

1	Einsatzgebiete schneller, höchstintegrierter Halbleiterbauelemente	1
1.1	Grenzen der Präzision in Prozessketten	2
	Literatur	8
2	Prozessierung von Chips, Basis der Digitalisierung	11
3	Chipfertigungsverfahren	17
4	Siliziumwafer – Basis der Chips	19
4.1	Siliziumeinkristallherstellung	19
4.1.1	Fertigungsaspekte	23
4.1.2	Defekte in Siliziumeinkristallen	26
4.2	Sägeverfahren	34
4.3	Läppen	37
4.4	Polieren	38
4.5	Reinigen	38
4.6	Planarisierung	38
4.6.1	Plasmaplanifizieren	39
4.6.1.1	Plasma, Grundbegriffe	39
4.6.1.2	Das Plasma als Kontinuum	46
4.6.1.3	Ionisation und Rekombination	53
4.6.1.4	Entladungsarten	60
4.6.1.5	Ionenstrahlplanarisierungssystem	73
4.6.1.6	Anlage zur Ionenstrahlplanarisierung	79
4.7	Messung der Rauheit durch Elektronenstrahlinterferenzen	79
4.8	Wafermarkierung und Vereinzelung	80
4.8.1	Ausbeute an Chips	81
4.8.2	Maximale Ausbeute	82

4.9	Epitaxie.	83
4.9.1	Grundlagen.	83
4.9.1.1	Beweglichkeit der Ladungsträger	85
4.9.1.2	Schichtbildung	86
4.9.1.3	Benetzung	90
4.9.1.4	Grenzfläche zwischen Substrat und epitaktischer Schicht.	92
4.9.2	Epitaxieverfahren	93
4.9.2.1	Flüssigphasenepitaxie	93
4.9.2.2	Gasphasenepitaxie.	98
4.9.2.3	Molekularstrahlepitaxie	103
4.9.2.4	Ionenstrahlepitaxie	105
	Literatur.	109
5	Beschichtungsmethoden	113
5.1	Einleitung	113
5.1.1	Entstehung aus dem Substrat (Siliziumwafer).	114
5.1.1.1	Thermisch (Oxidation SiO_2).	114
5.2	Entstehung aus einem Medium	126
5.2.1	Entfernung von wachstumshindernden	130
5.2.2	Gängige Verfahren zur chemischen Gasphasenabscheidung	137
5.2.2.1	Siliziumepitaxie	137
5.2.2.2	CVD von dielektrischen Schichten.	139
5.2.2.3	CVD von metallischen Schichten.	141
5.2.2.4	Selektive CVD	144
5.2.2.5	CVD-Abscheidemodi	145
5.2.2.6	Art des Arbeitsdruckes und der Ausgangsstoffe bei CVD-Prozessen.	150
5.2.2.7	CVD-Reaktortypen.	152
5.2.3	Atomlagenabscheidung – Atomic Layer Deposition (ALD).	157
5.2.4	Physical Vapor Deposition (PVD)	177
5.2.4.1	Aufdampfen	178
5.2.4.2	Kathodenzerstäubung (Sputtering).	178
5.2.4.3	Plating („Ion-, Electroplating“).	192
5.2.4.4	Hochtemperaturprozesse – Tempern („anneal“).	214
5.3	Vakuumerzeugung für Abscheideverfahren	225
5.3.1	Vakuum – Definitionen	225
5.3.2	Vakuum – Mittel zur Erzeugung	226
5.3.2.1	Saugleistung Q, Saugvermögen S.	227

5.3.3	Drehschiebervakuumpumpen	231
5.3.4	Scrollpumpen	232
5.3.5	Wälzkolbenpumpen	233
5.3.6	Turbomolekularpumpe/Turbopumpe	234
5.3.7	Getterpumpe/Ionengetterpumpe	234
5.3.8	Kryopumpen	235
5.3.8.1	Enddruck von Kryokondensationspumpen	238
5.3.8.2	Enddruck von Kryosorptionspumpen	239
5.3.8.3	Ausführung von Kryopumpen	241
5.3.8.4	Bad-Kryopumpen	241
5.3.8.5	Einsatz von Kryopumpen bei der Chipfertigung	250
5.4	Vakuum – Messmittel	251
5.4.1	Rohrfedermanometer	253
5.4.2	Membranvakuummeter, Baratron	253
5.4.3	Wärmeleitungsvakuummeter	254
5.4.4	Ionisationsvakuummeter	255
5.4.5	Kombinationsvakuummeter und Controller	256
5.5	Druckregelungssysteme	258
5.6	Vakuumlecks und Lecksuche	261
5.7	Vakuum – Risikobeherrschung und Umweltschutz	264
	Literatur	266
6	Strukturierungsmethoden	271
6.1	Einleitung	271
6.1.1	Belichtungstechniken	278
6.1.2	Bemerkungen zur Lithografie	281
6.2	EUV-Lithografie	283
6.2.1	Einleitung	283
6.2.2	Strahlungsquelle	284
6.2.2.1	Laser-Tropfen-Wechselwirkung	285
6.2.2.2	Abschirmung	287
6.2.2.3	Expansion des Plasmas	288
6.2.2.4	Intensive, ultrakurze Laserpulse	294
6.2.3	Pulsformung	297
6.2.4	Femtosekundenlasersystem	300
6.2.5	Erzeugung mikrometergroßer, flüssiger Edelgastropfen	301
6.2.6	EUV-Anlagen	302
6.2.6.1	EUV-Masken	305
6.2.6.2	EUV-Fotolack	305

6.3	Röntgenstrahlolithografie	306
6.3.1	Röntgenquellen	309
6.3.1.1	Hochleistungsrontgenquellen	309
6.3.1.2	Belichtungsanordnung für Röntgenstrahlolithografie	332
6.4	Elektronenstrahlolithografie	337
6.4.1	Projektionssysteme mittels Masken	338
6.4.2	Scan- und Rasterelektronenstrahlolithographiesysteme	340
6.4.2.1	Strahlgröße und -form	344
6.4.2.2	Strukturzeugung	346
6.4.2.3	Schreibzeit	346
6.4.2.4	Defekte	348
6.4.2.5	Entwicklungen	348
6.5	Ionenstrahlolithografie	349
6.5.1	Einleitung	349
6.5.2	Projektionssysteme	350
6.5.3	Fokussierung von Ionenstrahlen	351
6.5.3.1	Ionenquellen	353
6.6	Atomstrahlolithografie	363
6.6.1	Prinzip der Atomstrahlolithografie	363
6.6.2	Lichtkräfte und Lichtmasken	364
6.6.2.1	Einführung	364
6.6.2.2	Lichtkräfte: Spontan- und Dipolkraft	366
6.6.3	Experimenteller Aufbau	371
6.6.4	Entwicklungstendenzen	373
6.7	Nanoimprint-Lithografie (NIL)	375
6.7.1	Übersicht	375
6.7.2	Entwicklungsstand	376
6.8	Stepper-Systeme	380
6.8.1	„Step-and-Repeat“-Methode	380
6.8.2	„Step-and-Scan“-Methode	381
6.9	Fotolacke	382
6.9.1	Einleitung	382
6.9.2	Charakterisierung des Fotolacks	386
6.9.2.1	Fotolackentwicklung	394
6.9.3	Lacke zur Belichtung mit Röntgenstrahlen	395
6.9.4	Lacke für die Belichtung mit Elektronen	395
6.9.4.1	Positive Lacke	395
6.9.4.2	Negative Lacke	397
6.9.5	Lacke für die Belichtung mit Ionen	399

6.10	Fotolackentfernung.	400
6.10.1	Plasmaveraschung	400
6.10.2	Perspektiven	400
	Literatur	401
7	Ätzverfahren (Etching)	407
7.1	Einleitung	407
7.2	Trockene Ätzverfahren	410
7.2.1	Physikalisches Ätzen	411
7.2.2	Chemisches Ätzen	412
7.2.3	Chemisch-physikalisches Ätzen.	414
7.2.3.1	Elektrisch (RF) unterstütztes reaktives Ionenätzen (RIE)	415
7.2.3.2	Magnetisch unterstütztes Trockenätzen (MERIE)	417
7.2.4	Ionenstrahlätzen	419
7.2.5	Umweltaspekte	420
	Literatur	421
8	Dotierungsmethoden	423
8.1	Diffusion	423
8.1.1	Diffusion durch Feldverstärkung	426
8.1.2	Verstärkung der Diffusion durch Ionisation	427
8.1.3	Steigerung der Diffusion durch Energiefreisetzung	427
8.2	Ionenimplantation	428
8.2.1	Elementarprozesse der Ionen-Festkörper-Wechselwirkung	431
8.2.1.1	Energieverlust	433
8.2.1.2	Reichweite	435
8.2.1.3	Boltzmann-Transportgleichung	437
8.2.1.4	Monte-Carlo-Berechnungsmethode	438
8.2.1.5	Stoßkaskaden und Strahlenschäden	448
8.2.1.6	Implantation mittels Rückstoßatomen	451
8.2.2	Neutronen-Transmutationsdotierung (NTD)	453
8.2.3	Inverse Ionenimplantation	456
8.2.4	Amorphisierung und Rekristallisation	457
8.2.4.1	Grundlagen	457
8.2.4.2	Schäden durch Implantation mit hohen Dosen	458

8.3	Implantationssysteme	462
8.3.1	Anforderungen an den Ionenstrahl	462
8.3.1.1	Heißkathodenquellen	463
8.3.2	Ionenimplantationsanlagen	467
8.3.2.1	Waferkühlung	471
	Literatur	472
9	Mess- und Analysemethoden	475
9.1	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	475
9.1.1	Grundlagen	475
9.1.2	Phasenkontrast-Transferfunktion (CTF)	478
9.2	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	479
9.2.1	Grundlagen	479
9.2.2	Signalarten	480
9.3	Vergleich TEM/REM	482
9.4	Rastertunnelmikroskopie	482
9.5	Kraftmikroskopie	489
9.5.1	Rasterkraftmikroskop	489
9.5.1.1	Rasterkraftmikroskopie	489
9.5.1.2	Messprinzip	490
9.5.2	Magnetkraftmikroskop	492
9.6	Spektroskopiemethoden	494
9.6.1	Einleitung	494
9.6.2	Elektronenspektroskopische Methoden	496
9.6.2.1	Auger-Elektronenspektroskopie (AES)	496
9.6.2.2	Fotoelektronenspektroskopie (PES)	499
9.6.2.3	Inverse Fotoemission (IPE)	502
9.6.2.4	Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS)	504
9.6.2.5	Austrittsarbeitsänderung ($\Delta\phi$)	505
9.6.2.6	Beugung langsamer und schneller Elektronen	506
9.6.3	Ionenspektroskopien	509
9.6.3.1	Ionenrückstreuung	509
9.6.3.2	Neutralteilchen-Massenspektrometrie	515
9.6.4	„Particle-induced X-ray emission“ (PIXE)	518
9.6.5	Laser-Mikrosonden-Massenanalyse (LAMMA)	519
	Literatur	521
10	Design von Halbleiterfertigungsanlagen	523
10.1	Einleitung	523
10.1.1	SMIF-Box-System	523
10.1.2	Kombination Cluster- mit Durchlaufanlagen	524

10.1.3	Großflächige Schieber (Ventile)	526
10.1.4	Konzeption von Partikelfallen, z. B. LN_2 -gekühlte Flächen bzw. „baffles“	528
10.1.4.1	Additionstheorem der reziproken Leitwerte	530
10.2	Sensoren	530
10.2.1	Einleitung	530
10.2.2	Positionssensoren und -aktoren für den Nanometerbereich	530
10.2.3	Strahlungssensoren	536
10.2.3.1	Grundlagen	536
10.2.3.2	Thermische Detektoren zur berührungslosen Temperaturmessung	538
10.2.4	Durchflusssensoren	540
10.2.5	Chemische Sensoren	542
10.3	Fertigung von Vakuumrezipienten für die Halbleiterfertigung	543
10.3.1	Permeation	543
10.3.2	Polieren der Rezipientenwände und Anschlussoberflächen	544
10.4	Molekularströmungen in Rezipienten	548
10.4.1	Berechnung der Teilchenstromdichten I und E und der Teilchenanzahldichte n	548
	Literatur	551
11	Ökologie in der Halbleiterfertigung	553
	Literatur	566