

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Kubík
Elektronový mikroskop

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 5-6, 631--636

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137346>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP

Elektronový mikroskop je přístroj, který slouží k vytváření silně zvětšených obrazů malých předmětů. Konstrukčně je obdobou světelného mikroskopu, avšak na rozdíl od tohoto se v elektronovém mikroskopu používá místo světelných paprsků paprsků elektronových a místo skleněných čoček se používá čoček elektronových — elektrostatických nebo magnetických. Protože je možno konstruovat velmi krátkofokální elektronové čočky, lze elektronovým mikroskopem dosáhnout velkých zvětšení.

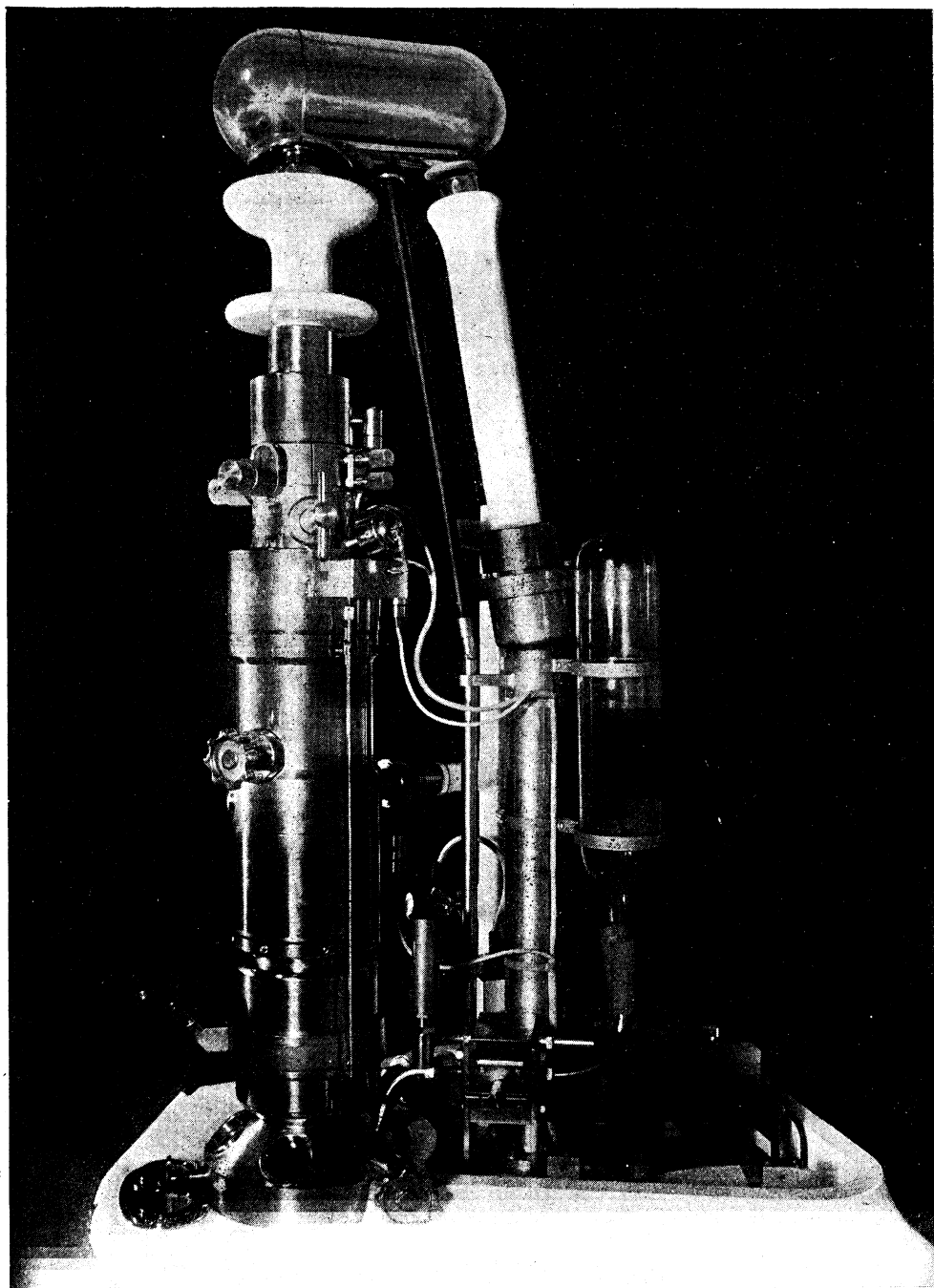
V čem spočívají výhody elektronového mikroskopu? Základní charakteristikou každého mikroskopu je jeho rozlišovací schopnost, to jest schopnost zobrazovat odděleně drobné detaily mikroskopických předmětů. Lidské oko vidí ve vzdálenosti asi 25 cm, což je tak zvaná konvenční zraková dálka, dva body předmětu odděleně, jsou-li od sebe vzdáleny nejméně 0,1 mm. Je-li vzdálenost menší, body splývají. Použijeme-li optického přístroje — na př. světelného mikroskopu — je možno vidět odděleně body, které jsou mnohem blíže u sebe. Rozlišovací schopnost světelného mikroskopu je omezena ohybem světla. Vlivem ohybu světla bude každý bod předmětu zobrazen čočkou jako rozptylový kroužek. Tyto kroužky se budou vzájemně překrývat. Podle překrytí těchto kroužků, to jest podle vzdálenosti pozorovaných bodů, je a nebo není možno vidět oba body odděleně.

Abbe odvodil výraz,¹⁾ kterým je udána nejmenší rozlišitelná vzdálenost. Vycházel při tom ze zákonů ohybu světla. Zjistil, že tato vzdálenost je přímo úměrná vlnové délce světla, které osvětluje pozorovaný předmět, a nepřímo úměrná číselné apertuře čočky. Číselnou aperturu čočky je možno zvětšit zvětšením jejího průměru a zvětšením relativního indexu lomu předmětového a obrazového prostoru. Bude tedy rozlišitelná vzdálenost tím menší, čím menší je vlnová délka světla a čím větší je číselná apertura čočky. Při maximální číselné apertuře je vzdálenost rovna přibližně $\frac{1}{3}$ vlnové délky světla, které předmět osvětluje $(d_0 \approx \frac{\lambda}{3})$.

Osvětíme-li předmět fialovým světlem, to jest viditelným světlem o nejkratší vlnové délce ($\lambda = 4500$ angströmů, 1 angström = $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ cm), je rozlišitelná vzdálenost 1500 Å. Pro bílé světlo je tato vzdálenost 2000 Å. Bude tedy stačit pětinašobné zvětšení, abychom mohli odděleně pozorovat body, vzdálené od sebe $2000 \text{ \AA} = 0,0002$ cm, neboť $500 \times 2000 \text{ \AA} = 10^{-2}$ cm = 0,1 mm, což je lidské oko schopno rozlišovat. Použitím ultrafialových paprsků, křemenné optiky a speciálních fotografických desek je možno zkonstruovat mikroskop, jehož rozlišovací schopnost bude 800 Å.

Mnoho mikroobjektů, které potřebujeme zkoumat, má však rozměry menší, než může světelný mikroskop rozlišit. Tyto předměty by bylo možno vidět, kdybychom místo světelných paprsků použili na př. paprsků roentgenových, které mají mnohem menší vlnovou délku. Neexistují však dosud čočky, které by umožnily fokusaci těchto paprsků. Je však možno fokusovat elektronové paprsky, které mají vlnovou délku 100000krát menší než paprsky světelné. Zvyšuje-li se rychlost elektronů, klesá vlnová délka elektronových paprsků. Pomocí Abbeho výrazu snadno odhadneme, že rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu je menší než 1 Å. Uvážíme-li také aberaci elektronových vln, je theoretická mez pro magnetický elektronový mikroskop řádově 10 Å. Dosud zhotovené mikroskopy mají rozlišovací schopnost 30—100 Å, to jest řádově desetkrát větší než mikroskop světelný, elektronovým mikroskopem se dosahuje zvětšení 100000 i více, zatím co nejlepší světelné mikroskopy mají zvětšení kolem 2000.

¹⁾ Výraz zní $d_0 = \frac{0,61 \lambda}{n \sin u}$; d_0 je rozlišitelná vzdálenost, λ je vlnová délka světla, které osvětluje předmět, n je relativní index lomu předmětového a obrazového prostoru, u je poloviční úhel, který svírají krajní paprsky vstupující do čočky; $n \sin u$ je číselná apertura čočky.



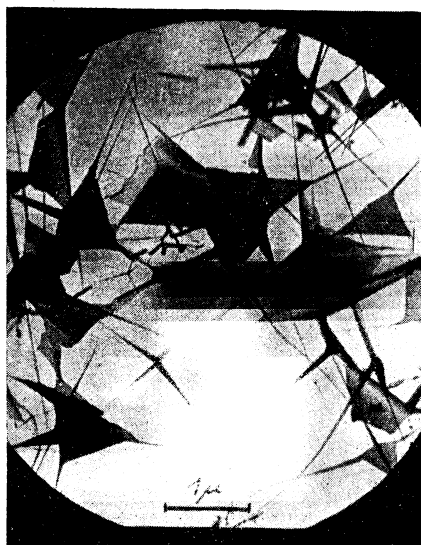
Obr. 1. Tubus mikroskopu s přívodem vysokého napětí a částí vakuového zařízení.

Obraz v elektronovém mikroskopu vzniká takto:

Zdrojem elektronových paprsků je elektronová tryska, která se skládá z wolframového vlákna, fokusační elektrody a anody. Elektrony emitované vláknem jsou urychlovány polem anody, na níž je napětí 40—200 kV podle typu mikroskopu, a fokusovány v úzký svazek s malým otvorovým úhlem. Tento paprsek se dále fokusuje kondensorem na pozorovaný objekt, umístěný ve speciálním držáku blízko ohniska objektivu. Elektronové paprsky přicházejí po průchodu předmětem, ve kterém nastává rozptyl elektronů,



Obr. 2. Oxyd alumina (zvětšeno 9500krát, paprskové napětí 80 kV).



Obr. 3. Oxyd zinku (zvětšeno 11 300krát, paprskové napětí 65 kV).

do objektivu, který vytvoří první zvětšený obraz předmětu blíže ohniskové roviny projekční čočky. Na rozdíl od mikroskopu světelného, kde je vznik obrazu založen na tom, že světelné paprsky jsou při průchodu předmětem v různých jeho bodech více či méně absorbovány, čímž vzniká kontrast obrazu, v elektronovém mikroskopu absorpce elektronů neexistuje. Kontrast obrazu je zde podmíněn různým rozptylem elektronů v různých bodech předmětu. Zvětšení u elektronového mikroskopu závisí na ohniskové dálce objektivu a na jeho vzdálenosti od roviny obrazu. Objektivy dnešních elektronových mikroskopů dávají zvětšení řádově stonásobné. První obraz se obvykle pozoruje na pomocném stínítku, umístěném blíže ohniskové roviny projekční čočky. Ve středu stínítka je otvor, který vymezuje část prvního obrazu, jež se promítá projekční čočkou na hlavní stínítko. První obraz se zvětší projekční čočkou ještě několikrát. Celkové zvětšení je pak rovno součinu zvětšení objektivu a projekční čočky. Někdy jsou v mikroskopu dvě projekční čočky. To umožňuje dosáhnout silnějšího zvětšení, nebo při daném zvětšení zmenšit rozměry mikroskopu. Výsledný obraz se obvykle fotografuje, při čemž se hlavní stínítko nahradí fotografickou deskou. Fotografie obrazu je možno ještě opticky zvětšit 4—5krát, čímž celkové výsledné zvětšení činí 100 000—200 000.

Nejrozšířenějším a nejlépe vyvinutým druhem elektronového mikroskopu je mikroskop s magnetickými čočkami, protože tyto čočky mají kratší ohniskovou dálku a menší aberaci než čočky elektrostatické. Jako příklad uvedeme nový magnetický elektronový

mikroskop SEM 2-2, vyráběný v NDR (obr. 1). Přístroj má magnetické čočky a paprskové napětí je možno plynule měnit od 0—100 kV. Umožňuje pozorování a fotografování v jasném i tmném poli a lze zhotovit také stereoskopické snímky. Dosahuje se jím zvětšení až 50000 při rozlišovací schopnosti 30 Å.

Také u tohoto mikroskopu je zdrojem elektronových paprsků elektronová tryska. Za tryskou je umístěn kondensator, což je elektromagnetická čočka²⁾ s větší ohniskovou



Obr. 4. Bakterie (zvětšeno 7500krát, paprskové napětí 26 kV).



Obr. 5. Bakteriofág (zvětšeno 6000krát).

dálkou, který koncentruje elektronové paprsky, vycházející z elektronové trysky rozptýlené. Pomocí objektivu zobrazuje elektronový paprsek předmět nejdříve na pomocné stínítko (tak zvaný první obraz). Ve středu stínítka je otvor, vymezující část prvního obrazu, která se promítá projekční čočkou na hlavní stínítko. Objektiv a projekční čočka jsou rovněž elektromagnetické čočky. Mikroskop sestává ze čtyř hlavních částí; z tubu mikroskopu, z proudového napájecího zařízení pro cívky magnetických čoček, z vakového systému a z vysokonapěťového zařízení. Tubus mikroskopu sestává (shora dolů, viz obr. 1) z elektronové trysky s kondensorem, z tubu objektivu, z tubu projekční čočky a ze zařízení pro fotografování. Elektronová tryska spolu s kondensorem tvoří pevný celek. Tubus objektivu obsahuje cívku, pólový nástavec a závěr; tubus projekční cívky obsahuje cívku, pólový nástavec (který je vlastně složen ze dvou nástavců — jeden slouží pro zvětšování od 5000 do 20000 a druhý od 20000 do 50000) s vyšroubovatelným pomocným stínítkem a pozorovacím okénkem. V pozorovacím tubu se nachází hlavní stínítko, které při pořizování fotografických snímků slouží za expoziční závěr. Fotografické zařízení je upevněno pomocí bajonetového závěru na tubu mikroskopu. Tuby objektivu, projekční čočky a pozorovací tubus mají vysokovakuový uzávěr.

Proudové napájecí zařízení pro cívky magnetických čoček je napájeno síťovým napětím

²⁾ Elektromagnetická čočka je v podstatě solenoid, který vytváří rotačně symetrické magnetické pole od nuly různé na délce značně kratší, než je ohnisková délka čočky (tak zvaná krátká magnetická čočka).

220 V. Elektronický stabilisátor udržuje konstantní napětí. Napětí na cívkách se nastavují pomocí potenciometru, intenzita proudů do cívek magnetických čoček je nastavována elektronicky prostřednictvím potenciometru.

Vakuový systém se skládá v podstatě z předčerpací pumpy, rtuťové vývěvy a trojcestného kohoutu.

Vysokonapěťové zařízení je samostatná jednotka, umístěná ve zvláštním prostoru. Obsahuje zdroj napětí pro žhavení katody a zdroj vysokého napětí. Přivedené síťové napětí se stabilisuje pomocí magnetického stabilisátoru a přivádí k regulačnímu transformátoru, který má dvě oddělené části, jednu pro žhavení katody, druhou vysokonapěťovou (až 100 kV).

Ovládací prvky všech zařízení jsou na rozvodné desce mikroskopu.

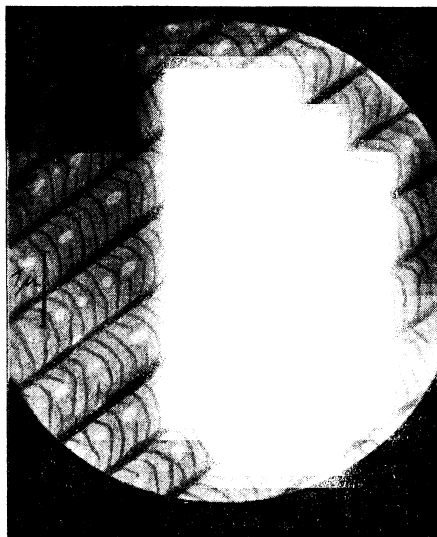
Hlavní technická data magnetického elektronového mikroskopu SEM 2-2:

Zvětšení až 50 000 násobné, rozlišovací schopnost min. 30 Å (3 m μ), napájecí napětí síťové 220 V, 50 Hz, max. vys. napětí 100 kV, předčerpací pumpa (pohon) 220/380 V, 50 Hz, dovolené úchytky napájecího napětí ± 15%, 48—51 Hz, příkon 4 kVA, žhavicí napětí max 4 V, žhavicí proud max. 4 A, rozměry 1200×2350×1200 mm, váha cca 450 kg, váha vysokonapěťového usměrňovače cca 1700 kg.

Elektronového mikroskopu je možno použít v různých oblastech vědy a techniky (na př. v biologii, v medicíně, ve fyzice, v chemii, v metalografii atd.). Na obr. 2, 3, 4, 5, 6 jsou snímky, pořízené mikroskopem SEM 2-2. Snímky dokazují, že to, co by se nedalo pozorovat světelným mikroskopem, který má poměrně malou rozlišovací schopnost a malé zvětšení, můžeme velmi snadno pozorovat mikroskopem elektronovým.

Vedle elektronového mikroskopu magnetického se používá ještě dalších typů, a to elektrostatického mikroskopu, ve kterém se používá elektrostatických čoček,³⁾ nejčastěji symetrických (tak zvaných unipotenciálních). Tryska tohoto mikroskopu je stejná jako u magnetických mikroskopů a obraz se vytváří pomocí objektivu a jedné nebo dvou projekčních symetrických čoček. Kondensator u většiny těchto mikroskopů chybí. Potíže při konstrukci elektrostatického mikroskopu spočívají ve zhotovení čoček o malé ohniskové dálce. Ohnisková dálka elektrostatické čočky závisí na tvaru elektrod a na jejich potenciálu. U elektrostatické čočky se při zmenšování vzdálenosti mezi elektrodami zmenšuje i ohnisková dálka. Zmenšení ohniskové dálky se dá dále dosáhnouti zvyšováním napětí mezi elektrodami. To je však omezeno průrazem, který vzniká při vysokých napětích následkem autoemise. Zvýšení průrazného napětí se dá dosáhnout volbou vhodného

³⁾ Elektrostatická čočka je v podstatě rotačně symetrické pole, vytvořené nabitými vodiči (elektrodami), které mají tvar rotačních těles. Více se však používá magnetických čoček pro tyto přednosti: snadno se reguluje jejich optická mohutnost změnou magnetisačního proudu cívky, zatím co u elektrostatických je třeba měnit za tímto účelem těžko regulovatelné napětí. U magnetických čoček není potřeba se obávat elektrického průrazu. Napětí potřebné k získání magnetisačního proudu je pouze 60—100 V, zatím co na elektrody unipotenciální elektrostatické čočky je třeba vložít napětí až 50 000 V, které často vede k průrazu. Magnetické čočky mají také menší vady.



Obr. 6. Část motýlové šupiny (zvětšeno 10500krát, paprskové napětí 75 kV).

tvaru a vyleštěním elektrod. Rozlišovací schopnost elektrostatického mikroskopu je poněkud horší než magnetického (nejlepší mají 80 až 100 Å). Také zvětšení je menší. Obsluha je stejná jako u magnetického mikroskopu.

Dalším druhem elektronového mikroskopu je tak zvaný mikroskop emisní. Zde je pozorovaný předmět zároveň zdrojem elektronové emise na rozdíl od mikroskopů magnetických a elektrostatických. Elektrony emitované s povrchu tělesa se zrychlí v elektrickém poli první čočky, procházejí soustavou magnetických nebo elektrostatických čoček a pak dopadají na stínítko nebo na fotografickou desku a zobrazují předmět. Emisní mikroskop se hodí především pro metalurgii, neboť umožňuje zkoumat a pozorovat kovy při teplotě, kdy již začíná pozorovatelná tepelná emise. Základní potíž při konstrukci emisních mikroskopů spočívá v tom, že pro značnou chromatickou vadu je obtížné dosáhnout vysoké rozlišovací schopnosti. Nejlepší rozlišovací schopnost dosažená emisním mikroskopem je 200—400 Å, zvětšení 100 000 až 500 000.

Literatura

Vajnrib-Miljutin, *Elektromaja optika*, Gosenergoizdat 1951 (vyšlo též v českém překladu).
Technická zpráva o elektronovém mikroskopu SEM 2-2, VEB Werk für Fernmeldewesen, Berlin-Oberschöneweide 1956 (fotografie v článku odtud).
Suškin, *Elektronnyj mikroskop*, GITTL, Moskva 1949 (vyšlo též v českém překladu).

Stanislav Kubík