

Gerhard Franz

# Oberflächentechnologie mit Niederdruckplasmen

Beschichten und Strukturieren  
in der Mikrotechnik

Zweite, völlig neubearbeitete Auflage  
mit 199 Abbildungen

**Springer-Verlag**

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung . . . . .	1
2	Gleichstrom-Glimmentladung . . . . .	5
3	Das Plasma . . . . .	11
3.1	Temperaturverteilung im Plasma . . . . .	11
3.2	Potentialvariation im Plasma . . . . .	14
3.3	Ladungsneutralisation im ungestörten Plasma . . . . .	16
3.4	Wandpotentiale . . . . .	20
3.5	Plasmaschwingungen . . . . .	22
3.6	Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	24
4	Erzeugung und Vernichtung von Ladungsträgern . . . . .	27
4.1	Der Streuquerschnitt . . . . .	27
4.2	Elastische Stöße . . . . .	29
4.2.1	Elastische Stöße von Elektronen mit Atomen . . . . .	29
4.2.2	Elastische Stöße zwischen schweren Partikeln . . . . .	32
4.3	Unelastische Stöße . . . . .	34
4.3.1	Elektronenstöße . . . . .	34
4.3.2	Stöße von Ionen und Photonen . . . . .	37
4.4	Streuquerschnitte und Mittlere Freie Weglänge . . . . .	48
4.5	Sekundärelektronen-Erzeugung an Oberflächen . . . . .	52
4.6	Verlustmechanismen . . . . .	59
5	DC-Entladungen . . . . .	63
5.1	Ionisierung in der Kathodenzone . . . . .	63
5.1.1	Normale Entladungen . . . . .	63
5.1.2	Anomale Entladungen . . . . .	72
5.1.3	Kritik an der Townsendschen Näherung . . . . .	73
5.2	Negative Glühzone und Positive Säule . . . . .	77
5.2.1	Ionisierung in der Negativen Glühzone . . . . .	79
5.3	Anodenzone . . . . .	81
5.4	Hohlkathodenentladungen . . . . .	82

6	HF-Entladungen . . . . .	85
6.1	Beschreibung der Ladungsträgerzeugung . . . . .	85
6.1.1	Einfluß von Druck und Feldfrequenz . . . . .	85
6.1.2	Modifizierung der Diffusion . . . . .	92
6.1.3	Modell für den Durchbruch . . . . .	98
6.2	Typen der HF-Anregung . . . . .	103
6.3	Messung von Potentialen in HF-Entladungen . . . . .	104
6.4	Abgleichsnetzwerke . . . . .	107
6.5	RF-Schilde . . . . .	112
6.5.1	“Self-Bias” der RF-Elektroden — Qualitative Beschreibung	112
6.5.2	“Self-Bias” der RF-Elektroden — Quantitative Beschrei- bung . . . . .	116
6.6	Streumechanismen . . . . .	129
6.6.1	Experimente . . . . .	132
6.6.2	Computersimulationen . . . . .	138
6.7	Vergleich zwischen DC- und RF-Entladungen . . . . .	144
7	Sputtern . . . . .	147
7.1	Wechselwirkungen der Ionen mit der Oberfläche . . . . .	148
7.2	Kinetik . . . . .	149
7.3	Energieverteilung der abgestäubten Atome . . . . .	154
7.4	Sputtersysteme . . . . .	157
7.5	Sputterbedingungen . . . . .	159
7.5.1	Elektrische Größen . . . . .	160
7.5.2	Temperaturkontrolle des Substrates . . . . .	160
7.6	Filmbildung und mechanische Spannungen . . . . .	162
7.7	Probleme der Kontamination . . . . .	164
7.7.1	Kontamination durch Argon . . . . .	164
7.7.2	Kontamination durch Fremdgase . . . . .	165
7.7.3	Reaktives Sputtern . . . . .	166
7.7.4	Beschuß mit weiteren Partikeln . . . . .	167
7.8	Bias-Techniken . . . . .	168
7.8.1	Einfluß auf Abscheiderate und Filmzusammensetzung . . . . .	168
7.8.2	Beeinflussung weiterer Filmeigenschaften . . . . .	168
7.8.3	Mechanismen des Bias-Sputterns . . . . .	169
7.8.4	Gleichmäßigkeit der Kantenbedeckung an Stufen . . . . .	171
7.8.5	Abhängigkeit der mechanischen Spannung vom Substrat- Bias . . . . .	171
7.9	Deposition von Mehrkomponenten-Filmen . . . . .	172
7.10	Probleme der Kohäsion . . . . .	176
7.11	Magnetisch verbesserte Sputtersysteme . . . . .	178
7.12	Triodensysteme . . . . .	183
7.13	Ionenplattieren . . . . .	183
7.14	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) . . . . .	185

8	Trockenätzverfahren . . . . .	191
8.1	Sputterätzen . . . . .	192
8.2	Reaktive Ätzverfahren . . . . .	194
8.3	Abhängigkeit von einzelnen Parametern . . . . .	196
8.3.1	Gaszusammensetzung . . . . .	196
8.3.2	Gasdruck und RF-Leistung . . . . .	198
8.3.3	Elektrodengeometrie . . . . .	200
8.3.4	Gasflußeffekte und der "Loading"-Effekt . . . . .	200
8.3.5	Transporteffekte und Reaktordesign . . . . .	205
8.4	Hauptprobleme des Trockenätzens . . . . .	213
8.4.1	"Micro-Loading" (ML) . . . . .	221
8.4.2	"Aspect-Ratio Dependent Etching" (ARDE) . . . . .	224
8.5	Ätztopographie . . . . .	229
8.5.1	Historischer Rückblick . . . . .	229
8.5.2	Gegenüberstellung der Ätztopographie-Mechanismen . . . . .	234
8.6	Prozeßkontrolle . . . . .	237
8.7	Quantitative Untersuchungen — Actinometrie und die EEDF . . . . .	246
9	Ätzmechanismen . . . . .	249
9.1	Simulation von Trockenätzungen . . . . .	253
9.2	Ätzverhalten von Si und seinen Verbindungen . . . . .	256
9.2.1	Ätzung von $\text{Si}_3\text{N}_4$ und $\text{SiO}_2$ mit fluorhaltigen Gasen . . . . .	256
9.2.2	Ätzung von Si mit chlorhaltigen Gasen . . . . .	259
9.3	Ätzverhalten von III/V-Verbindungshalbleitern . . . . .	261
9.3.1	Verwendung chlorhaltiger Ätzgase . . . . .	261
9.3.2	Der Methan/Wasserstoff-Prozeß . . . . .	266
9.4	Kombination verschiedener Ätzverfahren . . . . .	268
9.5	Oberflächenreinigung . . . . .	268
9.6	Anlagen-Design . . . . .	270
10	Ionenstrahlssysteme . . . . .	273
10.1	Anwendungen . . . . .	281
10.2	Ionenstrahlunterstütztes Ätzen: IBAE oder CAIBE . . . . .	285
11	Cyclotron-Systeme . . . . .	287
11.1	Resümee der Eigenschaften von HF-Entladungen . . . . .	287
11.2	Whistlerwellen und Systeme mit gekoppelter Resonanz . . . . .	290
11.3	ECR-Quellen . . . . .	297
11.3.1	Das elektrische Feld und die Diffusionslänge . . . . .	297
11.3.2	Einkoppeln von Mikrowellen . . . . .	302
11.3.3	Anwendungen . . . . .	307
11.4	Vergleich zwischen Helicon- und ECR-Entladungen . . . . .	311
12	Ausblick . . . . .	313

13	Anhang . . . . .	319
13.1	Elektronen-Energieverteilungen (EEDFs) . . . . .	319
13.2	Die Beschreibung der Bohmschen Übergangszone . . . . .	325
13.3	Plasmaschwingungen . . . . .	331
13.4	Kapazitive Kopplung im RF-System . . . . .	339
13.4.1	Der symmetrische Fall . . . . .	339
13.4.2	Der asymmetrische Fall . . . . .	345
13.5	Bewegung im magnetischen Feld . . . . .	348
13.5.1	Die magnetische Flasche . . . . .	348
13.5.2	Modifizierung der Diffusion . . . . .	352
13.6	“Cutoff” und Skintiefe des E-Feldes in einer HF-Entladung . . . . .	354
13.7	Eigenschaften der Whistlerwellen . . . . .	363
13.7.1	Dispersionsbeziehung für ebene Wellen . . . . .	363
13.7.2	Dispersionsbeziehung im zylindrischen Plasma . . . . .	378
14	Verwendete Symbole und Akronyme . . . . .	389
15	Bildquellennachweis . . . . .	395
	Literaturverzeichnis . . . . .	397
	Sachverzeichnis . . . . .	417