

VÝUKA CHEMIE

ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP – KLÍČ K ODHALENÍ TAJEMSTVÍ MIKRO- A NANOSVĚTA

ZDEŇKA HÁJKOVÁ^a, PAVLA BAUEROVÁ^a,
ANTONÍN FEJFAR^a a MIROSLAV ŠLOUF^b

^a Laboratoř nanostruktur a nanomateriálů, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Cukrovarnická 10/112, 162 00 Praha 6,

^b Ústav makromolekulární chemie AV ČR, v. v. i., Heyrovského nám. 2, 162 06 Praha 6
hajkovaz@fzu.cz

Došlo 14.2.17, přepracováno 16.8.17, přijato 25.8.17.

Klíčová slova: elektronová mikroskopie, transmisní elektronová mikroskopie, skenovací elektronová mikroskopie, demonstrace, analogie, výukové materiály

1. Úvod

Jednou ze základních analytických technik moderního výzkumu materiálů, jejich mikroskopických struktur, vlastností a chemického složení je elektronová mikroskopie (EM). Chemicky, biologicky či materiálově zaměřenou vědeckou instituci, v níž by chyběl alespoň nějaký typ elektronového mikroskopu, dnes prakticky nenajdeme. Snímky z těchto mikroskopů se objevují i ve středoškolských učebnicích a výukových materiálech. Přesto se na středních školách, ale často i v nižších ročnících vysokých škol, o elektronové mikroskopii a jejich výhodách oproti snáze dostupné mikroskopii světelné (SM; zejména výrazně vyšším rozlišovacím schopnostem) informuje velmi nedostatečně.

Tento článek má být odrazovým můstkem pro to, aby učitelé středních (příp. i vysokých) škol o elektronové mikroskopii získali konkrétnější povědomí, které jim umožní lépe pochopit (a vysvětlit) snímky z elektronových mikroskopů, se kterými se během přípravy a vedení hodin (např. v seminářích) setkají. Pedagogové mohou využít didaktického návodu, jak elektronovou mikroskopii lépe představit, a to zejména žákům, kteří jsou orientováni na studium technických a přírodovědných oborů. Cílem tohoto příspěvku je nabídnout přehled základních informací, zajímavých odkazů a námětů na osvědčené výukové aktivity vztahující se k EM, které by mohly pomoci toto téma atraktivně a zjednodušit natolik, aby se mohlo stát běžnější součástí výuky nejen na středních školách.

2. Historie elektronové mikroskopie

Konstrukci elektronového mikroskopu nutně předcházela řada dílčích objevů týkajících se stavby atomu a vlastností elektronů. Zásadním poznatkem byla skutečnost, že urychlené elektrony se ve vakuu chovají podobně jako světlo – mohou se šířit rovnoměrně přímočaře a platí pro ně zákony optiky. Pohyb elektronů lze navíc usměrňovat elektrickým a magnetickým polem. Podle de Broglieho hypotézy lze každé volně se pohybující částici (tedy i elektronu) přiřadit vlnovou délku. Tu je možné v případě elektronů regulovat vložení urychlujícího napětí, jak je patrné ze vzorce

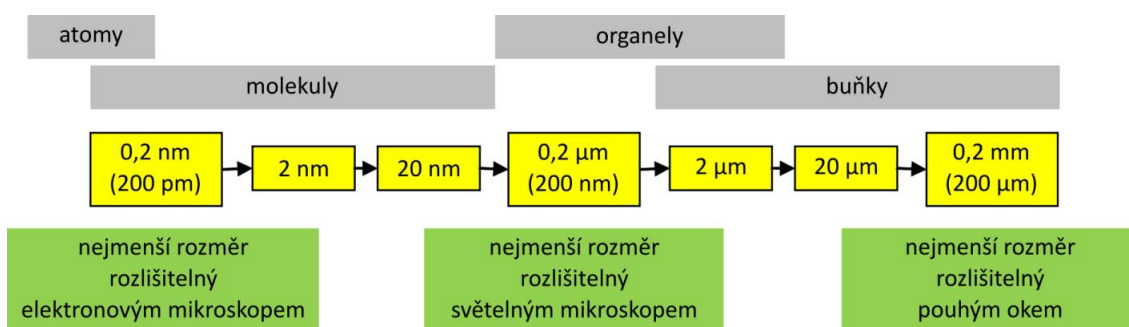
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{1,226}{\sqrt{U}} \quad (\text{v nm})$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J s), m je klidová hmotnost elektronu ($m = 9,110 \cdot 10^{-31}$ kg), e je náboj elektronu ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C) a U je vložené napětí. Při tom vlnová délka urychlených elektronů může být až 100 000× menší než vlnová délka viditelného světla. Např. u transmisního elektronového mikroskopu (TEM) se běžně používá urychlovací napětí v rozmezí 80–300 kV. Při urychlení elektronů napětím 200 kV se zmenší jejich vlnová délka na cca 6 pm. U skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) bývá použité napětí o jeden až dva řády nižší, obvykle v rozmezí 0,5–30 kV. Vzhledem k tomu, že vlnová délka má přímou vazbu k difrakčnímu limitu $d \approx \lambda/2$, který omezuje maximální rozlišení mikroskopu, je nasnadě, že mikroskop využívající záření s kratší vlnovou délkou bude schopný dosáhnout většího rozlišení. První transmisní elektronový mikroskop s větší rozlišovací schopností než tehdejší světelné mikroskopy, zkonstruoval roku 1933 Ernst Ruska na Technické univerzitě v Berlíně¹. Za tento významný objev byl roku 1986 oceněn Nobelovou cenou za fyziku.

Myšlenka skenování elektronovým svazkem, při kterém vzniká obraz postupně bod po bodu, byla v počátcích spojena především se jmény Maxe Knolla² a Manfreda von Ardenne^{3,4}. Až roku 1942 sestavili Američané Vladimír Zworykin, James Hillier a Richard Snyder skenovací elektronový mikroskop, který dosahoval rozlišení kolem 50 nm (cit.⁵).

3. Co to je a jak funguje elektronový mikroskop

Elektronový mikroskop je v mnohém podobný mikroskopu světelnému, nicméně zásadním rozdílem mezi nimi je to, že zvětšený obraz zkoumaného vzorku nevzniká u EM na základě jeho interakce se svazkem světelným (tj. proudem fotonů), nýbrž se svazkem elektronovým (tj.



Obr. 1. **Meze rozlišení.** Lidské oko je schopno rozlišit dva body vzdálené od sebe minimálně 0,2 mm. Větší rozlišení poskytují např. světelný či elektronový mikroskop. Nakresleno podle⁶

proudem elektronů). V elektronovém mikroskopu jsou navíc skleněné čočky nahrazeny elektromagnetickými čočkami, což jsou cívky, jejichž zvětšovací schopnost lze regulovat změnou elektrického proudu. Jednou z hlavních výhod EM je to, že oproti SM dosahuje vyššího rozlišení, a to až o tři řády – viz obr. 1.

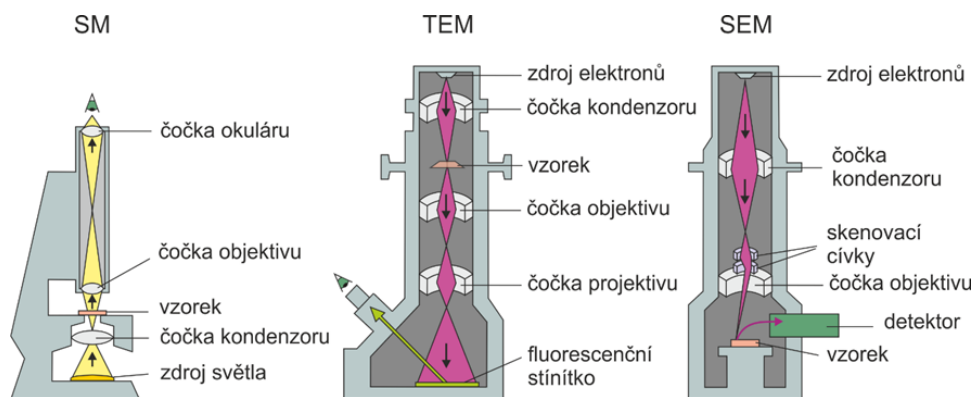
V předcházející kapitole bylo naznačeno, že základními typy elektronových mikroskopů jsou transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM) a skenovací (rastrovací, řádkovací) elektronový mikroskop (SEM, ve starší české literatuře též REM). Porovnání konstrukce těchto mikroskopů se světelným mikroskopem je schematicky naznačeno na obr. 2. Významné rozdíly mezi SM, TEM a SEM jsou přehledně shrnuty v tab. I. Dále v textu je blíže vysvětleno, na jakém principu fungují TEM a SEM a jak se pro ně připravují vzorky.

3.1. Transmisní elektronový mikroskop

Z obr. 2 je dobře patrné, že transmisní elektronový mikroskop je konstrukčně i funkčně velmi podobný světelnému mikroskopu (obrácenému vzhůru nohama). U TEM (obr. 3a) obraz vzniká prostřednictvím svazku elektronů, které jsou emitovány katodou/elektronovým dělem (zpravidla wolframovým vláknem žhaveným na teplotu

cca 2700 °C, žhaveným krystalem LaB₆ nebo autoemisí z katody Field Emission Gun, FEG). Elektrony jsou přiloženým napětím urychlovány směrem k anodě a po průchodu čočkami kondenzoru upraveny na svazek rovnoběžných paprsků, který prochází skrz vzorek (stejně jako ve světelném mikroskopu). Ve vzorku jsou elektrony silně rozptýlovány, a tak lze pomocí TEM pozorovat pouze velmi tenké vzorky (do tloušťky cca 100 nm). Obraz je zvětšen a zaostřen elektromagnetickými čočkami objektivu (stejně jako u SM) a projekтиву (odpovídá okuláru u SM) a je zobrazován na fluorescenčním stínítku, případně na fotografickém filmu či přes CCD kameru na obrazovce počítače. Zobrazovacím prostředím je vakuum, protože ve vzduchu by docházelo k rozptylu a absorpci elektronů ještě před dopadem na vzorek.

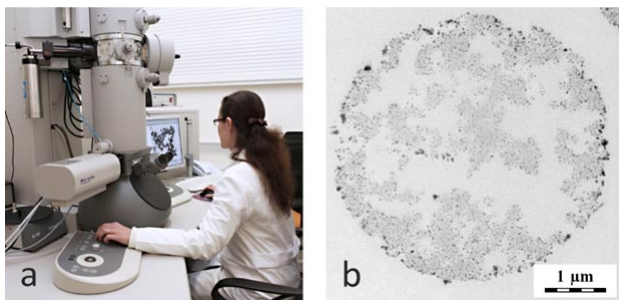
Jak bylo uvedeno, v TEM můžeme pozorovat pouze velmi tenké vzorky – tak tenké, aby elektrony mohly projít skrz (tj. obvykle silné pouze několik desítek nanometrů), a zobrazit tak vnitřní uspořádání vzorku (obr. 3b). Příprava vzorků pro TEM je poměrně náročná. Měkčí vzorky (např. části rostlin, syntetické polymery) se připravují tzv. ultratenkým řezáním na speciálním přístroji zvaném ultramikrotom, ve kterém ostrý diamantový nůž postupně odřezává malé tenké plátky. Tvrdší vzorky (např. kovové slitiny, keramické materiály) se zpravidla ztenčují na požadované



Obr. 2. Schématické porovnání řezu SM, TEM, SEM

Tabulka I
Porovnání vlastností SM, TEM a SEM

Parametr	SM	TEM	SEM
Používané záření	světlo (fotony)	elektrony	elektrony
Čočky	skleněné	elektromagnetické	elektromagnetické
Max. rozlišení	200 nm (omezeno difrakčním limitem $d \approx \lambda/2$)	> 0,1 nm (omezeno sférickou a chromatickou vadou čoček; TEM s vysokou rozlišovací schopností (HRTEM) dovoluje dosáhnout až atomární rozlišení)	> 1 nm (omezeno velikostí stopy elektronového paprsku, tzv. spot size)
Běžné rozlišení	1 μm	1 nm	2–5 nm
Vzorok	tenké (typicky desítky až stovky mikrometrů) <i>in vivo</i> (živé, mokré), i dynamické pochody	malé, tenké (typicky desítky až stovky nanometrů) suché, statické a velmi tenké	velikost limitována jen rozměry komory (typické rozměry vzorků ~ jednotky milimetrů) suché, statické a elektricky vodivé
Příprava vzorků	snadná (řezání, barvení)	náročná (řezání, ztenčování, kontrastování)	nenáročná (u nevodivých vzorků pokovení)
Zobrazovací prostředí	vzduch	vakuum	vakuum
Vznik obrazu	najednou	najednou	bod po bodu (elektronový svazek rastruje po vzorku)
Obraz pozorován	obvykle okuláry, příp. na monitoru počítače	okuláry nebo okénkem na fluorescenčním stínítku či na monitoru	na monitoru
Obraz	barevný vnitřní struktura	černobílý vnitřní struktura (např. obr. 3b)	černobílý vnější struktura (např. obr. 4b)
Náklady na pořízení a údržbu	nižší (< 1 mil. Kč)	vysoké (> 10 mil. Kč)	vysoké (> 10 mil. Kč)



Obr. 3. a) Transmisní elektronový mikroskop Tecnaí G2 Spirit od firmy FEI, používaný v Ústavu makromolekulární chemie (ÚMCH) Akademie věd (AV) ČR. b) Vnitřní struktura magnetické polymerní mikrokuličky, která byla zobrazena v TEM po zalití mikrokuličky do epoxidové pryskyřice a zhotovení ultratenkého řezu pomocí ultramikrotomu. Černé tečky na mikrofotografii jsou magnetické nanočástice zabudované do polymeru, které dodávají mikrokuličkám magnetické vlastnosti. Vzorek byl připraven na ÚMCH v oddělení Dr. Daniela Horáka⁷

ultratenké rozměry pomocí chemického leptání nebo iontového bombardování. Finální ultratenké vzorky o rozměrech zhruba $100 \times 100 \mu\text{m}$ se zachytávají na mědě-

né síťky o průměru 3 mm, které se vkládají do držáku pro TEM. Při pozorování polymerních vzorků či biologických objektů se materiály navíc často kontrastují (např. parami RuO_4 nebo OsO_4) kvůli lepšímu rozlišení jednotlivých částí nebo fází ve vzorku.

3.2. Skenovací elektronový mikroskop

Skenovací elektronový mikroskop (obr. 4a) využívá zcela stejný zdroj elektronů jako TEM, ale skoro ve všech ostatních aspektech se od TEM liší. Jak je naznačeno i na obr. 2, úzký svazek elektronů je v SEM elektromagnetickými cívkami bodově zaostřen na vzorek a pomocí skenovacích cívek postupně řádek po řádku skenuje (rastruje) jeho povrch. Na rozdíl od TEM tedy elektrony u SEM vzorkem zpravidla neprocházejí, ale interagují s povrchem vzorku a výsledek interakce v každém bodu zaznamenáváme pomocí vhodného detektoru. V praxi nejčastěji detegujeme tzv. sekundární elektrony, které jsou vyráženy z atomů na povrchu vzorku dopadajícími primárními elektrony. Signál je dále elektronicky zpracováván a v řídicím počítači je z něho nakonec bod po bodu sestavován obraz. Podobně jako TEM i SEM pracuje s vysokým vakuem, aby se zabránilo vlivu atmosféry na elektrony.



Obr. 4. a) Skenovací elektronový mikroskop MAIA3 od brněnské firmy Tescan používaný ve Fyzikálním ústavu (FZÚ) AV ČR. b) Vnější morfologie magnetických polymerních mikrokuliček z obr. 3b, která byla zobrazena v SEM po depozování kuliček na sklo a pokovení tenkou vrstvou platiny. Mikrofotografie dokazuje kulovitý tvar a značně homogenní distribuci velikostí připravených mikrokuliček⁷

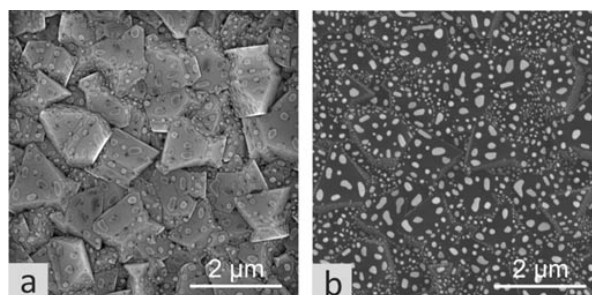
Obecně je v SEM možné pozorovat poměrně velké a tlusté vzorky (řádově i centimetry) – jejich rozměr je limitovaný prakticky pouze velikostí komory, do níž jsou vkládány. Navíc oproti TEM ani příprava vzorků nebývá příliš složitá. Na nevodivé vzorky je třeba před měřením napařit či naprášit tenkou vrstvou kovu (např. 4 nm platiny či 10 nm zlata). Jinak se vzorky pouze uchyťí na držák (např. přilepí vodivou měděnou či uhlíkovou páskou nebo stříbrnou pastou), upevní na polohovací stoleček v mikroskopu a pozorují. SEM poskytuje pozoruhodné obrazy povrchových detailů vzorku s vysokou hloubkou ostrosti. Dovoluje též zobrazení homogenity v distribuci částic (obr. 4b).

4. Použití elektronových mikroskopů

Elektronová mikroskopie má jako metoda zkoumání struktury látek řadu aplikací v různých oborech – ve fyzice (studium struktury kovů, slitin, polovodičů či tenkých vrstev a jejich defektů), fyzikální chemii (studium mikro- a nanočástic, micel), makromolekulární chemii (studium nadmolekulární struktury homopolymerů, kopolymerů, polymerních směsí a kompozitů), anorganické a analytické

chemii (prvková mikroanalýza materiálů, strukturní analýza mikro- a nanokrystalů), biologii (studium struktury rostlin, živočichů a jejich částí, studium struktury a ultrastruktury buněk), geologii (studium struktury, analýza a identifikace minerálů). Dále se EM používají také v kriminalistice, archeologii, medicíně (diagnostika virů) atp. O důležitosti elektronové mikroskopie, jakožto významné metody pro studium nanosvěta, svědčí množství článků publikovaných v posledních letech v Chemických listech. Konkrétně lze jmenovat např. studie, při nichž byly SEM či TEM použity pro zobrazení morfologie, velikosti a/nebo distribuce velikostí u kovových nanočástic^{8–10}, křemíku¹¹, (fluoro)grafenu^{12,13}, polymerů¹⁴, kvazikrystalů¹⁵, azbestových a minerálních vláken¹⁶, farmaceutických látek^{17,18} atp.

Elektronové mikroskopy poskytují nejen krásné obrázky vnitřní (TEM), resp. vnější (SEM) struktury zkoumaného vzorku, ale mohou podat i další cenné informace. Všechny další možnosti zobrazování, spektroskopie a/nebo difrakce v elektronových mikroskopech souvisí s interakcí primárních elektronů (PE) se zkoumaným vzorkem. Dochází totiž nejen k průchodu elektronů vzorkem (základ

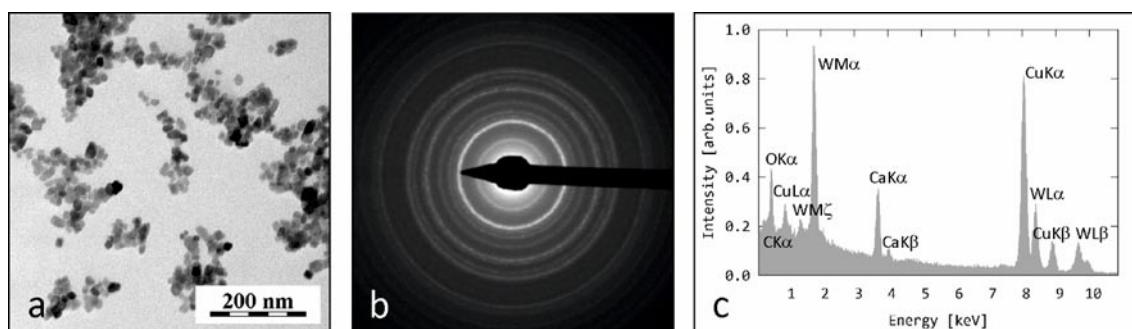


Obr. 5. SEM analýza stejného místa vzorku zlata na nanodiamantech ve dvou režimech: a) topografie (tj. povrch vzorku) byla zobrazena na základě detekce sekundárních elektronů, b) materiálový kontrast (tj. rozdíl mezi částmi vzorku s různým atomovým číslem) byl zobrazen díky detekci zpětně rozptýlených elektronů. Na obrázku b) se místa tvořená těžšími prvky – s vyšším protonovým číslem – zobrazí světleji (zlato), zatímco místa tvořená lehčími prvky – s nižším protonovým číslem – jsou tmavší (uhlík). Vzorek byl připravený na FZÚ v Oddělení optických materiálů (laboratoř doc. Kromky)

Tabulka II

Základní režimy v TEM a SEM. Podle použitého detektoru získáváme různé informace o zkoumaném vzorku. (Popis metod není úplný. V zájmu srozumitelnosti jsme se dopustili určitých zjednodušení)

Typ mikroskopu	Detegovaný signál	Informace o vzorku	Příklad
TEM	prošlé elektrony	vnitřní struktura, tvary nanočástic	obr. 3b, obr. 6a
TEM	difraktované elektrony	atomární struktura krystalů	obr. 6b
SEM	sekundární elektrony	topografie, struktura povrchu	obr. 4b, obr. 5a
SEM	zpětně rozptýlené elektrony	rozložení fází v kompozitech	obr. 5b
TEM i SEM	charakteristické paprsky X	prvkové složení v daném místě	obr. 6c



Obr. 6. TEM analýza vzorku CaWO_4 ve třech režimech: a) detekce prošlých elektronů, b) elektronová difrakce, c) EDX spektrum. Mikrofotografie a) umožňuje určit tvary částic, z difraktogramu b) můžeme odvodit přesnou strukturu krystalů a spektrum c) nám dává informaci o prvkovém složení vzorku; (píky C a Cu odpovídají podložce – standardní měděná síťka pro TEM mikroskopii pokrytá tenkým uhlíkovým filmem.) Zobrazené nanočástice byly připraveny na ÚMCH v laboratoři Dr. Hrubého

zobrazování v TEM; obr. 3b) a ke vzniku sekundárních elektronů (SE; základ zobrazování v SEM; obr. 4b, 5a), ale i k řadě dalších jevů, z nichž nejdůležitější jsou přehledně shrnuty v tab. II a vysvětleny v následujícím odstavci.

Zpětně rozptýlené elektrony v SEM (BSE = backscattered electrons) se využívají k odlišení různých fází v kompozitních materiálech; důležitou podmínkou přitom je, aby se jednotlivé složky kompozitu lišily atomovým číslem (srov. obr. 5a a 5b). Rozptyl a následná interference primárních elektronů na tenkých krystalických materiálech v TEM je základem elektronové difrakce, přičemž ze zaznamenaných difraktogramů lze odvodit strukturu studovaných krystalů (obr. 6b). Charakteristické rentgenové záření, emitované jako jeden ze signálů v důsledku dopadu PE na vzorek, je základem prvkových analýz v mikroměřítku (mikroanalýza, energiově-disperzní spektroskopie; zkratka metody je EDS či EDX; obr. 6c).

Nejmodernější elektronové mikroskopy zpravidla mají navíc ještě další možnosti, které bychom měli alespoň zmínit. Zobrazování při velmi nízkých energiích dopadajících elektronů (nízkoenergová SEM) omezuje poškození citlivých preparátů elektronovým svazkem. Speciální metody zobrazování (kombinace různých náklonů, postupné odřezávání vzorku) umožňují zviditelnění třírozměrné struktury vzorků (3D-SEM, 3D-TEM). Pozorování vzorků při nízkých teplotách (Cryo-SEM, Cryo-TEM) a/nebo mírně vyšších tlacích (variable-pressure EM) umožňuje zobrazovat též mokré či zmrazené vzorky.

5. Náměty pro výuku o EM

Velkou pomocí pro výuku o elektronové mikroskopii mohou být kvalitní výukové materiály. Z textů v češtině můžeme doporučit brožuru „Vše, co chcete vědět o elektronové mikroskopii, ale neodvážili jste se zeptat“¹⁹ nebo podrobnější publikaci „Nanoskopie“²⁰ pojednávající vedle EM i o SPM. Pěkně zpracované výukové materiály týkající se elektronových mikroskopů jsou k dispozici

např. na těchto stránkách (v angličtině):

- animace TEM (i STEM), SEM (SE, EDX), základní informace²¹
- virtuální TEM, SEM, základní informace, testy, další odkazy²²
- animace k TEM, SEM²³
- aktivity, animace a základní informace k TEM²⁴
- animace k SEM²⁵

Další inspiraci a materiály do výuky lze najít v „Mikroskopickém okénku“²⁶, tj. na webových stránkách Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky (FZÚ AV ČR), v. v. i. Případně je možné zúčastnit se popularizačních aktivit o EM ve FZÚ (exkurze pro žáky, workshop pro učitele), kde jsou tyto také prezentovány.

5.1. Analogie světelného a elektronového paprsku

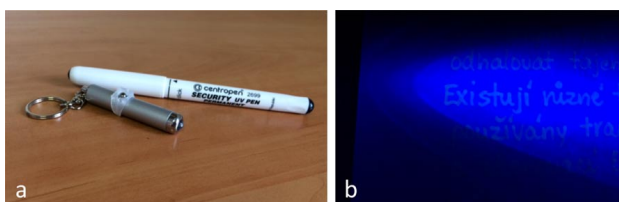
V prvotním přiblížení rozdílů mezi TEM a SEM lze pracovat se světelným paprskem, jakožto analogií elektronového svazku, a použít ho k názorné demonstraci rozdílů mezi oběma typy mikroskopů. U TEM obraz vzniká najednou při průchodu elektronů skrz vzorek. Analogií k TEM je v tomto smyslu např. zpětný projektor. Princip vzniku obrazu v TEM naznačí i obyčejná baterka, kterou se posvítí skrz okno. Světlo z baterky (analogie elektronů v TEM) projde skrz transparentní část okna (tj. sklo; obecně oblasti na vzorku, kterými snadno procházejí elektrony). Venku na stěně domu vznikají stíny dřevěných částí okna, které světlo z baterky neprosvítlo. V analogii TEM dřevěné rámy reprezentují části zkoumaného vzorku obsahující materiál, jenž pohlcuje či vychyluje elektrony. Podobně jako v případě pozorovaného stínu i na obrázku z TEM jsou oblasti, kde elektrony neprošli skrz vzorek, tmavé²⁷. Na podobné analogii (zobrazení stínu pozorovaného objektu) je založena i aktivita s jednoduchým modelem TEM. Na stránkách americké komunity National Informal STEM Education Network²⁸ je k dispozici (v angličtině) návod na konstrukci tohoto modelu i popis jeho použití (včetně názorného videa).

V případě SEM lze použít analogii s prohledáváním temného pokoje pomocí baterky. Pro „zmapování“ místnosti bychom kuželem světla (odpovídá elektronovému svazku) proskenovali uspořádání pokoje. Postupným projížděním světelným paprskem přes pokoj vzniká prostřednictvím zraku (analog detektoru elektronů v SEM) v mysli (analogií v SEM je počítačová paměť) obraz místnosti¹⁹.

5.2. Náměty, jak demonstrovat základní principy SEM

5.2.1. Tajná zpráva – přečtete si po řádcích

Samotná slovesa „skenovat“ či „rastrovat“ jsou pro mnohé žáky málo srozumitelná. Za vhodné proto považujeme použití synonymního „řádkovat“. Pro názorné vysvětlení základního principu funkce SEM lze uvést přirovnání, že v SEM elektronový paprsek skenuje zkoumaný vzorek podobně jako „skenujeme“ text při čtení knížky, tedy postupně zleva doprava po řádcích. Aktivitou prakticky vysvětlující tento princip může být čtení tajné zprávy napsané v běžném světle neviditelným UV fixem. Pro rozluštění zprávy je nutné text osvětlit UV lampou (proud UV fotonů je analogií elektronového svazku) a odkrývat jej postupně po jednotlivých řádcích, tj. stejně jako elek-



Obr. 7. Řádkování tajné zprávy UV lampou jako analogie skenování elektronovým svazkem. a) UV citlivý popisovač (vzhledem připomínající zmizík) a UV svítidlo potřebné ke zviditelnění stopy popisovače. b) Tajná zpráva dává smysl pouze tehdy, je-li zobrazována a čtena po řádcích

tronový svazek v SEM „osvětluje“ a skenuje povrch vzorku (obr. 7).

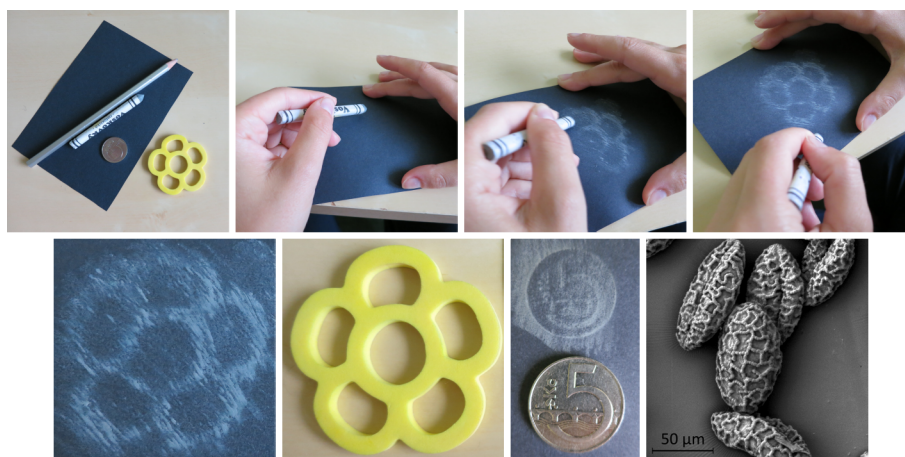
5.2.2. Černobilá analogie SEM s mincí, pastelkou a papírem

Černobilý mikrosnímek ze SEM není fotografií v pravém slova smyslu, ale mapou rozložení intenzity detegovaného signálu (nejčastěji sekundárních elektronů vyražených z povrchu vzorku). Z nakloněných oblastí a vyvýšenin na povrchu vzorku se dostane do detektoru více sekundárních elektronů a výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru, a tedy světlejší místo na obrazovce. U vodorovných částí vzorků a prohlubní je tomu naopak, a jsou proto zobrazeny tmavěji.

Tento princip vzniku obrazu v SEM předvádí druhá demonstrace na základě analogie s voskovkou/pastelkou jako zdrojem elektronů. Tato aktivita byla inspirována demonstrací s kostkami LEGO²⁹ a publikována jako součást příloh dizertační práce³⁰. K provedení je třeba: tenký černý papír, bílá nebo světle šedá voskovka či pastelka, mince/pěnové razítko. Žák přes minci/pěnové razítko položí tenký černý papír, který je nutné přidržovat. Pomocí voskovky/pastelky (analogie úzkého svazku elektronů) žák postupně lehce přejíždí (skenuje) po papíru, a tím dochází k zobrazení povrchu předmětu pod papírem (obr. 8). Podobně jako v případě sekundárních elektronů v SEM bude větší intenzita bílé barvy voskovky/pastelky nad vyvýšenými místy skenovaného objektu, zatímco hlubší části zůstanou černé. Ve výsledku tak dostaneme obrázek připomínající černobílé snímky získané ze skutečného SEM.

6. Závěr

Elektronová mikroskopie dovoluje nahlédnout do světa nanočástic a nanostruktur, případně studovat strukturu látek až na atomární úrovni. Použití elektronových mi-



Obr. 8. Postup při demonstraci principu funkce SEM s mincí/pěnovým razítkem, voskovkou/pastelkou a černým papírem. Stopy bílé voskovky na černém papíře představují sekundární elektrony nutné k vytvoření obrazu povrchu vzorku. Pro srovnání podobnosti SEM obrázek pylových zrn lilie (vpravo dole)

kroskopů pro studium anorganických, organických a polymerních materiálů, buněk, tkání apod. je dnes zcela běžné nejen v chemii, ale také biologii, geologii a fyzice. Informace týkající se konstrukce a principu funkce těchto přístrojů se velkou měrou dotýkají matematiky a fyziky. Ačkoli je středoškolské kurikulum přírodovědných předmětů již nyní značně objemné, domníváme se, že stejně jako mají elektronové mikroskopy nezastupitelné uplatnění ve vědeckých a výzkumných laboratořích, je pro kvalitní středoškolskou výuku 21. století nezbytné, aby pedagogové měli o elektronové mikroskopii alespoň základní povědomí a mohli ji, byť jen stručně či příležitostně, představit ve výuce jako co do rozlišení dokonalejší alternativu mikroskopie světelné. Přehledným, a proto do značné míry zjednodušujícím vodítkem jim má být tento článek.

Práce vznikla za podpory Grantové agentury České republiky (grant č. 16-02870S), Ministerstva zdravotnictví České republiky (grant č. 15-25781a) a Technologické agentury České republiky (grant TE01020118).

LITERATURA

1. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/ruska-bio.html, staženo 23. 1. 2017.
2. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/, staženo 23. 1. 2017.
3. von Ardenne M.: *Z. Phys.* 109, 553 (1938).
4. von Ardenne M.: *Z. Tech. Phys.* 19, 407 (1938).
5. Zworykin V. K., Hillier J., Snyder R. L.: *ASTM Bull.* 117, 15 (1942).
6. Alberts B., Bray D., Johnson A., Lewis, J., Raff M., Roberts K., Walter, P.: *Základy buněčné biologie – Úvod do molekulární biologie buňky*. Espero Publishing, Ústí nad Labem 1998.
7. Horak D., Hlídková H., Trachtová S., Slouf M., Rittich B., Spanová A.: *Eur. Polym. J.* 68, 687 (2015).
8. Patera J., Krupka J., Pašek J., Paterová I., Jirátková K., Murafa N.: *Chem. Listy* 106, 1122 (2012).
9. Siegel J., Staszek M., Švorčík V.: *Chem. Listy* 108, 1102 (2014).
10. Řezníčková A., Novotná Z., Kolská Z., Ulbrich P., Švorčík V.: *Chem. Listy* 108, 865 (2014).
11. Dian J., Jelínek I.: *Chem. Listy* 104, 1140 (2010).
12. Kluková L., Bertók T., Tkáč J.: *Chem. Listy* 108, 653 (2014).
13. Pykal M., Zbořil R., Otyepka M.: *Chem. Listy* 110, 335 (2016).
14. Broncová G., Shishkanova T. V., Matějka P., Kubáč D., Král V.: *Chem. Listy* 110, 800 (2016).
15. Michalčová A.: *Chem. Listy* 106, 51 (2012).
16. Skácel F., Guschlová Z., Tekáč V.: *Chem. Listy* 106, 961 (2012).
17. Šimek M., Grünwaldová V., Kratochvíl B.: *Chem. Listy* 108, 50 (2014).
18. Trousil J., Hrubý M., Šlouf M., Štěpánek P.: *Chem. Listy* 109, 784 (2015).
19. Kolektiv FEI: *Vše, co chcete vědět o elektronové mikroskopii, ale neodvázili jste se zeptat*. FEI, Brno 2002. V angličtině dostupné na: <http://web.pdx.edu/~pmoeck/pdf/all%20you%20wanted%20to%20know%20about%20electron%20microscopy.pdf>, staženo 23. 8. 2017.
20. Vůjtek M., Kubínek R., Mašláň M.: *Nanoskopie*. Univerzita Palackého, Olomouc 2012.
21. https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope, staženo 23. 1. 2017.
22. <http://www.ammr.org.au/myscope>, staženo 23. 1. 2017.
23. http://fy.chalmers.se/~f10mh/startpages/instr_bg.html, staženo 23. 1. 2017.
24. http://www.hk-phy.org/atomic_world/tem/tem01_e.html, staženo 23. 1. 2017.
25. http://virtual.itg.uiuc.edu/training/EM_tutorial, staženo 23. 1. 2017.
26. <http://mikroskopicke-okenko-fzu.webnode.cz/>, staženo 23. 1. 2017.
27. <http://www.ammr.org.au/myscope/tem/background/>, staženo 23. 1. 2017.
28. <http://www.nisenet.org/catalog/exploring-tools-transmission-electron-microscopes>, staženo 23. 1. 2017.
29. Campbell D. J., Freidinger E. R., Querns M. K., Swanson S., Ellis A., Kuech T., Payne A., Socie B., Condren S. M., Lisensky G., Rasmussen R., Hollis T., Villarreal R., Campbell K.: *Exploring the Nanoworld with LEGO® Bricks*. Bradley University, Peoria 2012.
30. Hájková Z.: *Disertační práce*. Univerzita Karlova, Praha 2014.

Z. Hájková^a, P. Bauerová^a, A. Fejfar^a, and M. Šlouf^b (^aLaboratory of Nanostructures and Nanomaterials, Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, ^bInstitute of Macromolecular Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague): **Electron Microscope – The Key to the Secrets of the Micro- and Nanoworld**

The electron microscope (EM) represents a research tool for the characterization of materials at the micro- and nanoscale. This paper presents history, working principles and application of transmission EM and scanning EM. These types of EM are compared with the light microscope. Moreover, accurate analogies, simple demonstrations and references to educational materials concerning EM are mentioned.