Interakce elektronů se vzorkem

Primární elektrony prolétávající aparaturou SEM mohou interagovat se vzorkem čtyřmi různými způsoby. Vzhledem k tomu, že jsou elektrony záporně nabité, mohou interagovat jak s elektrony v atomovém obalu atomů prvků, které jsou ve zkoumaném vzorku obsažené, tak s jádry těchto atomů. Velikost a tvar oblasti vzorku, v níž elektrony svazku (tzv. **primární elektrony**) interagují s jeho atomy, je závislá na atomovém čísle prvku, z něhož je daná oblast vzorku tvořena, energii primárních elektronů a na úhlu, pod kterým elektrony na vzorek dopadají.

Interakce primárních elektronů s elektrony materiálu vzorku mohou být:

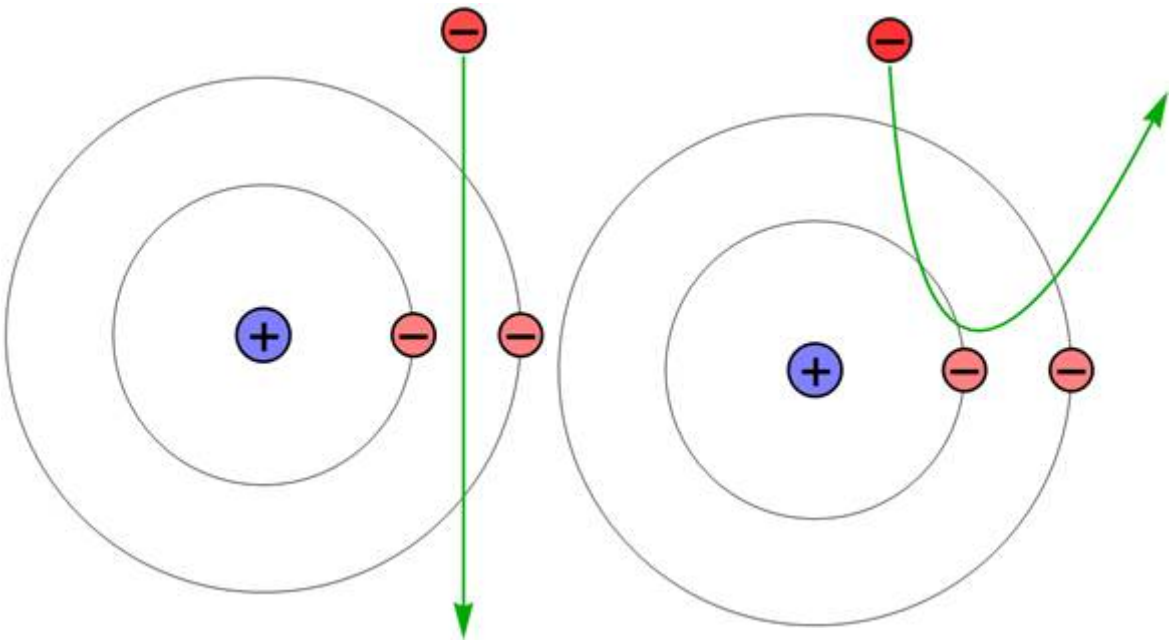
1. pružné srážky - mění se při nich směr pohybu primárních elektronů, ale zachovává se jejich mechanická energie. V tomto případě se jedná převážně o srážky primárních elektronů a atomových jader atomů prvků obsažených ve vzorku. Vzhledem k tomu, že pohybující se elektron má energii rovnou cca setině excitační energie jádra, pravděpodobnost předání energie primárním elektronem jádru je minimální. Proto po jedné nebo několika interakcích tohoto typu opouští elektron vzorek jako rozptýlený elektron (BE - viz dále).
2. nepružné srážky - mění se při nich směr pohybu primárních elektronů, ale jejich mechanická energie postupně klesá, protože je předávána dalším elektronům, s nimiž primární elektron interaguje (viz dále).

Srážku elektronu a atomového jádra lze přirovnat ke srážce korálku a těžkého míče (např. gymnastický na posilování zad): letící korálek nemůže s míčem zásadním způsobem pohnout, energie korálku se tedy (téměř) nemění a korálek odlétá zpět s (téměř) stejně velkou rychlostí (tj. energií).

Srazí-li se dva korálky (nebo dva gymnastické míče), předají si vzájemně svou energii; v tomto případě mají obě tělesa stejnou hmotnost, a proto mohou vzájemně ovlivnit směr svého pohybu.

Jednotlivé typy interakcí elektronu se vzorkem jsou schematicky zobrazeny na obr. 200 až obr. 203.

První možností je **STEM** (*Scanning Transmission Electron Microscopy*), tj. primární elektrony svazku neinteragují se žádným elektronem v atomovém obalu atomů zkoumaného vzorku (viz obr. 200). Elektrony, které takto projdou zkoumaným vzorkem a neabsorbují se v něm, jsou také detekovány a přispívají k celkovému obrazu zkoumaného vzorku.



Obr. 200 Obr. 201

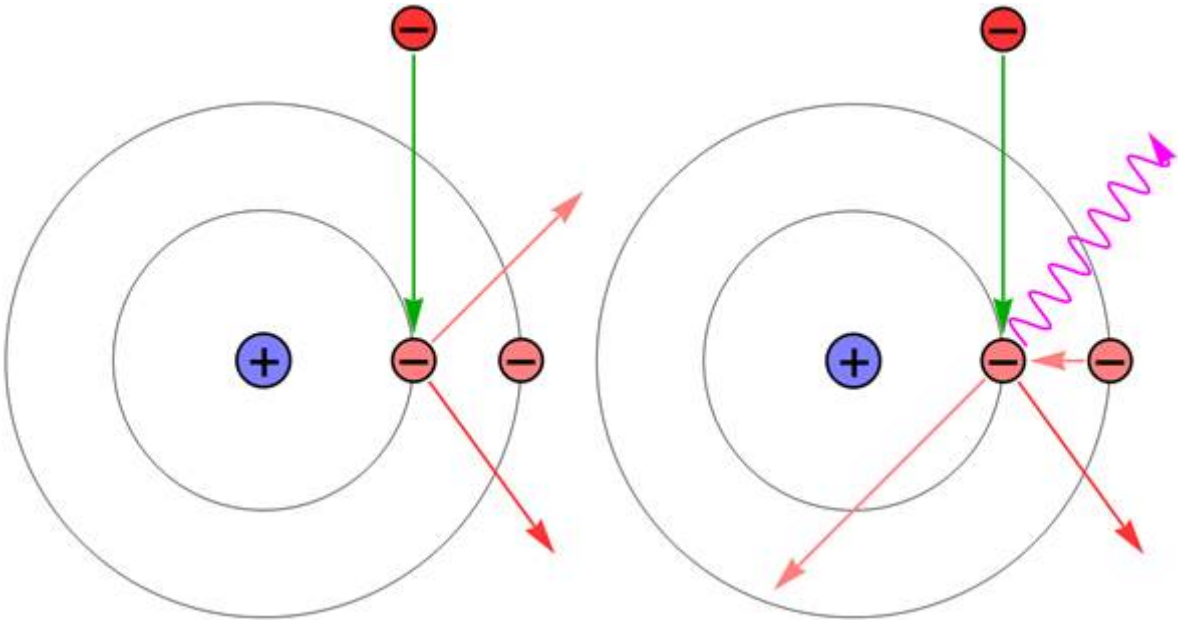
Dalším typem interakce je **BSE** (*Back Scatered Electrons*) - primární elektrony jsou rozptýleny v elektrickém poli jiného elektronu, od něhož je primární elektron vlivem elektrostatické síly odpuzován, nebo odrazem od kladného jádra, jemuž elektron vlivem poměru hmotností elektronu a jádra nepředává téměř žádnou energii. Na obr. 201 je schematicky zobrazen rozptyl primárního elektronu v elektrostatickém poli elektronu v atomovém obalu prvku materiálu vzorku. Takto vzniklé elektrony mohou opouštět materiál vzorku i v relativně velkých vzdálenostech od místa dopadu primárních elektronů na vzorek. I proto se detekují pomocí polovodičových detektorů, které jsou místěny těsně pod objektivem mikroskopu.

Narazí-li primární elektron na elektron atomu vzorku, předá mu část své energie. Elektron atomu tak může přejít na vyšší energetickou hladinu (tj. nastane excitace atomu) nebo je zcela uvolněn z atomu. Jsou-li tímto způsobem elektrony z atomu uvolněny, mluvíme o sekundárních elektronech **SE** (*Secondary Electrons*) - viz schéma na obr. 202.

Po uvolnění elektronu z dané energetické hladiny ale může toto místo obsadit elektron, který se původně nacházel na vyšší energetické hladině. Při přeskoku na nižší energetickou hladinu uvolní tzv. charakteristické rentgenové záření (energie fotonu tohoto záření odpovídá rozdílu příslušných energetických hladin). V tomto případě se jedná o interakci **EDX** (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*), která je schematicky zobrazená na obr. 203.

V některých případech jsou také uvolněny tzv. Augerovy elektrony; těch je ale ve srovnání s ostatními uvolněnými elektrony velmi malý počet, proto se detekují relativně obtížně.

Všechny takto uvolněné elektrony a uvolněné charakteristické rentgenové záření se detekují a takto získané informace přispívají k celkovému obrazu zkoumaného vzorku.



Obr. 202 Obr. 203

Na obr. 204 jsou schematicky zobrazené nejčastěji detekované informace elektronikou SEM.

Katodoluminiscence vzniká v důsledku nepružných srážek. Při nich je elektronu předána část energie primárního elektronu, čímž se dostane daný elektron na vyšší energetickou hladinu. Při návratu na nižší energetickou hladinu je emitováno záření s frekvencí odpovídající rozdílu energií daných energetických hladin. Takto může být emitováno ultrafialové záření, infračervené záření i světlo viditelné lidským okem.

Charakteristické rentgenové záření vzniká analogickým způsobem jako katodoluminiscece. Rozdíl je v tom, že elektronu ve vnitřní slupce atomového jádra je předána relativně velká energie. Toto záření vychází (dle obr. 205) z větších hloubek zkoumaného vzorku, a proto je rozlišení SEM

v tomto oboru nižší, než je rozlišení získané pomocí sekundárních elektronů.

Primární elektrony, jejichž kinetická energie poklesla na úroveň tzv. Fermiho energie dané látky, jsou detekovány jako absorbované elektrony. To je ale metoda, na které je založen transmisní elektronový mikroskop.

Současně mohou vznikat další typy elektromagnetického záření (ultrafialové záření, infračervené záření, …) i spojité rentgenové záření, které vzniká při interakci primárních elektronů s atomovými jádry atomů materiálu vzorku.

Schematický obr. 205 je podobný jako obr. 204, ale jsou na něm navíc zakresleny (a číselně uvedeny) hloubky, v jakých jednotlivé typy záření ve vzorku vznikají. Současně je na tomto obrázku uvedeno, jakou informaci o vzorku daný typ záření přináší. Na základě detekce a zpracování všech těchto informací získáme komplexní informaci o zkoumaném vzorku.

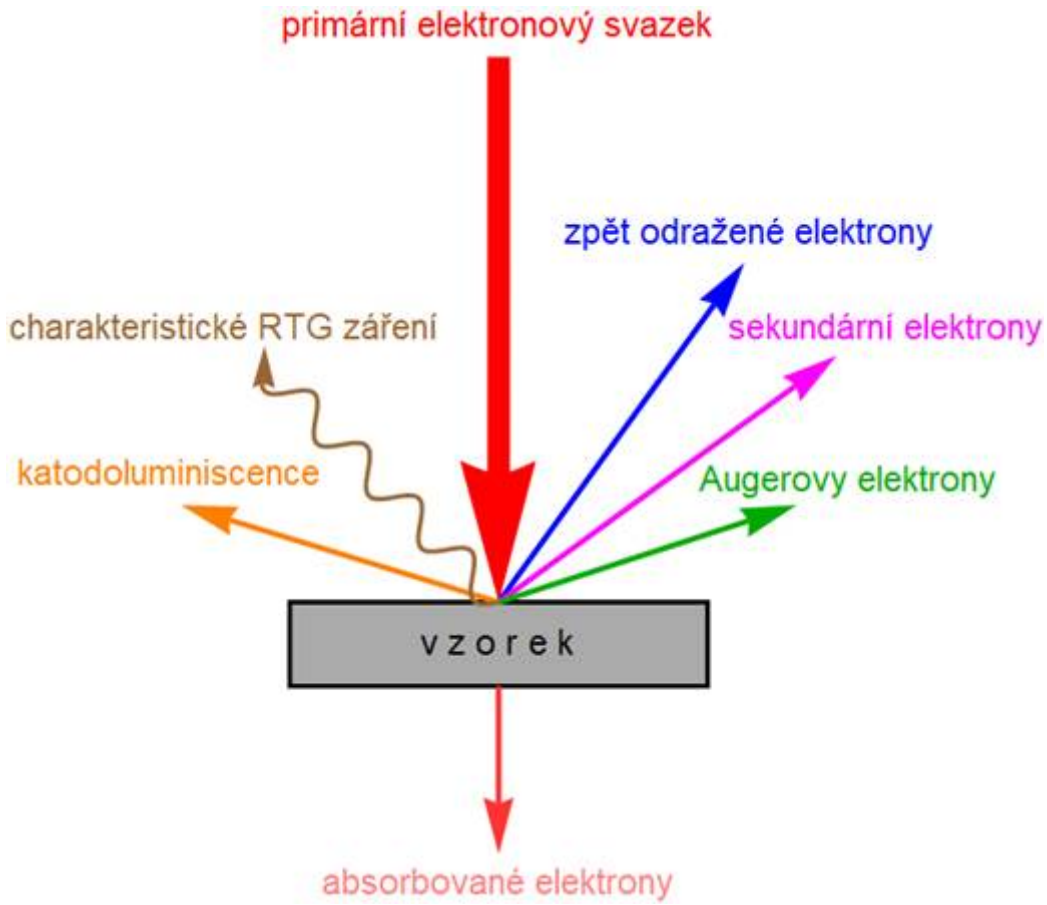
Sekundární elektrony jsou vytvářeny třemi mechanismy:

1. elektrony vznikající přímou interakcí primárních elektronů s atomovým obalem (viz obr. 202);
2. elektrony vznikající interakcí zpětně rozptýlených elektronů s atomovým obalem;

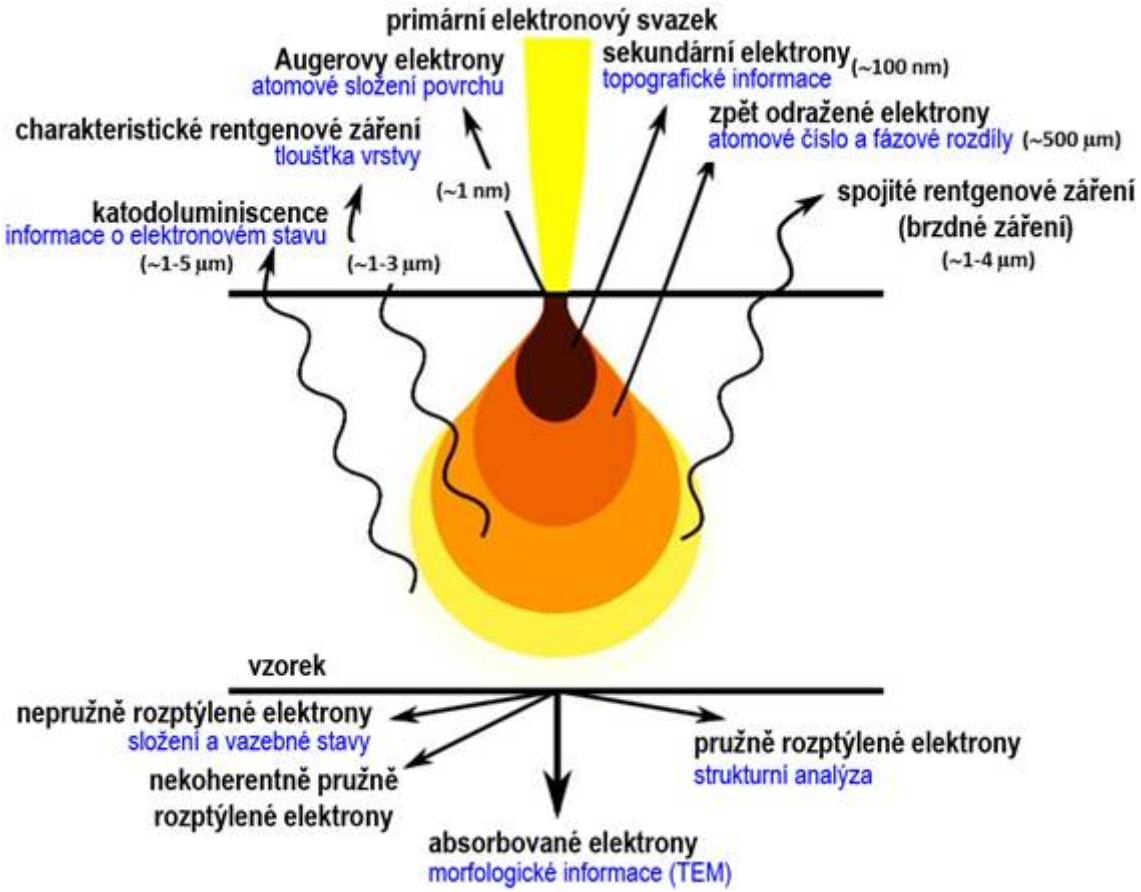
Další elektron je tedy z obalu vyražen i elektronem, který se „vrací zpět“ po interakci s jiným elektronem nebo jádrem (viz obr. 201).

3. elektrony vznikající interakcí zpětně rozptýlených elektronů s okolím preparátu (pólové nástavce, držák vzorku, …).

Většina SEM detekuje sekundární elektrony všech tří výše popsaných typů. Tento druh elektronů se detekuje pomocí fotonásobiče. Pokud se při detekci sekundárních elektronů podaří odfiltrovat pouze elektrony vznikající přímo z primárních elektronů (tj. elektrony prvního typu ve výše uvedeném dělení), zvýší se rozlišovací schopnost SEM. Energie sekundárních elektronů je řádově 50 eV.

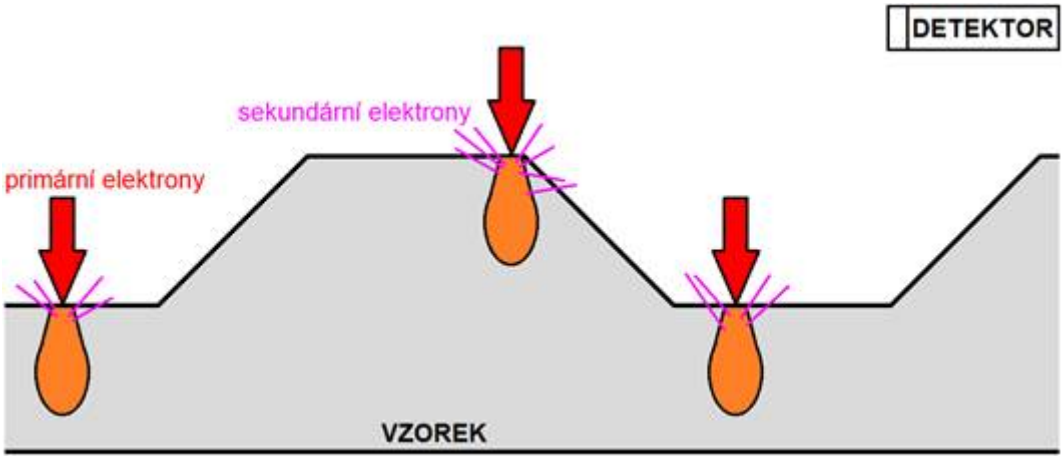


Obr. 204



Obr. 205

Intenzita sekundárních elektronů (počet sekundárních elektronů) je ovlivněna výstupní prací elektronu z daného materiálu vzorku, energií primárních elektronů, ale také reliéfem zkoumaného vzorku. Pokud bude místo, z něhož budou sekundární elektrony emitovány, zastíněno ve směru do detektoru elektronů nerovností vzorku, bude detektor detektovat méně sekundárních elektronů ve srovnání s detekcí z místa, které zastíněno nebude (viz obr. 206).



Obr. 206

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.