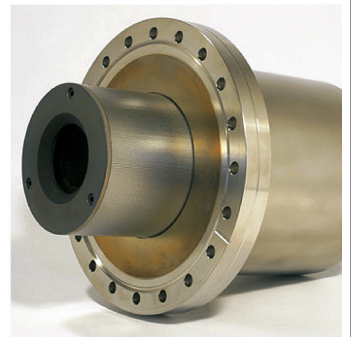
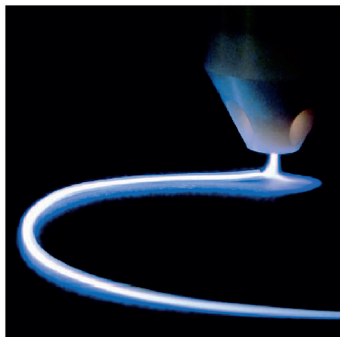
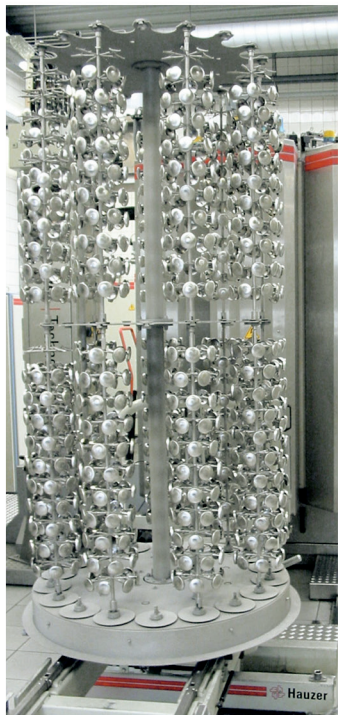
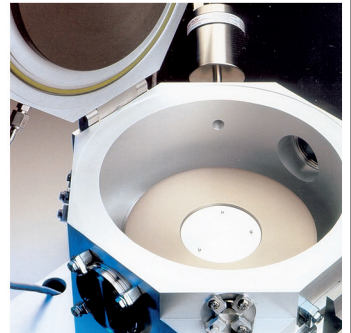
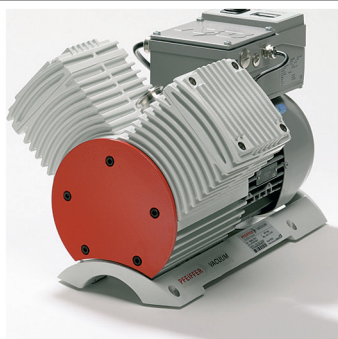


Gerhard Blasek, Günter Bräuer

Vakuum · Plasma · Technologien

Beschichtung und Modifizierung von Oberflächen

Teil I+II



G. Blasek, G. Bräuer et al.

Vakuum · Plasma · Technologien

Beschichtung und Modifizierung von Oberflächen

Teil I

Inhaltsverzeichnis von Teil I und Teil II (verkürzt)

1 Grundlagen.....	21
1.1 Vakuumtechnische Grundlagen.....	21
1.1.1 Anforderungen an Vakuumbedingungen	21
1.1.2 Thermodynamische Grundlagen	22
1.1.3 Adsorption und Gasabgabe	26
1.1.4 Kondensation und Verdampfen.....	28
1.1.5 Vakuumerzeugung	30
1.1.5.1 Evakuierungsprozess	30
1.1.5.2 Gastransferpumpen.....	35
1.1.6 Druckmessung im Vakuum.....	44
1.2 Plasmatechnische Grundlagen	48
1.2.1 Plasmabegriff, Vorkommen, Anwendungen	48
1.2.2 Grundbegriffe und Kenngrößen eines Plasmas	50
1.2.3 Plasmarandschichten	56
1.2.4 Plasmaerzeugung in Gasentladungen	63
1.2.4.1 Gleichstromentladungen	63
1.2.4.2 Hochfrequenzentladungen	70
1.2.4.3 Bogenentladungen	80
1.2.5 Beschichtungsrelevante Plasmadiagnostik	81
1.3 Grundlagen der vakuumtechnischen Schichtherstellung und Oberflächenmodifizierung.....	87
1.3.1 Beschichtung und Stufen des Beschichtungsprozesses	87
1.3.2 Mobilisierung des Schichtwerkstoffs.....	88
1.3.2.1 Physikalische und chemische Dampfphasenabscheidung	88
1.3.2.2 Emissionscharakteristik	89
1.3.3 Transport des Schichtwerkstoffs.....	91

1.3.4	Kondensation des Schichtwerkstoffs und Schichtausbildung.....	92
1.3.4.1	Schichtwachstum	92
1.3.4.2	Haftfestigkeit	94
1.3.4.3	Schichtdickenverteilung.....	95
1.3.4.4	Mikrostruktur dünner Schichten	98
1.3.4.5	Ionenunterstützte Beschichtung.....	99
1.3.5	Vakuumtechnische Oberflächenmodifizierung.....	99
1.3.6	Übersicht vakuumtechnischer Beschichtungs- und Modifizierungsverfahren	100
1.4	Grundlagen optischer Schichten	102
1.4.1	Optische Schichten und Plasmatechnik	102
1.4.2	Eigenschaften optischer Materialien.....	103
1.4.2.1	Beschreibung der dielektrischen Funktion von Materialien	103
1.4.2.2	Dispersionsmodelle.....	104
1.4.2.3	Näherungen.....	109
1.4.2.4	Grenzen des Drude-Lorentz-Oszillatormodells	110
1.4.3	Interferenz an dünnen Schichten	114
1.4.4	Antireflexschichten	119
1.4.5	Optische Filter	122
1.4.5.1	Filtertypen.....	122
1.4.5.2	Periodische $\lambda/4$ Schichten – dielektrische Spiegel.....	123
1.4.5.3	Breitbandige dielektrische Spiegel	124
1.4.5.4	Kantenfilter	125
1.4.5.5	Bandpassfilter	126
1.4.5.6	Multikavitätenfilter	128
1.4.5.7	Bandstopppfilter (Minusfilter)	129
1.4.5.8	Weitere Filter.....	132
1.4.6	Design und Analyse von Filtern.....	133
1.4.6.1	Vorgehensweise	133
1.4.6.2	Erstellen eines Grunddesigns.....	133
1.4.6.3	Optimierung des Designs.....	137
1.5	Oberflächen- und Dünnschichtcharakterisierung.....	139
1.5.1	Wichtige Parameter und ihre Charakterisierung.....	139
1.5.2	Charakterisierung geometrischer Schichtparameter.....	143
1.5.2.1	Oberflächentopografie und Rauheit	143
1.5.2.2	Schichtdickenbestimmung.....	147

1.5.3	Charakterisierung mechanischer Schichtparameter.....	150
1.5.3.1	Härte, Festigkeit, Verschleiß	150
1.5.3.2	Schichtspannungen	153
1.5.3.3	Parameter der Rissbildung und Schichtdelamination	155
1.5.4	Gefüge- und Phasencharakterisierung dünner Schichten	158
1.5.4.1	Übersicht.....	158
1.5.4.2	Gefügeuntersuchungen	159
1.5.4.3	Phasenaufbau und -zusammensetzung.....	163
1.5.5	Charakterisierung chemischer Schichtparameter	165
1.5.5.1	Übersicht.....	165
1.5.5.2	Elementverteilungsanalyse	166
1.5.5.3	Elementtiefenprofilanalyse	168
1.5.5.4	Bindungsenergieanalyse	173
1.5.5.5	Analyse organischer Materialien	174
1.5.6	Charakterisierung physikochemischer Schichtparameter.....	177
1.5.7	Charakterisierung elektrischer Schichtparameter.....	181
1.5.7.1	Übersicht.....	181
1.5.7.2	Schichtsysteme der Mikroelektronik	181
1.5.7.3	Schichtsysteme für Oberflächenwellenfilter	183
1.5.7.4	Schichtsysteme der Magnetoelektronik	184
2	Verfahren	187
2.1	Beschichten durch Verdampfen.....	187
2.1.1	Verdampfen im Hochvakuum	187
2.1.2	Bedampfen mit widerstandsbeheizten Dampfquellen	189
2.1.2.1	Widerstandsbeheizte Dampfquellen	189
2.1.2.2	Vakuumbedingungen beim Bedampfen	190
2.1.2.3	Industrielle Bedampfungsanlagen	192
2.1.3	Bedampfen mit Elektronenstrahlverdampfern.....	200
2.1.3.1	Einordnung des Elektronenstrahlverdampfens	200
2.1.3.2	Erzeugung und Führung von Elektronenstrahlen	200
2.1.3.3	Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit dem Verdampfungsgut.....	204
2.1.3.4	Dampfabscheidung	206
2.1.3.5	Reaktive Dampfabscheidung	209
2.1.3.6	Verdampfertiegel und Verdampfungsmaterialien.....	210

2.1.4	Ionenunterstützte physikalische Dampfphasenabscheidung	213
2.1.4.1	Wechselwirkungen zwischen Ionen und Substrat sowie zwischen Ionen und Schicht	213
2.1.4.2	Aktiviertes reaktives Aufdampfen	214
2.1.4.3	Ionenstrahlunterstütztes Aufdampfen	216
2.1.4.4	Ionenplattieren	218
2.1.5	Bedampfen mit Vakuumbogenentladungen	230
2.1.5.1	Vakuumbogenverdampfer	230
2.1.5.2	Kathodische Vakuumlichtbogenverdampfer	231
2.1.5.3	Anodische Vakuumbogenverdampfer	236
2.1.5.4	Anforderungen an industrielle Anlagen	243
2.1.5.5	Ausführungen industrieller Anlagen	252
2.1.5.6	Hartstoffbeschichtung von Werkzeugen	254
2.1.5.7	Neue Entwicklungen	258
2.2	Schichtherstellung durch Sputtern	260
2.2.1	Wirkprinzip	260
2.2.1.1	Sputtereffekt	260
2.2.1.2	Anwendungsbereiche des Sputterns	261
2.2.1.3	Mechanismus des Materialabtrags beim Sputtern	262
2.2.1.4	Erzeugung von Ionen	264
2.2.1.5	Materialtransport	265
2.2.1.6	Materialdeposition	266
2.2.2	Diodensputtern	267
2.2.3	Triodensputtern	268
2.2.4	Magnetronensputtern	268
2.2.4.1	Prinzip	268
2.2.4.2	Doppelmagnetron	271
2.2.4.3	Unbalanciertes Magnetron	273
2.2.4.4	Magnetron mit rotierendem Rohrtarget	274
2.2.4.5	Gepulste Plasmen	276
2.2.4.6	Hochleistungspulsmagnetronensputtern	279
2.2.5	Hohlkathodensputtern	280
2.2.5.1	Hohlkathodeneffekt	280
2.2.5.2	Hohlkathodensputtern	283
2.2.5.3	Hohlkathodenmagnetronensputtern	284
2.2.5.4	Gasflussputtern	285

2.2.6	Ionenstrahlputtern	288
2.2.7	Wichtige Prozessparameter.....	292
2.2.7.1	Arbeitsdruck	292
2.2.7.2	Beschichtungsrate	293
2.2.7.3	Sputterausbeute.....	294
2.2.7.4	Ionenstromdichte	297
2.2.7.5	Targetkühlung	298
2.2.7.6	Targettemperatur	299
2.2.8	Schichteigenschaften	300
2.2.8.1	Schichtzusammensetzung	300
2.2.8.2	Struktur und Topografie	301
2.2.8.3	Substrattemperatur.....	301
2.2.8.4	Substratvorspannung.....	302
2.2.9	Stabilität und Reproduzierbarkeit	304
2.2.9.1	Restgas.....	304
2.2.9.2	Partikel.....	305
2.2.9.3	Arcing	306
2.2.9.4	Anode.....	308
2.2.10	Auftrag verschiedener Schichtmaterialien.....	308
2.2.10.1	Sputtern von Metallen.....	308
2.2.10.2	Sputtern von Legierungen.....	308
2.2.10.3	Sputtern von Verbindungen.....	310
2.2.10.4	Sputtern von Halbleitern	310
2.2.10.5	Sputtern von Oxiden und Polymeren	310
2.2.10.6	Reaktives Sputtern	311
2.2.11	Beschichtung unterschiedlicher Werkstoffe.....	315
2.2.12	Schichtanbindung	316
2.2.13	Beschichtung unterschiedlicher Substratformen	317
2.2.13.1	Kleinflächenbeschichtung	317
2.2.13.2	Großflächenbeschichtung	318
2.2.13.3	3D-Beschichtung	318
2.2.13.4	Innenbeschichtung	319
2.2.14	Vergleich mit anderen Beschichtungsverfahren	320
2.3	Plasmaunterstützte chemische Dampfphasenabscheidung	322
2.3.1	Allgemeine Betrachtungen zu CVD	322

2.3.2	Plasmaunterstützte chemische Dampfphasenabscheidung	326
2.3.2.1	Ziel plasmaunterstützter chemischer Dampfphasen- abscheidung	326
2.3.2.2	Plasmaunterstützte Niederdruck-CVD	327
2.3.2.3	Plasmapolymerisation	335
2.3.3	Anwendungen der plasmaunterstützten Niederdruck-CVD	336
2.3.3.1	Funktionale Schichten für die Medizintechnik	336
2.3.3.2	Glasartige Kratzschuttschichten	343
2.3.3.3	Unvollständig vernetzte Membranschichten	343
2.3.3.4	Diamantähnliche Schichten	344
2.3.3.5	Schichten für Halbleitertechnologie	346
2.3.3.6	Atmosphärendruck-PCVD	349
2.3.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	354
2.4	Plasmapolymerisation	356
2.4.1	Geschichtliche Entwicklung	356
2.4.2	Definition der Plasmapolymerisationsmodi	357
2.4.3	Plasmainitiierte Polymerisation	358
2.4.4	Polymerisationen im kontinuierlich angeregten Hoch- frequenzplasma	360
2.4.5	Mechanismus der Fragmentierungs- und Rekombinations- polymerisation	363
2.4.6	Aufbaureaktionen im kontinuierlich angeregten Hochfrequenzplasma	365
2.4.7	Einflüsse auf die Polymerisation in der Gasphase oder Adsorptionsschicht	367
2.4.8	Zusammenhang von Leistungseintrag und Schichteigenschaften	369
2.4.9	Kinetische Modelle des Schichtwachstums	370
2.4.9.1	Polymerisationsmechanismen	370
2.4.9.2	Ionische Mechanismen	371
2.4.9.3	Radikalische Mechanismen	374
2.4.9.4	Bewertung des Stands der kinetischen Modellierung von Plasmapolymerisationsprozessen	378
2.4.10	Polymerpulverbildung in der Gasphase	379
2.4.11	Plasmakatalyse	380
2.4.12	Pfropfpolymerisation	381
2.4.13	Pfropfungen an funktionellen Gruppen	384
2.4.14	Parameterabhängigkeiten der Plasmapolymerisation	385

2.4.15	Erzwungene Copolymerisation im Plasmazustand.....	387
2.4.16	Polymerisation im gepulsten Plasma	388
2.4.17	Unterschiede zwischen klassisch-chemischer und plasmachemischer Polymerisation.....	395
2.4.18	Quasiwasserstoffplasma.....	396
2.4.19	Afterglowplasmen (Remote-, Downstreamplasmen).....	400
2.4.20	Strukturen der Plasmapolymere.....	402
2.4.21	Strukturen von Pulsplasmapolymere.....	404
2.4.22	Funktionalgruppen tragende Plasmapolymerschichten	416
2.4.23	Variation der Funktionalitätendichte durch plasma- initiierte Copolymerisation	424
2.4.24	Fluorhaltige Plasmapolymere	433
2.4.25	Radikalbildung und Postplasmaalterungsprozesse von Plasmapolymerschichten	435
2.4.26	Erhöhung der Alterungs- und Lösungsmittelbeständigkeit	441
2.4.27	Polymerisation und Polymeroberflächenmodifizierung mittels Plasmen in flüssiger Phase	443
2.4.28	Makromolekülplasmen (Elektrospray)	449
2.5	Ätzen mittels Plasmen.....	451
2.5.1	Grundlagen	451
2.5.1.1	Elementare Vorgänge beim Plasmaätzen	451
2.5.1.2	Ätzparameter.....	467
2.5.1.3	Ionenenergie an der Substratoberfläche	471
2.5.1.4	Steuerung von Ätzprozessen.....	477
2.5.2	Anlagentechnik.....	483
2.5.2.1	Überblick	483
2.5.2.2	Kapazitiv gekoppeltes Plasma	484
2.5.2.3	Induktiv gekoppelte Entladung	490
2.5.2.4	Prozesskammern mit Mikrowellenplasmaquellen	495
2.5.2.5	Höchstfrequenzplasmaanregung.....	497
2.5.2.6	Ionenstrahlanlagen.....	498
2.5.2.7	Anlagenkomponenten und Steuerung von Plasmaätzen.....	500
2.5.3	Plasmaätzprozesse und ausgewählte Anwendungen.....	507
2.5.3.1	Übersicht.....	507
2.5.3.2	Ätzen von Silizium, SiGe und SiC.....	508

2.5.3.3	Ätzen von Dielektrika und Ferroelektrika	516
2.5.3.4	Ätzen von Metallen und magnetischen Materialien	522
2.5.3.5	Ätzen von Verbindungshalbleitern.....	525
2.5.4	Schlussbemerkungen	536
2.6	Modifizieren und Beschichten von Polymeroberflächen.....	537
2.6.1	Oberflächenfunktionalisierung von Polymeren	537
2.6.1.1	Die Besonderheiten des Werkstoffs Polymer	537
2.6.1.2	Prozesse mit Polymeren bei Plasmaexposition	541
2.6.1.3	Einfluss der Polymerart.....	544
2.6.1.4	Vorgehensweise, Systematik und Begriffserklärungen.....	545
2.6.1.5	Oberflächenfunktionalisierung	549
2.6.1.6	Varianten der Polymeroberflächenmodifizierung mit ausschließlich einer Sorte funktioneller Gruppen	550
2.6.1.7	Kinetik der Oberflächenfunktionalisierung im Niederdruckplasma.....	551
2.6.1.8	Schnellalterung von Polymeren durch Plasmabehandlung..	585
2.6.1.9	Spezielle Oberflächenfunktionalisierungen	586
2.6.1.10	Selektive Plasmaprozesse	591
2.6.1.11	Chemische Nachfolgeprozesse	593
2.6.1.12	Schutz plasmaerzeugter funktioneller Gruppen bei der Synthese.....	598
2.6.1.13	Pfropfung an Radikalstellen.....	598
2.6.1.14	Plasmafreistrahler, Korona- und atmosphärische Plasmen....	599
2.6.2	Vakuumtechnische Metallisierung von Kunststoffen	601
2.6.2.1	Gründe für Kunststoffbeschichtungen	601
2.6.2.2	Eignung von Kunststoffen für vakuum- technische Beschichtungen.....	604
2.6.2.3	Haftfestigkeit und Haftmechanismen	607
2.6.2.4	Beschaffenheit technischer Kunststoffoberflächen.....	611
2.6.2.5	Reinigung von Teileoberflächen.....	613
2.6.2.6	Thermische Belastung beim Beschichten.....	615
2.6.2.7	Beschichtung vormetallisierter Kunststoffe.....	616
2.6.2.8	Direktbeschichtung von Kunststoffen.....	622
2.6.3	Barrierschichten auf Kunststoffen	625
2.6.3.1	Einsatzgebiete und Anwendungsformen von Barriere- materialien auf Kunststoffbasis.....	625
2.6.3.2	Permeation durch Kunststoffträger und dünne Schichten....	630

2.6.3.3	Experimentelle Überprüfung und Grenzen des dargestellten Defektmodells	640
2.6.3.4	Stofftransport durch polymere Träger mit einer anorganischen Barrierschicht und weiteren darauf aufgetragenen polymeren Schichten.....	649
2.6.3.5	Stofftransport durch dünne polymere Schichten, die beidseitig von organischen Schichten eingeschlossen sind.....	652
2.6.3.6	Zerlegung von Mehrschichtsystemen in Struktur- elemente.....	655
2.6.3.7	Schlussfolgerungen.....	656

Die Literatur und das Stichwortverzeichnis befinden sich am Ende von Teil II.

Inhaltsverzeichnis von Teil II (verkürzt)

3	Anwendungen.....	671
3.1	Optische Schichten.....	671
3.2	Architekturglasbeschichtung.....	720
3.3	Wärmedämmverglasungen im Automobilbau.....	737
3.4	Großflächige industrielle Mikrowellenplasmabeschichtung für die Fotovoltaik	748
3.5	Thermische Sonnenkollektoren.....	769
3.6	Fotokatalytische Schichten.....	786
3.7	Schichtsysteme für die Datenspeicherung und ihre industrielle Herstellung..	799
3.8	Flachbildschirme und Displays	853
3.9	Reibungs- und verschleißmindernde Schichten	901
3.10	Plasmagestützte Diffusionsverfahren zur Randschichtbehandlung von Metallen.....	982
3.11	Beschichtung von Getränkeflaschen aus Kunststoff	1008
3.12	Dekorative vakuumtechnische Beschichtung.....	1023
3.13	Herstellung von Bauteilen für die Mikrofluidik	1043
3.14	Niederdruckplasmaprozesse in der Aufbau- und Verbindungstechnik.....	1069
3.15	Feinreinigung von Oberflächen mit Niederdruckplasmen	1085
3.16	Plasmaprozesse zur Beeinflussung der Biokompatibilität von Oberflächen ..	1106
3.17	Antimikrobielle Oberflächen durch Plasmabehandlung	1124
3.18	Plasmabehandlung von Textilien und Fasern	1137
3.19	Beschichtung und Funktionalisierung von Pulvern	1152
3.20	Beschichtungen zur Sicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit elektronischer Geräte	1158
4	Technologien und Nachhaltigkeit	1183
4.1	Nachhaltigkeit als gesellschaftliche Notwendigkeit.....	1183
4.2	Nachhaltigkeitskriterien und -management	1184
4.3	Nachhaltigkeitsaspekte bei vakuum- und plasma- relevanten Produktionsprozessen	1186

4.4	Nachhaltigkeitsmanagement für die Vakuum- und Plasmatechnologie	1189
4.5	Nachhaltigkeitsbetrachtung zu vakuum- und plasma- technologisch hergestellten Produkten.....	1190
Literatur		1200
Stichwortverzeichnis		1291
Anzeigenteil		1304