

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Oberflächenmodifikation – ein Überblick | 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 |
| 2 | Modifizierung von Oberflächen durch Laserstrahl-Verfahren | 17 |
| 2.1 | Überblick | 17 |
| 2.2 | Laser für die Materialbearbeitung | 18 |
| 2.2.1 | Festkörperlaser | 19 |
| 2.2.2 | CO ₂ -Molekülgas-Laser | 20 |
| 2.2.3 | Excimer-Laser | 22 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.4 | Güteschaltete (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 | Ableichen elektronischer Bauelemente: Trimmen | 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 μm -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 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Modifizierung von Oberflächen durch Ionenstrahl-Verfahren | 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 | Vergrabene 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 | Hochtemperaturoxidation | 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 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Modifizierung von Oberflächen durch Elektronenstrahl-Verfahren | 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 | Elektronenstrahlhärten von Beschichtungen auf starren, ebenen Substraten | 133 |
| 4.6.3 | Elektronenstrahlhärten von Beschichtungen auf Formteilen | 133 |
| 4.6.4 | Elektronenstrahlhärten 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 | Strahlhärtung von Beschichtungen mit ultraviolettem Licht | 137 |
| 5 | Modifizierung von Oberflächen durch Plasma-Verfahren | 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 |
| 6 | Diamantschichten-Herstellung als Anwendung der Plasma- und der Ionenstrahltechnik | 158 |
| 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 |
| 7 | Mikrotechnologien als Anwendung von Methoden der Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie | 168 |
| 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 ₂ -Schichten | 178 |
| 7.4.3 | Durch CVD abgeschiedene SiO ₂ -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 | Ionenstrahlätzen (IBE) und reaktives Ionenstrahlätzen (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 |
| 8 | Anhang: Die konventionellen Verfahren des Randschichthärtens von Metallen | 239 |
| 8.1 | Mechanische Verfahren | 239 |
| 8.2 | Thermische Verfahren zum Randschichthärten | 239 |
| 8.2.1 | Transformationshärtens von Oberflächen | 240 |
| 8.2.2 | Leistungsdichte und Einhärtetiefe | 242 |
| 8.2.3 | Induktionshärtens | 243 |
| 8.2.4 | Flammhärtens | 244 |
| 8.2.5 | Hochfrequenz-Impulshärtens | 244 |
| 8.2.6 | Vergleich mit dem Elektronen- und dem Laserstrahl-Härtens | 244 |
| 8.3 | Thermochemische Diffusionsverfahren | 245 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 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 |
| | Literatur | 259 |
| | Sachverzeichnis | 283 |