

Inhaltsverzeichnis

	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Konstanten	i
1	Einleitung.....	1
2	InAlAs/InGaAs/InP-Heterostruktur-Feldeffekttransistoren	6
2.1	Aufbau und Funktionsweise.....	6
2.1.1	InAlAs/InGaAs-Heteroübergang.....	7
2.1.2	Schichtaufbau	8
2.1.3	Transporteigenschaften des InGaAs-Kanalmaterials.....	9
2.1.4	Kurzkanaleffekte.....	11
2.2	Stoßionisation.....	14
2.2.1	Beitrag der Stoßionisation zum Leckstromverhalten.....	14
2.3	Gleichspannungsverhalten.....	17
2.3.1	Einfluß der Gate-Länge.....	17
2.3.1.1	Maßnahmen zur Reduktion von Kurzkanaleffekten	19
2.3.2	Einfluß der Stoßionisation.....	20
2.4	Hochfrequenzverhalten	24
2.4.1	Kleinsignalersatzschaltbild von HFET	24
2.4.1.1	Intrinsische Standard-Elemente für den Kleinsignalbetrieb	25
2.4.1.2	Stoßionsionsrelevante Kleinsignal-Elemente	25
2.4.2	Verstärkungen von HFET.....	26
2.4.2.1	Kurzschluß-Stromverstärkung h_{21} und Transitfrequenz f_T	27
2.4.2.2	Maximale unilaterale Verstärkung GU und Grenzfrequenz $f_{\max,GU}$	29
2.4.2.3	Maximale verfügbare Verstärkung MAG und Grenzfrequenz $f_{\max,MAG}$	29
2.4.2.4	Maximale stabile Verstärkung MSG	30
2.4.3	Rauschverhalten.....	30
2.4.4	Einfluß der Stoßionisation auf das Kleinsignalverhalten	31
2.4.5	Einfluß der Stoßionisation auf das Rauschverhalten	33
2.5	InAlAs/InGaAs/InP Dual-Gate-HFET: Transistor mit zwei Steuerelektroden.....	34
2.5.1	Prinzip des DGHFET.....	34
2.5.2	Anwendungen von DGHFET	36
2.5.3	Klassische Vorteile der DGHFET-Kaskode.....	37
2.5.4	Gleichspannungsverhalten von DGHFET	38

2.5.4.1	Nomogramm	38
2.5.5	Hochfrequenzverhalten von DGHFET.....	40
2.5.5.1	Vollständiges Kleinsignalersatzschaltbild der DGHFET-Kaskode.	41
2.5.5.2	Vereinfachtes Kleinsignalersatzschaltbild der DGHFET-Kaskode.	42
2.5.5.3	Transitfrequenz der DGHFET-Kaskode.....	45
2.5.5.3.1	Einfluß der inneren HFET	47
2.5.5.4	Unilaterale Schwingfrequenz der DGHFET-Kaskode	49
2.5.6	Neue Aspekte bei der DGHFET-Kaskode	50
2.5.6.1	Stoßionisation: Großsignalverhalten.....	50
2.5.6.2	Stoßionisation: Kleinsignalverhalten	53
3	Grundlagen der Elektronenstrahlolithographie.....	56
3.1	Stand der Lithographie in der Strukturierungstechnik	56
3.1.1	Direkte Strukturierungstechnik.....	56
3.1.2	Indirekte Strukturierungstechnik.....	57
3.2	Lithographiesystem.....	59
3.2.1.	Elektronenkanone.....	59
3.2.2	Elektronenoptisches System.....	61
3.2.3	Detektor- und Bildverarbeitungssystem.....	63
3.2.4	Steuerung der Ablenkspulen	64
3.2.5	Ausblendeinrichtung für den Elektronenstrahl.....	64
3.2.6	Rechnergestütztes CAD-System.....	66
3.2.7	Steuerung des Probenstisches	67
3.3	Bestimmung der Auflösung des REM.....	68
4	Elektronenstrahlempfindliche Resiste.....	71
4.1	Fotochemische Wechselwirkungsprozesse.....	71
4.1.1	Positiv- und Negativ-Resiste.....	72
4.1.2	Streumechanismen von Elektronen	73
4.1.2.1	Proximity-Funktion	74
4.1.2.2	Intra-Proximity- und Inter-Proximity-Effekte	76
4.1.3	Fotosensitivität	78
4.1.3.1	Strahlungstechnische Fotosensitivität	78
4.1.3.2	Effektive Fotosensitivität	79
4.2	Verwendete Resiste	80
4.2.1	Polymethylmethacrylate.....	81
4.2.2	Polymethylmethacrylatmethacrylsäuren.....	82
4.2.2.1	Chemisch verstärkte Resiste	84
4.2.3	Polyimide	85
4.2.4	Kontrastkurven	86
4.2.4.1	Experimentelle Bestimmung der effektiven Fotosensitivität	87
4.2.4.2	Experimentelle Bestimmung des Kontrastes.....	88
4.2.4.3	Einfluß verschiedener Entwicklerzusammensetzungen.....	90

4.3	Einstellung der Belichtungsparameter	92
4.3.1	Einfluß der Beschleunigungsspannung	92
4.3.2	Einfluß des Schreibstromes	95
4.3.3	Einfluß des Punktbelichtungsabstands	99
4.3.4	Einfluß des Arbeitsabstands	102
5	Ergebnisse und Diskussion zur Technologie der Elektronenstrahl lithographie.....	105
5.1	Belichtungstechniken	105
5.1.1	Vollständige Direktschreiblithographie	105
5.1.2	Kombinationslithographie.....	107
5.2	Anwendung der vollständigen Direktschreiblithographie.....	108
5.2.1	Herstellung der Transistor-Mesa-Struktur	109
5.2.1.1	Titan-Maskierung	110
5.2.2.2	Gold-Maskierung.....	110
5.2.2	Ohm-Kontakte.....	111
5.2.3	Dielektrika	113
5.2.3.1	Leiterbahnkreuzungen.....	114
5.2.3.2	MIM-Kondensatoren.....	116
5.3	Elektronenstrahlithographie der Gate-Kontakte	121
5.3.1	Geometrie des idealen Gate-Kontakts	121
5.3.2	Lithographieprozeß für trapezförmige Gate-Kontakte.....	122
5.3.2.1	Einlagen-Resist-Prozeß	124
5.3.2.2	Zweilagigen-Resist-Prozeß	128
5.3.3	Herstellung von Gate-Kontakten mit T-förmigem Querschnitt ...	132
5.3.3.1	Konventionelle Technik	133
5.3.3.2	Γ -förmiger Kontaktquerschnitt als Spezialfall.....	136
5.3.3.3	Resistsystem für trockenchemische Ätzprozesse	139
5.3.3.4	Neue Strategien.....	140
5.3.3.4.1	Neue Aspekte bei der Mehrfachbelichtung.....	140
5.3.3.4.2	Neue Aspekte bei der Mehrfachentwicklung.....	144
5.3.3.4.3	Belichtung bei niedrigen Beschleunigungsspannungen.....	147
5.4	Vollständiger Gate-Prozeß	156
5.4.1	Probenpräparation.....	156
5.4.1.1	Einfluß von Residuen auf das Bauelementverhalten	157
5.4.1.2	Methoden der Residuenentfernung.....	159
5.4.2	Naßchemischer Gate-Recess-Prozeß.....	161
5.4.2.1	Haftung von PMMA	162
5.4.2.2	Verwendung von Copolymeren.....	163
5.4.2.3	Gate-Recess-für Mushroom-Gate-Kontakte	164
5.4.2.3.1	Auf Bernsteinsäure basierende Ätzlösung	165
5.4.2.3.2	Auf Zitronensäure basierende Ätzlösung.....	167
5.4.3	Trockenchemischer Gate-Recess	170
5.4.3.1	Parameter für das Halbleiterätzen mittels RIE.....	171

5.4.3.2	Optimiertes Resistsystem für den RIE-Gate-Prozeß.....	172
5.4.4	Hybrid-Ätzprozeß zur Vermeidung von Gate-Leckströmen	173
6	Meßergebnisse und Charakterisierung von Single-Gate HFET	177
6.1	Längswiderstand von Gate-Kontakten	177
6.2	Untersuchte Transistorschichten.....	179
6.3	Gleichspannungscharakterisierung der hergestellten SGHFET	181
6.3.1	Extrinsische Steilheit	181
6.3.2	Abschnürverhalten.....	183
6.4	Hochfrequenz-Charakterisierung der hergestellten SGHFET	185
6.4.1	Ergebnisse des konventionellen T-Gate-Prozesses.....	185
6.4.2	Ergebnisse des Doppelbelichtungsprozesses	189
6.4.2.1	Standard-EBL-HFET.....	189
6.4.2.2	Bestdaten.....	191
6.4.3	Ergebnisse bei Anwendung des Resisttyps ZEP-520	194
6.4.3.1	Ergebnisse zum Doppelbelichtungs- und -entwicklungsprozeß ..	195
6.4.3.2	Ergebnisse zum Hybrid-Gate-Recess-Prozeß.....	196
6.4.4	Ergebnisse und Diskussion zu neuen Lithographie-Techniken....	198
6.4.5	Ergebnisse der Rauschmessungen	201
7	Meßergebnisse und Charakterisierung von Dual-Gate HFET... 202	
7.1	Gleichspannungscharakterisierung von DGHFET.....	202
7.1.1	Extrinsische Kennlinienfelder von DGHFET	202
7.1.2	Ausgangskennlinienfeld und Spannungsverstärkung	204
7.1.3	Leckstromverhalten und Stoßionisation	206
7.2	Hochfrequenzcharakterisierung von DGHFET-Kaskoden	210
7.2.1	Ergebnisse zur Reduktion des Ersatzschaltbildes	211
7.2.1.1	Rückwirkung und Verstärkung der DGHFET-Kaskode	213
7.2.1.2	Bestdaten.....	216
7.2.2	Ergebnisse bezüglich Stoßionisation.....	217
7.2.2.1	S-Parameter-Analyse.....	218
7.2.3.2	Arbeitspunktabhängigkeit der Ersatzschaltbildelemente mit Stoßionisationsrelevanz	219
7.2.3	Ergebnisse der Rauschmessungen	222
8	Zusammenfassung.....	225
8.1	Bauelementfertigung mit Hilfe der Elektronenstrahlbelichtung...	225
8.2	Single-Gate Heterostruktur-Feldeffekttransistoren.....	227
8.1	Dual-Gate Heterostruktur-Feldeffekttransistoren	227

Anhang	230
A Schichtdicken der verwendeten Resiste	230
B Resistsysteme.....	234
C Halbleiterfertigungsprozesse	240
Literaturverzeichnis	243
Eigene Veröffentlichungen und Vorträge	256
Danksagung	258
Lebenslauf	260