

OBSAH

Předmluva	5
1 Popis mikroskopu	13
1.1 Transmisní elektronový mikroskop	13
1.2 Rastrovací transmisní elektronový mikroskop	14
1.3 Vakuový systém	15
1.3.1 Rotační vývěvy	16
1.3.2 Difúzní vývěva	17
1.3.3 Iontová vývěva	18
1.3.4 Další typy vývěv	19
1.4 Elektronové trysky	19
1.4.1 Termoemisní elektronové trysky	19
1.4.2 Autoemisní elektronové trysky	21
1.4.3 Porovnání různých elektronových trysek	22
1.5 Magnetické čočky a jejich zobrazovací vady	24
1.5.1 Sférická vada	26
1.5.2 Chromatická vada	27
1.5.3 Osový astigmatismus	28
1.5.4 Koma (asymetrická vada)	30
1.5.5 Objektiv	31
1.5.6 Hloubka zorného pole a hloubka ostrosti	33
1.6 Clony	34
1.6.1 Clona kondenzoru	34
1.6.2 Clona objektivu	34
1.6.3 Selekční clona	34
1.7 Zobrazení a detekce elektronů	36
1.7.1 CCD kamera	36
1.7.2 Digitální desky	36
1.7.3 Fotografické negativy	37
1.7.4 TV kamery	37
1.7.5 Další detektory elektronů	38
2 Základy krystalografie	39
2.1 Základní vektory a elementární buňka krystalu	39
2.2 Krystalové roviny a Millerovy indexy	42
2.2.1 Krystalové zóny	42
2.2.2 Indexování rovin a směrů v hexagonální mřížce	43
2.3 Reciproká mřížka	44
2.3.1 Určení mezirovinných vzdáleností	45
2.4 Symetrie krystalů	45
2.4.1 Symetrie báze – bodové grupy	46

2.4.2	Laueho grupy difrakční symetrie	48
2.4.3	Prostorové grupy	48
2.4.4	Ekvivalentní polohy – Wyckoffovy symboly	48
2.4.5	Pětičetná osa symetrie – kvazikrystaly	49
2.5	Stereografická projekce	50
3	Matematické formulace a nástroje	55
3.1	Rovinná a kulová vlna	55
3.1.1	Rovinná vlna	55
3.1.2	Prostorová frekvence	57
3.1.3	Kulová vlna	57
3.2	Diracova funkce δ	58
3.3	Fourierova transformace	58
3.4	Impulsová odezva	59
3.5	Konvoluce	59
3.6	Přenosová funkce	64
3.7	Numerické výpočty Fourierovy transformace a konvoluce	64
3.8	Základy vlnové optiky – skalární teorie difrakce	65
3.8.1	Fresnelova aproximace	66
3.8.2	Fraunhoferova aproximace	67
4	Interakce elektronů se vzorkem	69
4.1	Vlnově částicový dualismus	70
4.1.1	Vlnová délka elektronů	71
4.1.2	Vlnové funkce	72
4.1.3	Interference vlny spojené s elektronem	72
4.2	Vlnový popis koherentního rozptylu	73
4.2.1	Atomový rozptylový faktor	73
4.2.2	Potenciál a hustota náboje	74
4.2.3	Porovnání atomových rozptylových faktorů různých typů záření	76
4.2.4	Krystalový potenciál	77
4.2.5	Vlnový vektor elektronů v krystalu – refrakce	78
4.3	Částicový popis rozptylu	80
4.3.1	Účinný průřez interakce	80
4.3.2	Střední volná dráha	81
4.3.3	Diferenciální účinný průřez	82
4.3.4	Diferenciální účinný průřez a atomový rozptylový faktor	82
5	Kinematická teorie difrakce	85
5.1	Laueho podmínky difrakce	85
5.2	Ewaldova konstrukce	87
5.3	Braggova rovnice	88
5.4	Amplituda vlny rozptýlené krystalem	89
5.5	Strukturní faktor elementární buňky	90
5.5.1	Výpočet strukturních faktorů nejdůležitějších mřížek	91
5.5.2	Extinkce spojené s translačními prvky symetrie	94
5.6	Tvarový faktor krystalu	95
5.6.1	Excitační chyba a strukturní faktor	98
5.6.2	Efekt tenké fólie – uvolnění difrakční podmínky	99
5.6.3	Difrakční stopy malých částic	100

5.7	Popis difrakce pomocí Fourierovy transformace a konvoluce	100
5.7.1	Ilustrace Fourierovy transformace na modelových obrazech	102
5.8	Platnost kinematické aproximace	106
5.9	Extinkční délka	107
5.10	Difrakce na porušeném krystalu – sloupcová aproximace	109
6	Základy dynamické teorie difrakce	113
6.1	Dvousvazková aproximace	113
6.1.1	Úprava dynamických rovnic ve dvousvazkové aproximaci	115
6.1.2	Řešení dynamických rovnic ve dvousvazkové aproximaci	116
6.1.3	Vyjádření hodnot $\gamma^{(j)}$, $C_0^{(j)}$ a $C_g^{(j)}$	117
6.1.4	Intenzita přímého a difraktovaného svazku v ideálním krystalu . . .	118
6.1.5	Efektivní excitační chyba	120
6.2	Vícesvazková aproximace – Blochovy vlny	121
6.2.1	Schrödingerova rovnice pro Blochovy vlny	122
6.2.2	Betheho korekce	125
6.2.3	Blochovy vlny a disperzní plocha	126
6.2.4	Vliv neelastického rozptylu – absorpce	127
6.2.5	Ohybové kontury	128
6.3	Metoda multivrstev	130
6.3.1	Aproximace dopředného rozptylu	130
6.3.2	Šíření elektronové vlny ve vakuu	131
6.3.3	Aproximace promítnutého potenciálu	132
6.3.4	Základní rovnice metody multivrstev	133
7	Rozložení intenzity v difrakčním obrazi	137
7.1	Vliv tepelných kmitů atomů	137
7.2	Kikuchiho linie	138
7.2.1	Difúzní rozptyl elektronů	139
7.2.2	Vícenásobný rozptyl v krystalu	140
7.2.3	Využití Kikuchiho linií	140
7.2.4	Kikuchiho linie a excitační chyba	142
7.2.5	Mapy Kikuchiho linií	144
8	Difrakční techniky	145
8.1	Konvenční difrakce se selekční clonou	145
8.2	Difrakce úzkým rovnoběžným svazkem	146
8.3	Délka kamery a difrakční konstanta mikroskopu	146
8.4	Rotace difrakce vůči obrazu	147
8.5	Indexování difrakčních stop polykrystalu	148
8.6	Indexování difrakčních stop monokrystalu	148
8.7	Dvojitá difrakce	150
8.8	Konvergentní difrakce (CBED)	151
8.8.1	Ewaldova konstrukce pro konvergentní difrakci	152
8.8.2	Použití konvergentní difrakce	154
8.9	Difrakce s rotujícím svazkem	160

9	Zobrazovací metody	163
9.1	Vznik obrazu v TEM	163
9.2	Definice kontrastu	163
9.3	Rozptylový kontrast	164
9.4	Difrakční kontrast	165
9.4.1	Zobrazení ve světlém a tmavém poli	166
9.4.2	Optimalizace kontrastu, nastavení excitačního vektoru s_g	167
9.4.3	Zobrazení ve slabém svazku	168
9.4.4	Artefakty v obraze – tloušťkové a deformační efekty	169
9.4.5	Volba reflexního vektoru a oblasti vzorku vhodné pro pozorování	170
9.4.6	Viditelnost krystalových poruch	171
9.4.7	Určování Burgersova vektoru dislokací	171
9.4.8	Hranice zrn a subzrn	174
9.4.9	Vrstevné chyby a antifázová rozhraní	174
9.4.10	Kontrast na částicích	176
9.5	Fázový kontrast – atomové rozlišení	178
9.5.1	Zobrazení ideální a reálnou čočkou	178
9.5.2	Přenosová funkce kontrastu	180
9.5.3	Interpretace interferenčního obrazu	182
9.5.4	Praktické aspekty techniky atomového rozlišení	186
9.5.5	Rozlišovací schopnost mikroskopu s korektorem C_s	189
9.6	Elektronová holografie	190
9.7	Lorentzovská elektronová mikroskopie	191
9.8	Atomové rozlišení metodou Z kontrastu	195
9.9	Pozorování <i>in situ</i>	196
9.9.1	Vliv vnějšího okolí vzorku (environmentální efekty)	198
9.10	Elektronová tomografie a 3D rekonstrukce	198
10	Analytická elektronová mikroskopie	201
10.1	Ionizace vnitřních elektronových hladin	201
10.2	Deexcitace atomů	201
10.3	Spektroskopie ztrát energie elektronů	201
10.3.1	Spektrometr	203
10.3.2	Spektrum EELS	203
10.3.3	Energiově filtrovaná mikroskopie	207
10.4	Energiově disperzní spektroskopie RTG záření	211
10.4.1	Spektrometr	211
10.4.2	Spektra	212
10.4.3	Časté artefakty při EDS analýze	213
10.4.4	Mapování výskytu jednotlivých prvků	213
11	Příprava vzorků z krystalických materiálů	215
11.1	Přípravné práce	215
11.1.1	Řezání plátek	215
11.1.2	Ztenčování plátek	217
11.1.3	Odběr terčků	218
11.1.4	Příprava příčných řezů	220
11.1.5	Příprava tenkých fólií v blízkosti povrchu vzorku	221
11.2	Finální ztenčování na tloušťku transparentní pro elektrony	222
11.2.1	Elektrolytické leštění	222

11.2.2	Chemické leštění	227
11.2.3	Iontové bombardování	227
11.2.4	Mechanické leštění do klínku	228
11.2.5	Štípání a drcení	230
11.2.6	Tenké řezy – ultramikrotomie	231
11.3	Otiskové metody	233
11.3.1	Přímé repliky	233
11.3.2	Nepřímé (dvoustupňové) repliky	234
11.3.3	Extrakční repliky	234
11.3.4	Stínování replik	235
12	Pozorování a analýza biologických preparátů	237
12.1	Problémy spojené s pozorováním biologických vzorků v TEM	237
12.1.1	Radiační poškození elektronovým paprskem	238
12.1.2	Slabý kontrast biologických struktur	239
12.2	Základní způsoby přípravy preparátů	239
12.2.1	Chemická fixace	240
12.2.2	Mrazová fixace	241
12.2.3	Odvodňování a zalévání do pryskyřice	242
12.2.4	Využití mikrovlnného záření	244
12.3	Kryo-mikroskopie	245
12.4	Ultrastrukturální tomografie	246
12.5	Detekce specifických molekul – imunoznačení	247
12.5.1	Imunoznačení u preparátů zalitých v pryskyřici	248
12.5.2	Metoda Tokuyasu	249
12.6	Speciální metody	249
12.6.1	Stínování těžkými kovy	249
12.6.2	Repliky	250
12.6.3	Elektronová mikroskopie molekul	251
12.7	Nízkovoltová TEM	252
A	Odvození kinematické amplitudy ze Schrödingerovy rovnice	255
B	Tabulky prostorových grup	261
C	Mapy Kikuchiho linií	263
D	Bodové difraktogramy	271
E	Počítačové simulace pomocí programu JEMS	281
F	Literatura pro další studium	289
G	Seznam zkratk a symbolů	291
	Literatura	297
	Rejstřík	313