

L. Reimer G. Pfefferkorn ✓

Raster- Elektronenmikroskopie

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 146 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1977

Inhalt

1. Einleitung

1.1. Prinzipielle Wirkungsweise und Betriebsarten eines Raster-Elektronenmikroskopes (SEM)	1
1.2. Vergleich des Raster-Elektronenmikroskopes mit dem Lichtmikroskop und Transmissions-Elektronenmikroskop	3
1.3. Vergleich des Raster-Elektronenmikroskopes mit anderen Elektronenstrahlgeräten	9
Literatur zu § 1	14
Monographien, Tagungsbände und Bibliographien	14

2. Wechselwirkung Elektron-Materie

2.1. Einleitung	16
2.2. Elektronenstreuung am Einzelatom	17
2.2.1. Elastische Streuung	17
2.2.2. Unelastische Streuung	18
2.3. Streuung in einer durchstrahlbaren Schicht	21
2.3.1. Winkelverteilung gestreuter Elektronen	21
2.3.2. Transmission als Funktion der Beobachtungsapertur	23
2.3.3. Ortsverteilung gestreuter Elektronen	24
2.3.4. Energieverteilung gestreuter Elektronen	25
2.4. Elektronendiffusion in kompaktem Material	28
2.4.1. Transmission und Reichweite	28
2.4.2. Ausdehnung der Diffusionswolke	31
2.4.3. Ionisationsdichte und Tiefendosiskurve	33
2.5. Rückstreuung und Sekundärelektronen-Emission	34
2.5.1. Definition und Messung dieser Größen	34
2.5.2. Rückstreuoeffizient einer dünnen Schicht, Austrittstiefe	36
2.5.3. Rückstreuoeffizient von kompaktem Material	37
2.5.4. Richtungs- und Energieverteilung rückgestreuter Elektronen	40
2.5.5. Ausbeute, Energie und Austrittstiefe der Sekundärelektronen	41
2.5.6. Beitrag der rückgestreuten Elektronen zur Sekundärelektronenausbeute	45
2.5.7. Rauschen der Sekundärelektronenemission	45

2.6. Ausbreitung der Elektronen in Kristallen	47
2.6.1. Das Elektronenwellenfeld in einem Kristall	47
2.6.2. Beugung in Transmission	51
2.6.3. Einfluß der Beugung auf die Rückstreuung	54
Literatur zu § 2	56

3. Elektronenoptik, Aufbau und Funktion des Raster-Elektronenmikroskopes

3.1. Elektronenoptische Grundlagen	60
3.1.1. Elektronenstrahlerzeugung	60
3.1.2. Elektronenlinsen	63
3.1.3. Linsenfehler	64
3.1.4. Kleinsten Durchmesser der Elektronensonde	67
3.1.5. Optimale Elektronenenergie	69
3.2. Abrasterung und Fokussierung	70
3.2.1. Erzeugung des Rasters	70
3.2.2. Schärfentiefe	72
3.2.3. Fokussierung und Astigmatismuskorrektur	74
3.3. Objektveränderungen durch Elektronenbeschuß	76
3.3.1. Kontamination	76
3.3.2. Objekterwärmung	78
3.3.3. Strahlenschäden	79
3.3.4. Aufladungserscheinungen	79
3.3.5. Beeinflussung integrierter Schaltungen durch den Elektronenstrahl	83
3.4. Objektkammer und Detektoren	84
3.4.1. Objekthalterung und -manipulation	84
3.4.2. Direkte Elektronenstrommessung	86
3.4.3. Szintillator-Photomultiplier-Kombination	86
3.4.4. Kanal-Sekundärelektronenvervielfacher	89
3.4.5. Halbleiter-Detektoren	90
3.4.6. Einfluß der Proben-Detektor-Geometrie	91
3.5. Elektronik und Bildaufzeichnung	95
3.5.1. Elektronische Signalverarbeitung	95
3.5.2. Einfluß der Zeilenstruktur auf das Bild	101
3.5.3. Aufzeichnung dynamischer Vorgänge	103
3.6. Spezielle Techniken der Raster-Elektronenmikroskopie	104
3.6.1. Spiegel-Raster-Elektronenmikroskopie	104
3.6.2. Mikrominiaturisierung mit einem Raster-Elektronenmikroskop	105
Literatur zu § 3	106

4. Abbildung mit Sekundär-, Rückstreuelektronen und Probenströmen

4.1. Oberflächentopographie	109
4.1.1. Kontrast durch Flächenneigung (Reliefkontrast)	109

4.1.2. Kontrast durch Abschattung	113
4.1.3. Kontrast durch erhöhte Emission an Kanten und durchstrahlbaren Objektstrukturen	115
4.2. Materialkontrast	118
4.2.1. Kontrast durch Variation des Rückstreukoeffizienten	118
4.2.2. Probenstrombild	122
4.3. Auflösungsgrenze und Informationstiefe	123
4.3.1. Auflösungsgrenze mit Sekundärelektronen	123
4.3.2. Abhängigkeit des Informationsvolumens von der Elektronenenergie	127
4.3.3. Verbesserung der Auflösung mit Rückstreuelektronen	129
4.4. Channelling-Diagramme und Kristallorientierungskontrast	130
4.4.1. Erzeugung der Channelling-Diagramme	130
4.4.2. Geometrie und Intensität der Channelling-Diagramme	134
4.4.3. Anwendung von Channelling-Diagrammen	136
4.4.4. Kristallorientierungskontrast	140
4.5. Abbildung und Messung elektrischer Potentiale	142
4.5.1. Entstehung des Potentialkontrastes im Sekundärelektronenbild	142
4.5.2. Quantitative Potentialmessung	144
4.5.3. Potentialkontrast integrierter Halbleiterschaltungen	146
4.5.4. Stroboskopische Methoden	149
4.5.5. Potentialkontrast von piezoelektrischen und ferroelektrischen Kristallen	150
4.6. Abbildung und Messung magnetischer Objektfelder	151
4.6.1. Beeinflussung der Sekundärelektronen durch magnetische Streufelder (magnetischer Kontrast Typ I)	151
4.6.2. Beeinflussung der Rückstreuelektronen durch interne Magnetfelder (magnetischer Kontrast Typ II)	153
4.6.3. Ablenkung der Primärelektronen in magnetischen Feldern	154
4.7. Abbildung mit internen Probenströmen und elektromotorischen Kräften	155
4.7.1. Erzeugung und Trennung von Ladungsträgern in Halbleitern	155
4.7.2. Abbildung von pn-Übergängen	157
4.7.3. Abbildung von Kristallbaufehlern	161
4.7.4. Messung von Halbleiterkonstanten	161
4.7.5. Abbildung von Widerstandsinhomogenitäten	163
Literatur zu § 4	164

5. Raster-Transmissions-Elektronenmikroskopie

5.1. Spezielle Eigenschaften der Rastertransmission	168
5.1.1. Das Reziprozitätsprinzip	168
5.1.2. Vorteile des Rasterprinzips in der Transmission	170
5.2. Realisierung des Transmissionsbetriebes	172
5.2.1. Transmission in einem Raster-Elektronenmikroskop	172
5.2.2. Rasterzusatz in einem Transmissions-Elektronenmikroskop	174

5.2.3. Das Raster-Transmissions-Elektronenmikroskop nach <i>Crewe</i> . . .	175
5.2.4. Raster-Elektronenmikroskopie mit hohen Spannungen	178
5.3. Anwendung der Raster-Transmissions-Elektronenmikroskopie . . .	179
5.3.1. Durchstrahlung dicker Objektschichten	179
5.3.2. Elektronenbeugung im Raster-Transmissionsbetrieb	181
5.3.3. Abbildung kristalliner Objekte	182
Literatur zu § 5	184

6. Elementanalyse und Abbildung mit emittierten Quanten und Augerelektronen

6.1. Grundlagen der Röntgenemission	186
6.1.1. Die Röntgenbremsstrahlung	186
6.1.2. Das Linienspektrum	187
6.1.3. Absorption der Röntgenstrahlung	191
6.2. Wellenlängen- und energiedispersive Röntgenanalyse	192
6.2.1. Wellenlängendispersive Methode mit Kristallmonochromator . . .	192
6.2.2. Proportionalzählrohr für wellenlängen- und energiedispersive Analyse	193
6.2.3. Si(Li)-Detektor für energiedispersive Analyse	194
6.2.4. Vor- und Nachteile der wellenlängen- und energiedispersiven Methoden für die Raster-Elektronenmikroskopie	198
6.3. Grundlagen der Röntgenmikroanalyse	199
6.3.1. Auflösung und Tiefeninformation	199
6.3.2. Methoden der quantitativen Röntgenmikroanalyse	201
6.3.3. Begrenzung der Analyse durch die Zählstatistik	204
6.4. Ausnutzung der Beugung und Absorption der Röntgenstrahlung . . .	206
6.4.1. Kossel-Diagramme	206
6.4.2. Röntgenprojektionsmikroskopie	207
6.5. Andere Verfahren der Elementanalyse	208
6.5.1. Röntgenfluoreszenzanalyse im Rastermikroskop	208
6.5.2. Augerelektronen- (AES) und Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS)	209
6.5.3. Energieverlustspektroskopie mit transmittierten Elektronen . .	211
6.6. Kathodolumineszenz	212
6.6.1. Entstehung der Kathodolumineszenz	212
6.6.2. Apparative Grundlagen der Kathodolumineszenz	214
6.6.3. Kathodolumineszenz von anorganischen Objekten und Halbleitern	217
6.6.4. Kathodolumineszenz organischer und biologischer Objekte . .	218
Literatur zu § 6	219

7. Auswertemethoden rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen

7.1. Ermittlung der dreidimensionalen Struktur	223
7.1.1. Übersicht der Stereomethoden	223

7.1.2. Messung der Parameter und experimentelle Grenzen in Stereo-Bildpaaren	225
7.1.3. Visuelle Betrachtung von Stereo-Bildpaaren	229
7.2. Stereometrie	229
7.3. Optische Transformationen	234
Literatur zu § 7	236

8. Präparation

8.1. Einleitung	237
8.2. Präparatmontage und Oberflächenvorbereitung	237
8.2.1. Präparatmontage	237
8.2.2. Oberflächenvorbereitung	238
8.3. Stabilisierung der Objekte	239
8.3.1. Übersicht der Methoden	239
8.3.2. Fixierung	243
8.3.3. Entwässerung und Lufttrocknung	245
8.3.4. Kritische-Punkt-Trocknung (CPD)	245
8.3.5. Gefrierschock und Gefriertrocknung	250
8.3.6. Kühltischmethode	252
8.4. Kleine Teilchen und durchstrahlbare Präparate	253
8.5. Abdruckverfahren	255
8.5.1. Oberflächenabdrücke	255
8.5.2. Injektionsabdrücke	256
8.6. Vermeidung von Aufladungen	257
8.6.1. Hochvakuumbedampfung	257
8.6.2. Kathodenzerstäubung	259
8.6.3. Antistatika	260
8.6.4. Behandlung mit OsO ₄	260
8.7. Erweiterung der Bildinformation	261
8.7.1. Schrägbedampfung	261
8.7.2. Chemische Kontrastierung und histochemische Methoden	263
8.7.3. Trocken- und Gefrierbruch biologischer Objekte	265
8.7.4. Chemische Ätzung	265
8.7.5. Ionenätzung	266
8.7.6. Mechanische Deformation und Fraktographie	268
8.7.7. Präparate mit ebener Untersuchungsfläche	269
Literatur zu § 8	271

Sachverzeichnis	275
---------------------------	-----