

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Oberflächenmodifikation – ein Überblick</b>	. . . . .	1
1.1	Einleitung	. . . . .	1
1.2	Laserstrahl-Verfahren	. . . . .	4
1.2.1	Einige Charakteristika	. . . . .	4
1.2.2	Laserstrahl-Behandlung von Metallen	. . . . .	5
1.2.3	Laserstrahl-Behandlung von Halbleitern	. . . . .	6
1.2.4	Laserinduzierte chemische Grenzflächen-Reaktionen	. . . . .	6
1.2.5	Beschichtungstechniken mit Lasern	. . . . .	7
1.2.6	Materialabtragung mit Lasern	. . . . .	7
1.2.7	Feinbearbeitung mit Laserstrahlen	. . . . .	8
1.3	Ionenstrahl-Verfahren	. . . . .	8
1.3.1	Einige Charakteristika	. . . . .	8
1.3.2	Ionenstrahltechniken	. . . . .	8
1.3.3	Ionenimplantation in Halbleiter	. . . . .	9
1.3.4	Ionenimplantation in Metalle	. . . . .	10
1.3.5	Ionenimplantation in Isolatoren und Polymere	. . . . .	11
1.3.6	Ionenstrahltechnik und dünne Schichten	. . . . .	11
1.4	Elektronenstrahl-Verfahren	. . . . .	11
1.4.1	Thermische Verfahren	. . . . .	11
1.4.2	Nicht-thermische Verfahren	. . . . .	12
1.4.3	Beschichtung und Feinbearbeitung mit Elektronenstrahlen	. . . . .	13
1.4.4	Ultraviolett- und Synchrotronstrahlung als Alternativen	. . . . .	13
1.5	Plasma-Verfahren	. . . . .	14
1.6	Diamantschichten-Herstellung als Anwendung der Plasma- und der Ionenstrahltechnik	. . . . .	15
1.7	Mikrotechnologien als Anwendung von Methoden der Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie	. . . . .	15
1.8	Konventionelle Verfahren der Oberflächenmodifikation	. . . . .	16
<b>2</b>	<b>Modifizierung von Oberflächen durch Laserstrahl-Verfahren</b>	. . . . .	17
2.1	Überblick	. . . . .	17
2.2	Laser für die Materialbearbeitung	. . . . .	18
2.2.1	Festkörperlaser	. . . . .	19
2.2.2	CO <sub>2</sub> -Molekülgas-Laser	. . . . .	20
2.2.3	Excimer-Laser	. . . . .	22

2.2.4	Gütegeschaltete (Q-Switch-)Laser . . . . .	22
2.2.5	Strahlführung und Fokussierung . . . . .	22
2.3	Wechselwirkung zwischen Strahlung und Werkstoff . . . . .	25
2.3.1	Absorption der Laserstrahlung bei niedrigen Intensitäten $I < I_c$ . . . . .	26
2.3.2	Theoretische Beschreibung der Bearbeitungsprozesse bei $I < I_c$ . . . . .	27
2.3.3	Anomale Absorption der Laserstrahlung bei hohen Intensitäten $I > I_c$ . . . . .	28
2.3.4	Abhängigkeit der kritischen Intensität $I_c$ von der Einwirkungsdauer $t_p$ . . . . .	30
2.3.5	Material-abtragende Bearbeitung . . . . .	31
2.3.6	Wirkungsgrad der abtragenden Laserbearbeitung . . . . .	33
2.3.7	Laserinduzierte Schockwellen . . . . .	33
2.4	Laserinduzierte chemische Reaktionen an Oberflächen . . . . .	34
2.4.1	Pyrolytische und photolytische Reaktionen . . . . .	36
2.4.2	Laserinduzierte chemische Abscheidung aus der Gasphase (LCVD) . . . . .	36
2.4.3	Weitere laserinduzierte chemische Reaktionen an der gas/fest-Grenzfläche . . . . .	38
2.4.3.1	Materialabtragung, Ätzung . . . . .	38
2.4.3.2	Materialsynthese . . . . .	39
2.4.3.3	Dotieren mit Fremdatomen . . . . .	39
2.4.3.4	Oxidieren, Nitrieren und Carburieren . . . . .	39
2.4.3.5	Reduktion . . . . .	39
2.4.4	Laser-unterstütztes elektrochemisches und chemisches Plattieren und Ätzen . . . . .	40
2.4.5	Laserinduzierte fest/fest-Reaktionen an Grenzflächen . . . . .	41
2.4.5.1	Materialabscheidung . . . . .	41
2.4.5.2	Materialabtragung: Ablation . . . . .	41
2.4.5.3	Materialsynthese . . . . .	42
2.4.5.4	Dotierung . . . . .	43
2.5	Anwendungen in der Materialbearbeitung . . . . .	43
2.5.1	Umwandlungshärten von Randschichten . . . . .	44
2.5.2	Härten durch Umschmelzen . . . . .	47
2.5.3	Laser-Legieren . . . . .	48
2.5.4	Laser-Plattieren . . . . .	50
2.5.5	Laser-Glasieren (Laser Glazing) . . . . .	53
2.5.6	Schockhärten durch laserinduzierte Detonationswellen . . . . .	54
2.5.7	Weitere Laserstrahlverfahren . . . . .	54
2.6	Anwendungen in der Elektronik- und Dünnschicht-Technologie . . . . .	57
2.6.1	Strukturieren von Substraten . . . . .	57
2.6.2	Abgleichen elektronischer Bauelemente: Trimen . . . . .	58
2.6.3	Strukturieren elektronischer Bauelemente durch Laserstrahlschneiden . . . . .	60
2.6.4	Kontaktieren und Verbinden von Bauelementen mittels Laserstrahlen . . . . .	61
2.6.5	Laser-Feinbearbeitung im $\mu\text{m}$ -Bereich . . . . .	61
2.6.6	Ausheilen von Dotierungsschäden in Halbleitern und Rekristallisation . . . . .	62
2.6.7	Laser-Plasma-Verfahren zur Herstellung dünner Schichten und Schichtstrukturen . . . . .	63
2.6.7.1	Charakteristika des Verfahrens . . . . .	64
2.6.7.2	Ergebnisse und Anwendungen . . . . .	66

<b>3</b>	<b>Modifizierung von Oberflächen durch Ionenstrahl-Verfahren</b>	69
3.1	Einleitung	69
3.2	Grundlagen der Ionenimplantation	70
3.2.1	Allgemeine Phänomene	70
3.2.2	Implantationsprofil	72
3.2.2.1	Konzentrationsverteilung der implantierten Ionen	72
3.2.2.2	Ionen-Reichweite	73
3.2.2.3	Channeling-Effekt	76
3.2.3	Strahlenschäden	77
3.2.3.1	Reichweiteverteilung der Strahlenschäden	77
3.2.3.2	Bildung von amorphen Schichten	79
3.2.4	Sputtering während der Ionenimplantation	80
3.2.5	Ionenstrahlmischen (Atomic Mixing, Ion Beam Mixing)	81
3.2.5.1	Mechanismen des Ionenstrahlmischens	81
3.2.5.2	Experimente zum Ionenstrahlmischen	83
3.2.6	Ionenstrahlverfahren und Implantationsanlagen	85
3.2.6.1	Übersicht über die Ionenstrahlverfahren	85
3.2.6.2	Strukturen der entstehenden Randschichten	87
3.2.6.3	Implantationsanlagen	87
3.3	Implantation von Ionen in Halbleiter	89
3.3.1	Integrierte Schaltkreise	89
3.3.1.1	Überblick	89
3.3.1.2	Dotieren durch Ionenimplantation	90
3.3.1.3	Vergraben Schichten (Buried Layers)	92
3.3.2	Ausheilen von Strahlenschäden in Halbleitern (Annealing)	94
3.3.2.1	Aktivierung implantierter Dotieratome	94
3.3.2.2	Kurzzeit-Ausheilverfahren für Silicium	95
3.3.2.3	Ausheilen von Verbindungshalbleitern	98
3.4	Implantation von Ionen in Metalle	98
3.4.1	Einleitung	98
3.4.2	Modifizierung der Zusammensetzung und der Struktur	99
3.4.2.1	Verdünnte feste Lösungen	99
3.4.2.2	Übersättigung, Legierungen, chemische Verbindungen und strukturelle Phasenänderungen	99
3.4.2.3	Amorphe metallische Phasen	100
3.4.3	Anwendungen der Ionenimplantation auf Metalle	102
3.4.3.1	Vor- und Nachteile der Ionenstrahlmethode	102
3.4.3.2	Verschleißminderung	103
3.4.3.3	Korrosion in wäßriger Lösung	105
3.4.3.4	Hochtemperaturoidation	107
3.4.3.5	Katalyse	108
3.4.3.6	Ionenimplantation zur Simulation der Strahlenschäden in Reaktormaterialien	108
3.4.3.7	Ionenstrahltechniken zur Erhöhung der Adhäsion dünner Schichten	109
3.5	Ionenimplantation in Isolatoren und Polymere	111

<b>4</b>	<b>Modifizierung von Oberflächen durch Elektronenstrahl-Verfahren . . . . .</b>	113
4.1	Einleitung . . . . .	113
4.2	Wirkungen des Elektronenstrahls auf die Materie . . . . .	114
4.3	Vergleich der Wechselwirkung von Elektronen- und Laserstrahlen mit einem Target . . . . .	117
4.4	Thermische Elektronenstrahlverfahren . . . . .	118
4.4.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	118
4.4.2	Elektronenstrahlanlagen . . . . .	120
4.4.3	Übersicht über die thermischen Elektronenstrahlverfahren . . . . .	121
4.5	Nichtthermische Elektronenstrahlverfahren . . . . .	122
4.5.1	Elektronenstrahl-induzierte nichtthermische Reaktionen . . . . .	122
4.5.2	Strahlenchemische Reaktionen in organischen Substanzen . . . . .	123
4.5.3	Elektronenstrahl-härtbare Beschichtungsmaterialien . . . . .	125
4.5.4	Elektronenbeschleuniger . . . . .	126
4.5.4.1	Elektronenbeschleuniger mit Scanningsystem . . . . .	127
4.5.4.2	Beschleuniger mit linearer Kathode . . . . .	128
4.5.4.3	Bestrahlung unter Inertgas . . . . .	129
4.5.5	Strahlendosis und erforderliche Strahlspannung . . . . .	129
4.6	Anwendungen von strahlenchemischen Wirkungen der Elektronenstrahlen . . . . .	131
4.6.1	Allgemeines . . . . .	131
4.6.2	Elektronenstrahlhärtungen von Beschichtungen auf starren, ebenen Substraten . . . . .	133
4.6.3	Elektronenstrahlhärtungen von Beschichtungen auf Formteilen . . . . .	133
4.6.4	Elektronenstrahlhärtungen von Beschichtungen auf flexiblen Substraten . . . . .	134
4.6.5	Pfropfpolymerisation durch Elektronenbestrahlung . . . . .	135
4.6.6	Vernetzen und Vulkanisieren mittels Elektronenstrahlen . . . . .	135
4.6.7	Depolymerisation von Kunststoffen und Sterilisation mittels Elektronenstrahlen . . . . .	136
4.6.8	Strahlenhärtung von Beschichtungen mit ultraviolettem Licht . . . . .	137
<b>5</b>	<b>Modifizierung von Oberflächen durch Plasma-Verfahren . . . . .</b>	138
5.1	Einleitung . . . . .	138
5.2	Erzeugung von Mikrowellen-Plasmen . . . . .	139
5.3	ECR-Mikrowellen-Ionenquellen . . . . .	141
5.4	Anwendungen der Plasmatechnik . . . . .	143
5.4.1	Herstellung dünner Schichten mittels Mikrowellenplasmen . . . . .	143
5.4.2	Ätzen und Abtragen durch Mikrowellenplasmen . . . . .	144
5.4.2.1	Reaktive Trockenätzverfahren . . . . .	144
5.4.2.2	Lochwandreinigung von Multilayer-Leiterplatten . . . . .	145
5.4.2.3	Ultrareinigung von Keramik- und anderen Substraten . . . . .	146
5.4.2.4	Qualitätskontrolle von integrierten Schaltungen . . . . .	147
5.4.2.5	Mikroanalyse durch Plasma-Veraschung . . . . .	148
5.4.2.6	Plasma-Sterilisation . . . . .	148
5.4.3	Oberflächenmodifikation von Polymeren durch Plasmen . . . . .	149

5.4.3.1	Wirkungen eines Plasmas auf Polymere . . . . .	149
5.4.3.2	Anwendungen der Plasma-Oberflächenaktivierung von Polymeren . . . . .	151
5.4.4	Plasmabehandlung von Metalloberflächen . . . . .	157
<b>6</b>	<b>Diamantschichten-Herstellung als Anwendung der Plasma- und der Ionenstrahltechnik . . . . .</b>	<b>158</b>
6.1	Zur Entwicklung des Arbeitsgebietes . . . . .	158
6.2	Wachstum der Diamantschichten . . . . .	161
6.4	Über die Rolle des Wasserstoffes bei der CVD-Diamant-Abscheidung . . . . .	162
6.4	Diamant-Abscheidung durch Ionenstrahl-Technik . . . . .	163
6.5	Eigenschaften und Anwendungen von Diamantschichten . . . . .	164
6.5.1	Chemische Eigenschaften . . . . .	164
6.5.2	Thermische Eigenschaften . . . . .	165
6.5.3	Mechanische Eigenschaften . . . . .	165
6.5.4	Elektronische und optische Eigenschaften . . . . .	166
6.5.5	Diamant als Substrat für elektronische Schaltungen . . . . .	166
6.5.6	Diamant als Grundmaterial für elektronische Schaltungen . . . . .	166
<b>7</b>	<b>Mikrotechnologien als Anwendung von Methoden der Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie . . . . .</b>	<b>168</b>
7.1	Einleitung . . . . .	168
7.2	Herstellung von Siliciumscheiben . . . . .	170
7.3	Dotierung von Halbleitern . . . . .	172
7.4	Schichttechnik . . . . .	173
7.4.1	Epitaktische Silicium-Schichten . . . . .	174
7.4.2	Thermische SiO <sub>2</sub> -Schichten . . . . .	178
7.4.3	Durch CVD abgeschiedene SiO <sub>2</sub> -Schichten . . . . .	181
7.4.4	Phosphorglas-Schichten . . . . .	182
7.4.5	Siliciumnitrid-Schichten . . . . .	182
7.4.6	Polysilicium-Schichten . . . . .	183
7.4.7	Silicid-Schichten . . . . .	185
7.4.8	Metallschichten in integrierten Schaltkreisen . . . . .	186
7.4.8.1	Materialien für die Metallisierung . . . . .	186
7.4.8.2	Leiterbahnen zwischen den Bauelementen . . . . .	187
7.4.8.3	Ohmsche und Schottky-Kontakte . . . . .	187
7.4.8.4	Aluminium-Silicium-Kontakte . . . . .	188
7.4.8.5	Platin-Silicium-Kontakte . . . . .	189
7.5	Lithographie . . . . .	190
7.5.1	Übersicht . . . . .	190
7.5.2	Photolithographie . . . . .	191
7.5.2.1	Photoresists . . . . .	191
7.5.2.2	Kontaktbelichtung und Proximity-Belichtung . . . . .	192
7.5.2.3	Projektionsbelichtung . . . . .	193
7.5.3	Elektronenstrahl-Lithographie . . . . .	194
7.5.3.1	Auflösungsgrenze, Elektronenresists . . . . .	194

7.5.3.2	Elektronenstrahl-Schreibgeräte . . . . .	195
7.5.3.3	Elektronenstrahl-Projektionsgeräte . . . . .	197
7.5.4	Röntgenstrahl-Lithographie . . . . .	197
7.5.4.1	Maskentechnik, Röntgenresists und Auflösungsgrenze . . . . .	197
7.5.4.2	Röntgenstrahlquellen . . . . .	199
7.5.5	Ionenstrahl-Lithographie . . . . .	201
7.5.5.1	Auflösungsgrenze und Ionenresists . . . . .	201
7.5.5.2	Ionenstrahl-Projektionsgeräte . . . . .	203
7.5.5.3	Ionenstrahl-Schreibgeräte . . . . .	203
7.6	Ätztechnik . . . . .	205
7.6.1	Physikalisches Ätzen . . . . .	206
7.6.2	Plasma-unterstütztes chemisches Ätzen . . . . .	206
7.6.3	Plasma-unterstützte chemisch-physikalische Ätzverfahren . . . . .	207
7.6.3.1	Plasmaätzen (PE) im Parallelplattenreaktor . . . . .	208
7.6.3.2	Reaktives Ionenätzen (RIE) . . . . .	209
7.6.3.3	Reaktives Ionenätzen im transversalen Magnetfeld (MERIE) . . . . .	209
7.6.3.4	Ionenstrahlätzten (IBE) und reaktives Ionenstrahlätzten (RIBE) . . . . .	209
7.6.4	Ätzgase für bestimmte Materialien . . . . .	211
7.6.4.1	Chemische Ätzreaktionen bei den Plasmaverfahren . . . . .	211
7.6.4.2	Ätzgase und Parameter des Ätzprozesses . . . . .	212
7.6.4.3	Zum Vakuumpumpstand . . . . .	217
7.7	Anwendungen in der MOS-Technologie . . . . .	217
7.8	Weitere Mikrotechnologien . . . . .	222
7.8.1	Überblick . . . . .	222
7.8.2	Anisotropes Ätzen von monokristallinem Silicium . . . . .	223
7.8.3	Anwendungen der geätzten Profile in der Sensorik . . . . .	224
7.8.4	Herstellung und Anwendungen von Miniaturdüsen . . . . .	224
7.8.5	Mikromaschinen mit beweglichen Teilen . . . . .	225
7.8.6	Herstellung von hochauflösenden optischen Gittern . . . . .	227
7.8.7	Anwendungen in der integrierten Optoelektronik . . . . .	229
7.8.7.1	Optoelektronischer Filter . . . . .	230
7.8.7.2	Integrierte Laser . . . . .	231
7.8.7.3	Mikrostruktur-Effekte . . . . .	233
<b>8</b>	<b>Anhang: Die konventionellen Verfahren des Randschichthärtens von Metallen . . . . .</b>	<b>239</b>
8.1	Mechanische Verfahren . . . . .	239
8.2	Thermische Verfahren zum Randschichthärteten . . . . .	239
8.2.1	Transformationshärtungen von Oberflächen . . . . .	240
8.2.2	Leistungsdichte und Einhärtetiefe . . . . .	242
8.2.3	Induktionshärtungen . . . . .	243
8.2.4	Flammhärtungen . . . . .	244
8.2.5	Hochfrequenz-Impulshärtungen . . . . .	244
8.2.6	Vergleich mit dem Elektronen- und dem Laserstrahl-Härteten . . . . .	244
8.3	Thermochemische Diffusionsverfahren . . . . .	245

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
8.3.1 Einleitung . . . . .	245
8.3.2 Carburieren . . . . .	247
8.3.2.1 Carburier-Verfahren . . . . .	248
8.2.3.2 Eigenschaften und Anwendungen der Einsatzhärte-(Carburier-) Schichten . . . . .	249
8.3.3 Nitrieren . . . . .	250
8.3.3.1 Nitrier-Verfahren . . . . .	250
8.3.3.2 Eigenschaften und Anwendungen der Nitrierschichten . . . . .	250
8.3.4 Carbonitrieren (Nitrocarburieren) . . . . .	252
8.3.4.1 Carbonitrier-Verfahren . . . . .	252
8.3.4.2 Eigenschaften und Anwendungen der Carbonitrierschichten . . . . .	253
8.3.5 Borieren . . . . .	253
8.3.5.1 Borier-Verfahren . . . . .	253
8.3.5.2 Eigenschaften und Anwendungen der Borierschichten . . . . .	254
8.3.6 Silicierschichten . . . . .	255
8.3.7 Aluminieren . . . . .	255
8.3.8 Chromieren . . . . .	256
8.3.9 Zink-Diffusionsschichten . . . . .	257
8.3.10 Abschließende Bemerkungen . . . . .	258
<b>Literatur</b> . . . . .	<b>259</b>
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>283</b>