749	<b>16.2</b>	Gli amplificatori operazionali	816
15.4.2	Integratore non invertente	751	16.2.1	Amplificatore operazionale elementare a due stadi	816
15.4.3	Filtri a capacità commutate	753	16.2.2	Evoluzione dell'amplificatore operazionale elementare	821
<b>15.5</b>	Conversione digitale-analogica	755	16.2.3	Coppia Darlington	823
15.5.1	Aspetti fondamentali dei convertitori D/A	755	16.2.4	Riduzione della resistenza di uscita	823
15.5.2	Errori nei convertitori D/A	756	16.2.5	Amplificatore operazionale elementare CMOS	827
<b>15.6</b>	Conversione analogico-digitale	762	16.2.6	Amplificatori BiCMOS	829
15.6.1	Aspetti fondamentali dei convertitori A/D	762	16.2.7	Implementazione di amplificatori operazionali a soli transistori	829
15.6.2	Errori nei convertitori analogico-digitali	763	<b>16.3</b>	Stadi di uscita	831
15.6.3	Tecniche di base per la conversione analogico-digitale	765	16.3.1	Stadio di uscita in classe A: l'inseguitore di source	831
<b>15.7</b>	Oscillatori	775			
15.7.1	Criteri di Barkhausen per le oscillazioni	775			
15.7.2	Oscillatori con reti RC selettive in frequenza	777			
<b>15.8</b>	Applicazioni non lineari	781			

16.3.2	Rendimento degli amplificatori in classe A	832	17.5.1	Generatore di riferimento basato sulla $V_{BE}$	876
16.3.3	Stadio di uscita in classe B o push-pull	833	17.5.2	Il generatore di Widlar	877
16.3.4	Amplificatori in classe AB	834	17.5.3	Polarizzazione indipendente dalla tensione di alimentazione	877
16.3.5	Stadi di uscita in classe AB per amplificatori operazionali	836	17.5.4	Polarizzazione indipendente dalla tensione di alimentazione in tecnologia MOS	878
16.3.6	Protezione dal cortocircuito	836	<b>17.6</b>	Riferimento di tensione a bandgap	880
16.3.7	Accoppiamento con trasformatore	837	<b>17.7</b>	Lo specchio di corrente come carico attivo	884
<b>16.4</b>	Generatori elettronici di corrente	841	17.7.1	Amplificatore differenziale CMOS con carico attivo	884
16.4.1	Generatori di corrente a singolo transistoro	841	17.7.2	Amplificatore differenziale bipolare con carico attivo	890
16.4.2	Cifra di merito per i generatori di corrente	841	<b>17.8</b>	I carichi attivi negli amplificatori operazionali	894
16.4.3	Generatori con elevata resistenza di uscita	842	17.8.1	Guadagno di tensione dell'amplificatore operazionale CMOS	894
16.4.4	Esempi di progetto di generatori di corrente	843	17.8.2	Considerazioni sul punto di lavoro	895
Riferimenti bibliografici		850	17.8.3	Amplificatore operazionale bipolare	897
Lecture addizionali		850	17.8.4	Rottura dello stadio di ingresso	898
<b>Capitolo 17</b>	Tecniche di progetto di circuiti analogici integrati	<b>851</b>	<b>17.9</b>	L'amplificatore operazionale $\mu A741$	899
<b>17.1</b>	Dispositivi equivalenti	852	17.9.1	Funzionamento generale del circuito	899
<b>17.2</b>	Specchi di corrente	853	17.9.2	Circuito di polarizzazione	900
17.2.1	Analisi DC dello specchio di corrente MOS	853	17.9.3	Analisi statica dello stadio di ingresso del $\mu A741$	901
17.2.2	Modifica del rapporto di riflessione per lo specchio di corrente MOS	855	17.9.4	Analisi in AC dello stadio di ingresso del $\mu A741$	904
17.2.3	Analisi DC dello specchio di corrente BJT	856	17.9.5	Guadagno di tensione dell'amplificatore completo	906
17.2.4	Modifica del rapporto di riflessione per lo specchio di corrente BJT	857	17.9.6	Stadio di uscita del $\mu A741$	909
17.2.5	Generatori di corrente multipli	859	17.9.7	Resistenza di uscita	910
17.2.6	Specchio di corrente con buffer	860	17.9.8	Protezione dal cortocircuito	911
17.2.7	Resistenza di uscita dello specchio di corrente	860	17.9.9	Riepilogo delle caratteristiche dell'amplificatore operazionale $\mu A741$	911
17.2.8	Modello a doppio bipolo dello specchio di corrente	861	<b>17.10</b>	Il moltiplicatore analogico di Gilbert	911
17.2.9	Il generatore di corrente di Widlar	863	Riferimenti bibliografici		914
17.2.10	Il generatore di corrente di Widlar MOS	865	Lecture addizionali		914
17.2.11	Il generatore di corrente di Widlar MOS in debole inversione	866	<b>Capitolo 18</b>	Amplificatori a transistori retroazionati e oscillatori	<b>915</b>
<b>17.3</b>	Specchi di corrente a elevata resistenza di uscita	867	<b>18.1</b>	Sistema retroazionato classico	916
17.3.1	Il generatore di corrente di Wilson	867	18.1.1	Guadagno ad anello chiuso	916
17.3.2	Resistenza di uscita del generatore di corrente di Wilson	869	18.1.2	Impedenze ad anello chiuso	917
17.3.3	Il generatore di corrente cascode	870	18.1.3	Effetti della retroazione	917
17.3.4	Resistenza di uscita del generatore di corrente cascode	871	<b>18.2</b>	Analisi in banda passante di amplificatori retroazionati	919
17.3.5	Il generatore di corrente cascode regolato	872	18.2.1	Guadagno ad anello chiuso	919
17.3.6	Riepilogo delle caratteristiche dei generatori di corrente	872	18.2.2	Resistenza di ingresso	920
<b>17.4</b>	Generatore di corrente di riferimento	875	18.2.3	Resistenza di uscita	920
<b>17.5</b>	Generatori di riferimento indipendenti dalla tensione di alimentazione	876	18.2.4	Calcolo della tensione di offset	921
			<b>18.3</b>	Esempi di circuiti amplificatori con retroazione	922
			18.3.1	Retroazione serie-parallelo – Amplificatore di tensione	922
			18.3.2	Amplificatore differenziale di tensione serie-parallelo	927

## XIV Indice

18.3.3	Retroazione parallelo-parallelo – Amplificatore di transresistenza	929	18.6.2	Zeri negli amplificatori operazionali a MOS	963
18.3.4	Retroazione serie-serie – Amplificatore di transconduttanza	934	18.6.3	Compensazione degli amplificatori bipolari	964
18.3.5	Retroazione parallelo-serie – Amplificatore di corrente	937	18.6.4	Slew rate dell'amplificatore operazionale	965
<b>18.4</b>	Metodi esatti per l'analisi di circuiti retroazionati	941	18.6.5	Relazione tra slew rate e prodotto guadagno-larghezza di banda	966
18.4.1	Metodo del guadagno asintotico	942	<b>18.7</b>	Oscillatori ad alta frequenza	974
18.4.2	General feedback theorem	947	18.7.1	L'oscillatore Colpitts	974
18.4.3	Teorema dell'elemento aggiunto	949	18.7.2	L'oscillatore Hartley	976
<b>18.5</b>	Richiami sulla stabilità dell'amplificatore retroazionato	952	18.7.3	Stabilizzazione dell'ampiezza negli oscillatori $LC$	977
18.5.1	Risposta ad anello chiuso dell'amplificatore non compensato	952	18.7.4	Resistenza negativa negli oscillatori	977
18.5.2	Margine di fase	953	18.7.5	Oscillatore a $G_m$ negativo	978
18.5.3	Effetti di secondo ordine	957	18.7.6	Oscillatori a cristallo	980
18.5.4	Risposta dell'amplificatore compensato	959	18.7.7	Oscillatori ad anello	982
18.5.5	Limiti di piccolo segnale	960	18.7.8	Retroazione positiva e latchup	984
<b>18.6</b>	Compensazione a singolo polo dell'amplificatore operazionale	961	Riferimenti bibliografici		985
18.6.1	Analisi dell'amplificatore operazionale a tre stadi	961	Lecture aggiuntive		985
			<b>Appendici</b>		987
			<b>Indice analitico</b>		1001
			<b>Eserciziario</b>		E1