

DIFRAKCE ELEKTRONŮ V KRYSTALECH, ZOBRAZENÍ ATOMŮ

T. Jeřábková

Gymnázium, Brno, Vídeňská 47

ter.jer@seznam.cz

V. Košar

Gymnázium, Brno, Vídeňská 47

vlastik9a@atlas.cz

G. Malenová

Gymnázium Třebíč

malena.vy@quick.cz

A. Podolník

Gymnázium Brno, tř. Kpt. Jaroše 14

big.alda@seznam.cz

Abstrakt:

Při studiu struktury materiálů se v současné době využívá elektronové mikroskopie, která výrazně přesahuje možnosti optické mikroskopie. Dosahovaná zvětšení jsou až 800000. Podstatou zobrazení je interakce emitovaného svazku elektronů s atomy v krystalové mřížce. Přes náročnost přípravy vzorků a částečně destruktivní charakter metody nachází elektronová mikroskopie široké uplatnění v mnoha vědních oborech.

1. Úvod

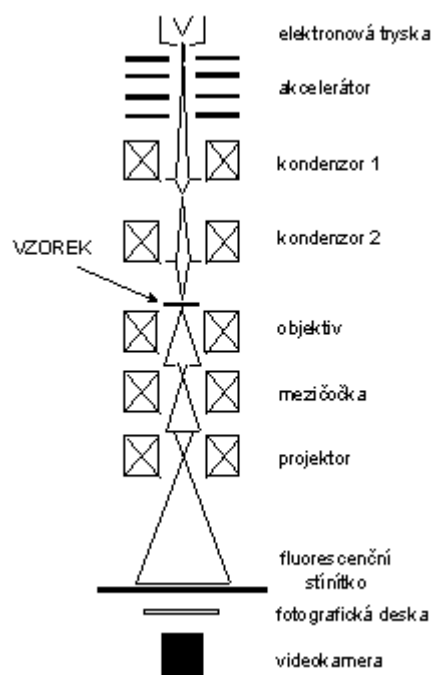
Se zvyšujícími se požadavky na nové materiály vyvstal před vědci problém, jak se dostat hlouběji do nitra hmoty. Ačkoli je dnes optická mikroskopie rozvinutým odvětvím, má svoje omezení. Nehodí se ke zkoumání na atomární úrovni, protože můžeme pozorovat pouze objekty větší než je vlnová délka světla. Velký význam pro rozvoj fyziky měl objev rentgenového záření. Jeho vlnová délka je sice srovnatelná s meziatomovými vzdálenostmi, ale nedovoluje přímé zobrazení krystalové mřížky. K vynálezu elektronového mikroskopu přispěly významnou měrou dva objevy: magnetická čočka a fakt, že elektron s dostatečně

velkou energií má vlnovou délku ekvivalentní vzdálenosti atomů, lze ho tedy použít k jejich zkoumání.

2. Elektrony a difrakce

Elektronový mikroskop

Prozařovací elektronový mikroskop (TEM) využívá k zobrazení preparátu zaostřený svazek elektronů. Ten je emitován z wolframové katody a urychlován vysokým napětím. Dále je zaostřován magnetickými čočkami a velkou rychlostí dopadá na vzorek. Při urychlovacím

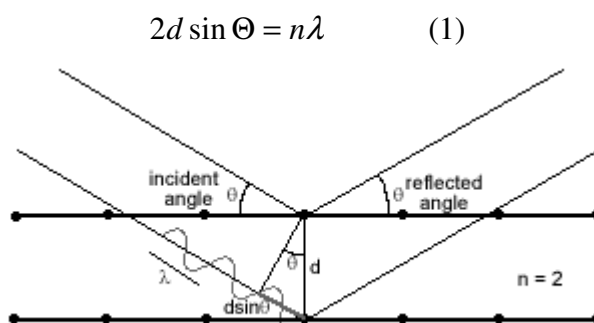


Obr 1. Schéma elektronového mikroskopu

napětí 200 kV je rychlost elektronů až $0,7c$ a při konstrukci čoček se tak musí počítat i s relativistickými efekty. Magnetické čočky mají stejné druhy vad jako čočky optické, ale nedají se kompenzovat. Svazek tak musí mít malý průměr. Po průchodu elektronů vzorkem je obraz pozorován na luminiscenční stínítko nebo snímán CCD kamerou. Aby nedocházelo k interakcím elektronů s atmosférou, je v elektronovém mikroskopu udržováno vakuum. Vzorek v tomto typu mikroskopu musí být dostatečně tenký, aby jím elektrony prošly ($10 \div 500 \text{ nm}$) [3].

Difrakce v krystalech

Difrakce, neboli rozptyl elektronů v krystalu, vzniká tehdy, když odkloněné elektrony spolu konstruktivně interferují [2]. A to nastane právě tehdy, když platí Braggův zákon (1), obr. 2:



Obr. 2. Braggův zákon

Při průchodu elektronového svazku vzorkem jsou elektrony ovlivňovány jednotlivými atomy v krystalové mřížce. Při vhodném nastavení systému tak můžeme na stínítku pozorovat difrakční obrazce, ze kterých se potom dá určit typ krystalové struktury materiálu.

Při průchodu paprsku monokrystalem difrakční obrazce vytváří síť bodů, při průchodu polykrystalem to jsou soustředné kružnice.

Strukturní faktor

K vyhodnocení difrakce je potřeba znát strukturní faktor F_{hkl} krystalu. Strukturní faktor je součet amplitud vln rozptýlených jednotlivými atomy:

$$F_{hkl} = \sum_{n=1}^N f_n e^{2\pi i(hu+kv+lw)} \quad (2)$$

Každá krystalová struktura má jiný strukturní faktor:

BCC (kubická prostorově centrovaná): $F_{hkl} = f_1 + f_2 e^{\pi i(h+k+l)}$

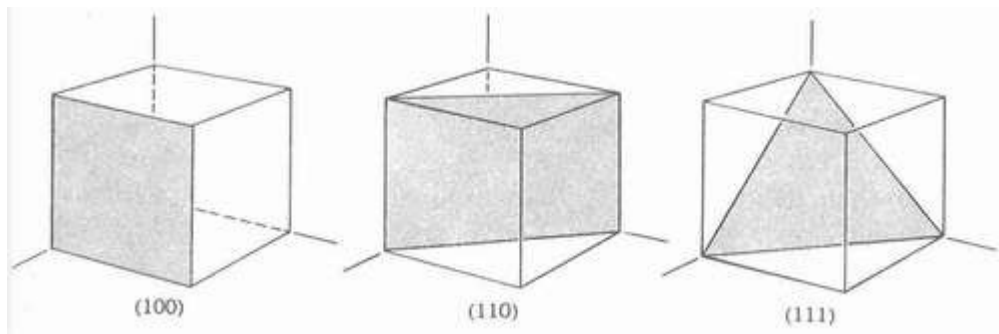
Pokud $h+k+l=2n+1$, pak se jedná o destruktivní interferenci vln a intenzita svazku je nulová.

Pro $h+k+l=2n$ jde o konstruktivní interferenci a intenzita svazku je maximální.

FCC (plošně centrovaná): $F_{hkl} = f \left[1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(k+l)} + e^{\pi i(h+l)} \right]$

Konstruktivní interference vznikne pouze tehdy, když koeficienty h , k , l jsou všechny sudé nebo všechny liché.

Pozn.: Koeficienty h, k, l určují krystalovou rovinu (hkl):



Obr. 3: Příklady krystalových rovin

Určování typu krystalové mřížky

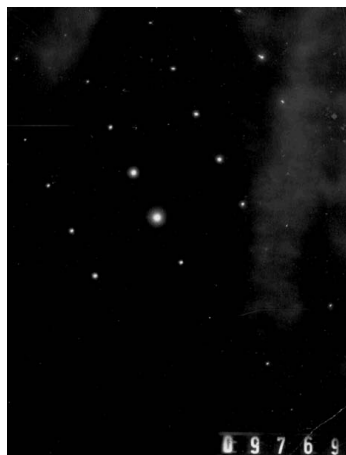
Ze snímků získaných mikroskopem na MFF UK jsme určovali:

- směr dopadajícího elektronového svazku na monokrystal zlata [1]
- typ krystalové struktury různých polykrystalů

Ad a)



[001]

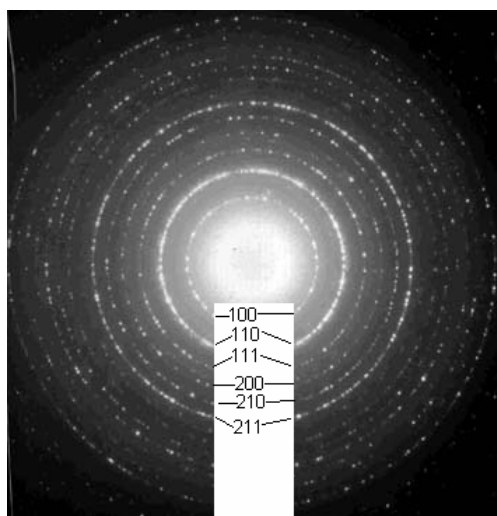


[113]

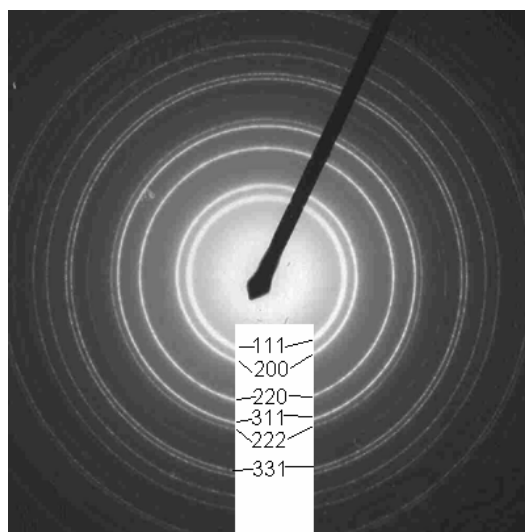


[114]

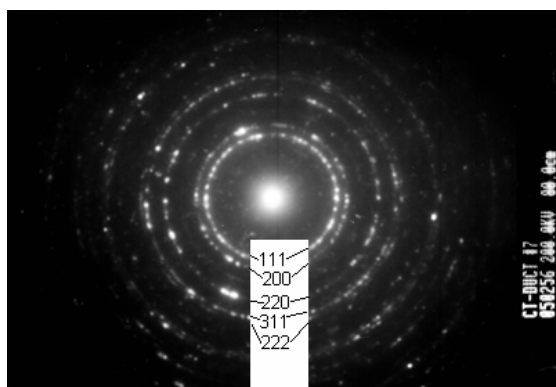
Ad b)



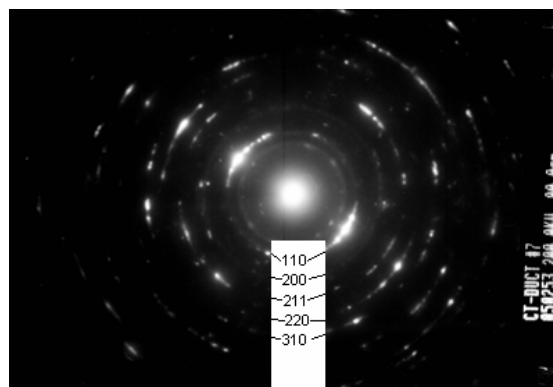
TiCl (sc – primitivní)



Al (fcc – kubická plošně centrovaná)



Ni (fcc – kubická plošně centrovaná)



α -Fe (bcc – kubická prostorově centrovaná)

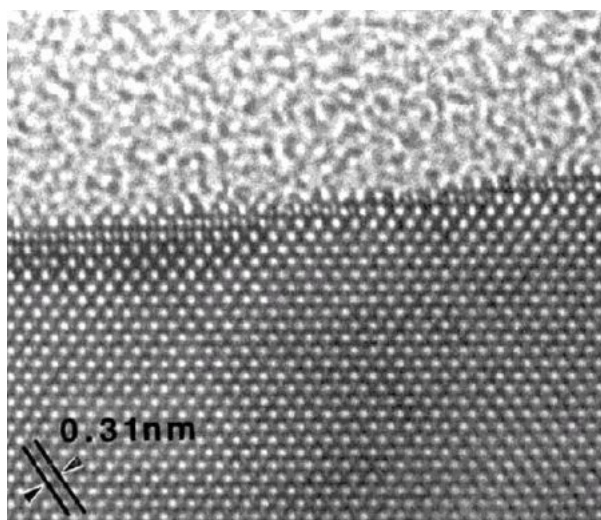
Popisky u jednotlivých kroužků odpovídají různým indexům rovin. Zjistili jsme je pomocí měření průměrů kroužků, dále s pomocí vzorců (3) a (4) a tabulky rovin (hkl= 100, 110, 111, 200, 210, 211, 220, 221, 222, 300, 311, 321, 400, 331)

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3)$$

$$Rd_{hkl} = \lambda L = konst. \quad (4)$$

Zobrazení atomů

Interference elektronových vln se dá také využít pro zobrazení jednotlivých atomů v krystalu, pokud mikroskop bude dostatečně stabilní a elektronový svazek koherentní. Vzorek také musí být velmi tenký (30 až 50 nm) [3]. Při splnění těchto podmínek můžeme dosáhnout zvětšení 600 000 - 800 000 \times .



Obr. 4 Vrstva křemíku a SiO₂

3. Shrnutí

Elektronová mikroskopie se uplatňuje v řadě vědních oborů od chemie až po fyziku. Používá se pro studium vnitřní krystalické struktury materiálů (v případě vysokorozlišovací elektronové mikroskopie i ke studiu atomární struktury materiálů). Výzkum nových materiálů by byl bez elektronové mikroskopie ztížen. Dalším významným oborem v němž je využívána je studium poruch materiálů a tím přispívá ke zvýšení bezpečnosti mnoha strojů a staveb.

Poděkování

Děkujeme Vojtovi Svobodovi a FJFI za organizaci FYZTYDu, RNDr. Dr. Miroslavu Karlíkovi za předvedení elektronového mikroskopu a přípravu materiálů, Kubovi za náhradu supervizora, sobě a nakonec panu Einsteinovi za rok fyziky.

Reference:

- [1] SMOLA, B.: *Transmisní elektronová mikroskopie ve fyzice pevných látek* Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1983, Tabulka IV 158-159.
- [2] KITTEL, CH.: *Úvod do fyziky pevných látek* Academia, 1985, 21, 73
- [3] KARLÍK, M.: *Rozhledy matematicko-fyzikální* Jednota českých matematiků a fyziků, 1995, Pohled na atomy: vysokorozlišovací elektronová mikroskopie 215-222.