

Gerhard Franz

# Niederdruckplasmen und Mikrostrukturtechnik

Dritte Auflage

Mit 300 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung . . . . .	1
2	Das Plasma . . . . .	5
2.1	Gleichstrom-Glimmladung . . . . .	5
2.2	Temperaturverteilung im Plasma . . . . .	8
2.3	Ladungsneutralisation im ungestörten Plasma . . . . .	10
2.4	Potentialvariation im Plasma . . . . .	13
2.5	Temperatur und Dichte der Elektronen . . . . .	17
2.5.1	Elektronentemperatur . . . . .	18
2.5.2	Elektronendichte . . . . .	20
2.6	Plasmaschwingungen . . . . .	21
2.7	Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	23
3	Ladungsträger . . . . .	27
3.1	Streutheorie . . . . .	27
3.1.1	Der Stoßquerschnitt der elastischen Streuung . . . . .	27
3.1.2	Streuquerschnitte und Mittlere Freie Weglänge . . . . .	29
3.1.3	Der Stoßquerschnitt der unelastischen Streuung . . . . .	32
3.2	Elastische Stöße . . . . .	33
3.2.1	Elastische Stöße von Elektronen mit Atomen . . . . .	33
3.2.2	Elastische Stöße zwischen schweren Partikeln . . . . .	35
3.3	Unelastische Stöße . . . . .	37
3.3.1	Elektronenstöße . . . . .	37
3.3.2	Stöße von Ionen und Photonen . . . . .	41
3.3.2.1	Stöße von Ionen mit Molekülen . . . . .	41
3.3.2.2	Resonanter Charge-Transfer . . . . .	43
3.3.2.3	Penning-Ionisierung . . . . .	46
3.3.2.4	Stöße von Photonen mit Molekülen . . . . .	46
3.4	Sekundärelektronen-Erzeugung an Oberflächen . . . . .	47
3.5	Verlustmechanismen . . . . .	52

4	DC-Entladungen . . . . .	55
4.1	Ionisierung in der Kathodenzone. . . . .	55
4.1.1	Normale Entladungen. . . . .	55
4.1.1.1	Townsendische Gleichung. . . . .	55
4.1.1.2	Der primäre Ionisierungskoeffizient. . . . .	57
4.1.1.3	Dicke der Randschicht und sekundärer Ionisierungskoeffizient. . . . .	59
4.1.1.4	Die Größen des normalen Kathodenfalls. . . . .	60
4.1.2	Anomale Entladungen. . . . .	64
4.1.3	Kritik an der Townsendschen Näherung. . . . .	67
4.2	Negative Glühzone und Positive Säule. . . . .	69
4.2.1	Ionisierung in der Negativen Glühzone. . . . .	71
4.3	Anodenzone. . . . .	73
4.4	Hohlkathodenentladungen. . . . .	74
5	HF-Entladungen I . . . . .	77
5.1	Beschreibung der Ladungsträgererzeugung . . . . .	77
5.1.1	Einfluß von Druck und Feldfrequenz. . . . .	77
5.1.2	Modifizierung der Diffusion. . . . .	84
5.1.3	Modell für den Durchbruch. . . . .	89
5.2	HF-Kopplung: Qualitative Beschreibung. . . . .	93
5.3	HF-Kopplung: Quantitative Beschreibung . . . . .	95
5.3.1	Reihenresonanzkreis. . . . .	95
5.3.2	Parallelresonanzkreis. . . . .	96
5.3.3	Gekoppelte Parallelschwingkreise. . . . .	97
5.3.3.1	Trafokopplung. . . . .	98
5.3.4	Kapazitive und induktive Kopplung. . . . .	101
5.3.5	Duale Schaltung des kapazitiv gekoppelten Plasmas . . . . .	102
5.3.5.1	1. Näherung (symmetrische Entladung). . . . .	102
5.3.5.2	2. Näherung (asymmetrische Entladung). . . . .	103
5.4	Abgleichsnetzwerke. . . . .	103
5.4.1	Komplexe Plasmainpedanz. . . . .	103
5.4.2	Übertragungslinie. . . . .	105
5.4.3	Abschirmung. . . . .	109
6	HF-Entladungen II . . . . .	113
6.1	Elektrodenvorgänge in kapazitiv gekoppelten Plasmen. . . . .	113
6.2	Feldstärken in der Randschicht bei steigender Anregungsfrequenz . . . . .	118
6.3	Symmetrisches System. . . . .	122
6.3.1	Potentiale der Randschichten. . . . .	122
6.3.2	Leistungsaufnahme bei kapazitiver Kopplung. . . . .	123
6.3.2.1	Ohmsche Aufheizung der Randschicht. . . . .	124
6.3.2.2	Stochastische Aufheizung an der Randschicht. . . . .	124
6.3.3	Strom-Spannungscharakteristik. . . . .	125

6.4	Asymmetrisches System . . . . .	.127
6.5	Self-Bias der RF-Elektroden . . . . .	.128
6.5.1	Randschichtpotential für kapazitive Kopplung . . . . .	.128
6.5.2	Räumliche Verteilung der Ladungsträger . . . . .	.135
6.6	Streumechanismen . . . . .	.136
6.6.1	Experimente . . . . .	.139
6.6.2	Computersimulationen . . . . .	.144
6.6.3	Hybrides Randschichtmodell . . . . .	.148
6.6.3.1	Ionen . . . . .	.149
6.6.4	Messungen und Modellierungen . . . . .	.150
6.6.4.1	IEDF in der Randschicht . . . . .	.150
6.6.4.2	IEDF in der Randschicht der Anregungselektrode . . . . .	.151
6.7	Vergleich zwischen DC- und CCP-RF-Entladungen . . . . .	.152
7	HF-Entladungen III . . . . .	.157
7.1	Hoch-Dichte-Plasmen . . . . .	.157
7.2	Induktiv gekoppelte Plasmen . . . . .	.160
7.2.1	Leistungseinspeisung bei induktiver Kopplung . . . . .	.162
7.3	Magnetfeld-unterstützte Anregung von Plasmen . . . . .	.167
7.3.1	Resümee der Eigenschaften von HF-Entladungen . . . . .	.167
7.4	Whistlerwellen und Systeme mit gekoppelter Resonanz . . . . .	.170
7.5	ECR-Quellen . . . . .	.178
7.5.1	Das elektrische Feld und die Diffusionslänge . . . . .	.178
7.5.2	Einkoppeln von Mikrowellen . . . . .	.183
7.5.3	Leistungseinspeisung in das ECR-Plasma . . . . .	.184
7.5.4	ECR-Reaktoren . . . . .	.187
7.6	Vergleich der Hochdichteplasma-Entladungen . . . . .	.192
8	Ionenstrahlssysteme . . . . .	.195
8.1	Plasmaquellen . . . . .	.196
8.1.1	Kaufman-Quelle . . . . .	.196
8.1.2	RF-Quellen . . . . .	.197
8.2	Gitteroptik . . . . .	.197
8.2.1	Anordnung und Potentialeinstellung . . . . .	.197
8.2.2	Design einer Gitteroptik mit RF-Quelle . . . . .	.198
8.3	Qualitative Betrachtung der Ionenextraktion . . . . .	.201
8.4	Quantitative Betrachtungen zum Ionenstrom . . . . .	.202
8.4.1	Zweigitter-Quelle . . . . .	.204
8.4.2	Dreigitter-Quelle . . . . .	.206
8.5	Neutralisierung . . . . .	.206
8.6	Prozeßoptimierung . . . . .	.208
8.7	Uniformität . . . . .	.210

9	Plasma-Diagnostik	213
9.1	Langmuir-Sonde	213
9.1.1	Einführung	213
9.1.2	Bedingungen für den Betrieb	214
9.1.3	Kennlinie der Langmuir-Sonde	216
9.1.4	Sondenradius	218
9.1.5	Dünne Randschicht: Raumladungsbegrenzter Strom	219
9.1.5.1	Positive Ionen	219
9.1.5.2	Elektronen	220
9.1.6	Endliche Elektronentemperatur	221
9.1.6.1	Sehr dünne Randschicht	221
9.1.7	Dicke Randschicht: Orbital Motion Theorie (OML-Theorie)	222
9.1.7.1	Dicke Randschicht: $\lambda_D \rightarrow 0$	226
9.1.7.2	Dünne Randschicht: $r_s \ll 1$	227
9.1.8	Analyse des Elektronenstroms: Elektronenanlaufzone	228
9.1.9	Plasmapotential	228
9.1.10	Inhärente Eigenschaften	229
9.1.10.1	Sondenstrom	229
9.1.10.2	Räumliche Abhängigkeit	229
9.1.10.3	Plasmapotential	229
9.1.11	Messungen	230
9.1.11.1	Bestimmung der Kennlinie	230
9.1.11.2	Elektronendichte	230
9.1.11.3	Elektronentemperatur und Plasmapotential	230
9.2	Messung von Potentialen in HF-Entladungen	233
9.2.1	Prinzip der Doppelsonde	233
9.3	Self-Excited Electron Resonance Spectroscopy (SEERS)	236
9.3.1	Technische Umsetzung	240
9.3.2	Inhärente Eigenschaften	240
9.3.2.1	Bestimmung der elektronischen Plasmadichte	240
9.3.2.2	Bestimmung der Frequenz des elastischen Stoßes von Elektronen	242
9.4	Impedanzanalyse	244
9.5	Optische Emissions-Spektroskopie (OES)	246
9.5.1	Temperatur der schweren Partikeln	247
9.5.2	Elektronentemperatur mit OES	249
9.5.2.1	Korona-Modell und seine Gültigkeit	249
9.5.2.2	Bestimmung der direkten elektronischen Anregung	251
9.5.2.3	Parametrisierung des Streuquerschnitts	252
9.5.2.4	Details zur Auswertung	252
9.5.2.5	Fehler bei der Anpassung von $a$	254
9.5.2.6	Welche <i>ESVT</i> ist richtig? MB, D oder etwas Numerisches?	255

9.5.2.7	Abhängigkeit von der RF-Leistung . . . . .	255
9.5.3	Grenzen der Anwendbarkeit des Korona-Modells. . . . .	256
9.6	Zusammenfassung. . . . .	258
10	Sputtern. . . . .	261
10.1	Kinetik. . . . .	265
10.1.1	Energieverteilung der abgestäubten Atome. . . . .	270
10.1.2	Filmbildung. . . . .	272
10.2	Sputterbedingungen. . . . .	274
10.2.1	Elektrische Größen. . . . .	275
10.2.2	Temperaturkontrolle des Substrates. . . . .	276
10.3	Probleme der Kontamination. . . . .	278
10.3.1	Kontamination durch Argon. . . . . *	278
10.3.2	Kontamination durch Fremdgase. . . . .	278
10.3.3	Reaktives Sputtern. . . . .	279
10.3.4	Beschuß mit weiteren Partikeln. . . . .	280
10.4	Bias-Techniken. . . . .	281
10.4.1	Einfluß auf Abscheiderate und Filmzusammensetzung . . . . .	281
10.4.2	Beeinflussung weiterer Filmeigenschaften. . . . .	281
10.4.3	Mechanismen des Bias-Sputterns. . . . .	282
10.4.4	Gleichmäßigkeit der Kantenbedeckung an Stufen. . . . .	284
10.4.5	Mechanische Spannung und Substrat-Bias. . . . .	284
10.5	Deposition von Mehrkomponenten-Filmen. . . . .	285
10.6	Probleme der Kohäsion. . . . .	289
10.7	Sputtersysteme mit erhöhter Plasmadichte. . . . .	290
10.7.1	Magnetisch verbesserte Sputtersysteme. . . . .	290
10.7.2	Triodensysteme. . . . .	296
10.7.3	Ionenplattiersysteme. . . . .	296
10.8	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) . . . . .	298
10.8.1	Instantane Massenspektrometrie. . . . .	300
10.8.2	Diamantartige Schichten. . . . .	300
10.9	Ionenstrahlbeschichtung. . . . .	304
11	Trockenätzverfahren. . . . .	307
11.1	Sputterätzen. . . . .	308
11.2	Reaktive Ätzverfahren. . . . .	309
11.3	Abhängigkeit von einzelnen Parametern. . . . .	312
11.3.1	Substrattemperatur. . . . .	313
11.3.2	Gaszusammensetzung. . . . .	314
11.3.3	Gasdruck und RF-Leistung. . . . .	314
11.3.4	Elektrodengeometrie. . . . .	316
11.3.5	Gasflußeffekte und der Loading-Effekt. . . . .	317
11.3.6	Transporteffekte und Reaktordesign. . . . .	321
11.4	Charakteristika des Trockenätzens. . . . .	328

11.4.1	Maskenerosion	329
11.4.2	Facettierung	329
11.4.3	Metallmasken und Trilevel-Photoresist	331
11.4.4	Redeposition und Seitenwandpassivierung	332
11.4.5	Selektivität	334
11.4.6	Trenching	335
11.4.7	Shadowing	337
11.4.8	Micro-Loading (ML)	338
11.4.9	Aspect-Ratio Dependent Etching (ARDE)	339
11.4.10	Aufladungseffekte	342
11.4.11	Spezielle Hochdichteplasma-Anwendungen	344
11.5	Spezielle Charakteristika des Ionenstrahlätzens	348
11.5.1	Anwendungen	349
11.5.2	Ionenstrahlunterstütztes Ätzen: IBAE oder CAIBE	351
11.6	Damage	353
11.7	Ätztopographie	357
11.7.1	Historischer Rückblick	359
11.7.2	Gegenüberstellung der Ätztopographie-Mechanismen	362
11.8	Prozeßkontrolle	364
11.8.1	Änderung der Impedanz einer Entladung	366
11.8.2	Ellipsometrie	366
11.8.3	Optische Emissionsspektroskopie (OES)	368
11.8.4	Interferometrische Verfahren: Laser-Reflektometrie oder - Interferometrie (LI)	371
11.8.4.1	Metalle und Dielektrika	372
11.8.4.2	Halbleiter	374
11.8.5	CCD-kontrollierte Laserinterferometrie	374
11.8.6	Massenspektrometrie (MS)	376
11.8.7	Probleme des in-situ-Monitoring	378
11.8.8	Bewertung der Verfahren	379
12	Ätzmechanismen	381
12.1	Rückblick	381
12.2	Quantitative Berechnung mit der Langmuir-Theorie	383
12.3	...und beim Ionenätzen?	386
12.4	Simulation von Trockenätzungen	389
12.5	Ätzverhalten von Si und seinen Verbindungen	394
12.5.1	Experimentelle Beobachtungen	394
12.5.2	Modell	395
12.5.3	Der sogenannte Bosch-Prozeß	398
12.5.4	Ätzung von Si mit chlorhaltigen Gasen	398
12.6	Ätzverhalten von III/V-Verbindungshalbleitern	401
12.6.1	Verwendung chlorhaltiger Ätzgase	401
12.6.2	Der Methan/Wasserstoff-Prozeß	407

12.7	Kombination verschiedener Ätzverfahren . . . . .	409
12.8	Oberflächenreinigung . . . . .	409
12.9	Anlagen-Design . . . . .	411
13	Ausblick . . . . .	413
14	Anhang . . . . .	419
14.1	Elektronen-Energieverteilungen (EEDFs). . . . .	419
14.1.1	Boltzmann-Gleichung . . . . .	419
14.1.2	Äußeres Feld als kleine Störung . . . . .	419
14.1.2.1	Der Beitrag der elastischen Stöße. . . . .	420
14.1.2.2	Der Beitrag der unelastischen Stöße. . . . .	420
14.1.3	Näherungslösungen der Boltzmann-Gleichung . . . # . . .	421
14.1.3.1	HF-Feld . . . . .	421
14.1.3.2	Verschwindendes elektrisches Feld . . . . .	422
14.1.3.3	Margenau-Verteilung . . . . .	423
14.1.3.4	Druyvesteyn-Verteilung . . . . .	423
14.1.4	Frequenzeffekte. . . . .	426
14.2	Die Bohmsche Übergangszone. . . . .	428
14.3	Piasinaschwingungen . . . . .	433
14.4	Kapazitive Kopplung im RF-System . . . . .	441
14.4.1	Der symmetrische Fall. . . . .	441
14.4.2	Der asymmetrische Fall . . . . .	447
14.5	Bewegung im magnetischen Feld. . . . .	449
14.5.1	Die magnetische Flasche. . . . .	449
14.5.2	Modifizierung der Diffusion. . . . .	454
14.6	Cutoff und Skintiefe des E-Feldes in einer HF-Entladung . . . . .	455
14.7	Eigenschaften der Whistlerwellen. . . . .	464
14.7.1	Dispersionsbeziehung für ebene Wellen. . . . .	464
14.7.2	Dispersionsbeziehung im zylindrischen Plasma. . . . .	478
15	Verwendete Symbole und Akronyme . . . . .	489
16	Bildquellennachweis. . . . .	495
	Literaturverzeichnis . . . . .	497
	Register. . . . .	523