

Laboratorní úloha č. 7 – Difrakce na mikro-objektech

Úkoly měření:

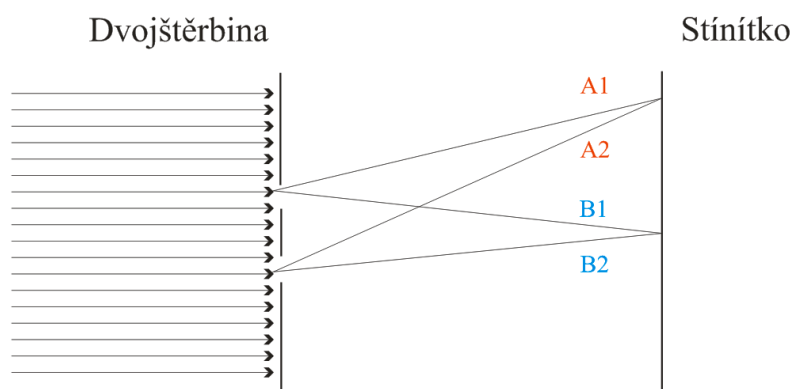
1. Odhad rozměrů mikro-objektů z informací uváděných výrobcem.
2. Záznam difrakčních obrazců (difraktogramů) vzniklých interakcí laserového záření s mikro-objekty.
3. Stanovení charakteristického rozměru mikro-objektu pomocí analýzy difraktogramů.

Použité pomůcky a přístroje:

Laserový modul s červeným a zeleným světlem, držák mikro-objektů, mikro-objekty, stínítko, délkové měřidlo.

Teorie:

Difrakce záření je fyzikální jev, k jehož objasnění již nepostačuje pouhá geometrická optika. Přestože je difrakce zjednodušeně označována jako lom světla, nelze ji vysvětlit klasickým odrazem a lomem světla, ale je třeba uvažovat vlnový charakter světla. Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění o vlnových délkách z intervalu 400 - 750 nm. Experimentálně byl vlnový charakter světla prokázán Thomasem Youngem v roce 1801, schematicky znázorněným na Obr. 1. V Youngově pokusu dopadá svazek rovnoběžného monochromatického (tj. se majícího stejnou vlnovou délku) záření na dvojici štěrbin. Dopadající záření se při průchodu štěrbinami rozdělí na dvě vlny, které kmitají se stejnou fází. Podle Huygensova principu se vlnění prošlé každou z této dvojice štěrbin šíří všemi směry. Pokud bude dráhový rozdíl vln dopadajících na stínítko roven sudému násobku (2, 4, 6, ...) poloviny jejich vlnových délek, bude docházet ke konstruktivní interferenci (skládání vln) a výsledkem bude vznik tzv. maxima. V případě, že bude dráhový rozdíl roven lichému násobku (1, 3, 5, ...) poloviny jejich vlnových délek, bude na stínítku pozorováno tzv. minimum [1].



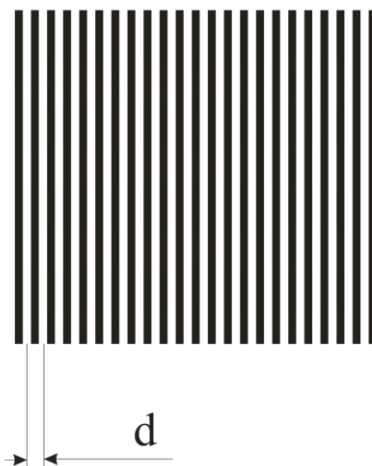
Obr. 1 Youngův pokus. Paprsky A1 a A2 urazí ke stínítku různou dráhu, výsledek interference bude záviset na konkrétním dráhovém rozdílu vln. Paprsky B1 a B2 urazí stejnou vzdálenost, dráhový rozdíl je nulový a výsledkem je konstruktivní interference a vznik maxima.

S teorií difrakce úzce souvisí Heisenbergův princip neurčitosti. Ten říká, že poloha y a hybnost p jedné libovolné částice mohou být stanoveny pouze s konečnou přesností. Jinými slovy, pokud experimentálně stanovíme polohu částice s neurčitostí Δy a současně její hybnost ve stejném směru s neurčitostí Δp , musí platit rovnice (1), kde h označuje Planckovu konstantu ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ J.s).

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{h}{4\pi} \quad (1)$$

Rovnice (1) tedy říká, že pokud budeme zvyšovat přesnost stanovení polohy částice např. zmenšováním rozměru mikro-objektu (mřížky nebo štěrbin) přes který částice prochází, bude to kompenzováno snížením přesnosti stanovení hybnosti. To se projeví zvětšením stopy záření na stínítku. Tento jev lze experimentálně snadno pozorovat.

Existuje několik podmínek pro difrakci záření. Zejména musí být zaručena interakce záření s objekty o rozměrech řádově srovnatelných s vlnovou délkou použitého záření – proto mluvíme o difrakci na mikro-objektech. Těmito objekty bývají při laboratorních experimentech optické (difrakční) mřížky s charakteristickými rozměry v rozmezí 1 – 100 μm . Optickou mřížkou rozumíme soustavu rovnoběžných štěrbin, oddělených rovnoběžnými tmavými pruhy. Fyzicky může být taková mřížka realizována tiskem na transparentní polymerní fólii nebo skleněnou destičku. Vzdálenost dvou štěrbin od sebe je charakteristickým rozměrem mřížky, viz Obr. 2. Dále musí být použité záření monochromatické (tj. všechny paprsky mají stejnou vlnovou délku) a koherentní (všechny paprsky kmitají se stejnou fází) – těmito podmínkám nejlépe vyhovuje záření z laserů.



Obr. 2 Optická mřížka, charakteristický rozměr.

Při průchodu monochromatického světla mřížkou (soustavou štěrbin s konstantní vzdáleností) dochází v důsledku difrakce (ohybu) k interferenci vln procházejících jednotlivými štěrbinami. Zvolme si na mřížce dvojici sousedících štěrbin, viz Obr. 3. V případě, že je vzdálenost mezi štěrbinami zanedbatelná ve srovnání se vzdáleností mezi mřížkou a stínítkem (což je při laboratorním experimentu splněno), můžeme paprsek **A1** považovat za rovnoběžný s paprskem **A2**, viz Obr. 3, vpravo. Z toho plyne, že úhly φ , svírané paprsky s normálou k

mřížce budou stejné a paprsky lze prakticky považovat za rovnoběžné s dráhovým rozdílem Δ . Pro dráhový rozdíl potom platí vztah (2), kde d je vzdálenost štěrbin.

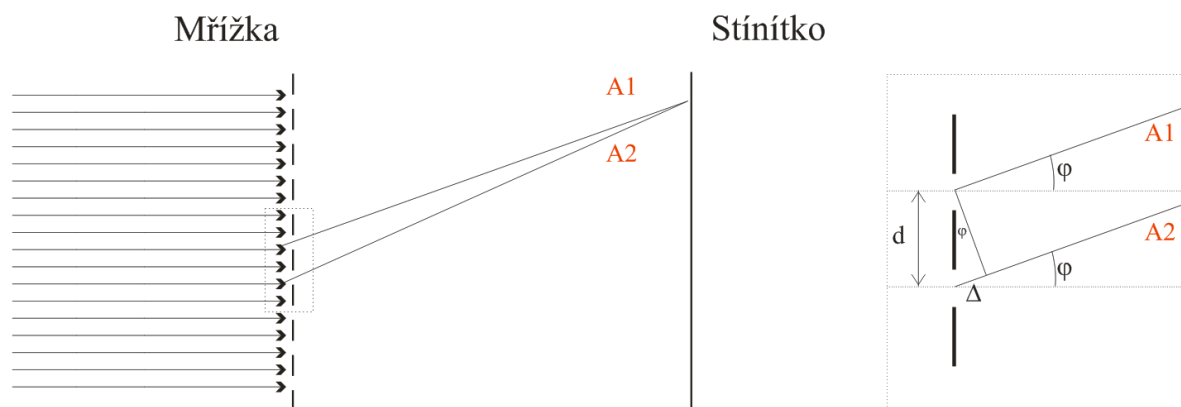
$$\Delta = d \sin \varphi \quad (2)$$

Jak již bylo uvedeno výše, maximum bude při interferenci dosaženo tam, kde bude dráhový rozdíl paprsků roven celému násobku vlnových délek (neboli sudému násobku poloviny vlnových délek), proto platí:

$$\Delta = m \lambda \quad (3)$$

V rovnici (3) označuje m celé číslo, symbolizující jednotlivá maxima. Kombinací rovnic (2) a (3) dostáváme podmínku pro polohu maxima při difrakci na mřížce:

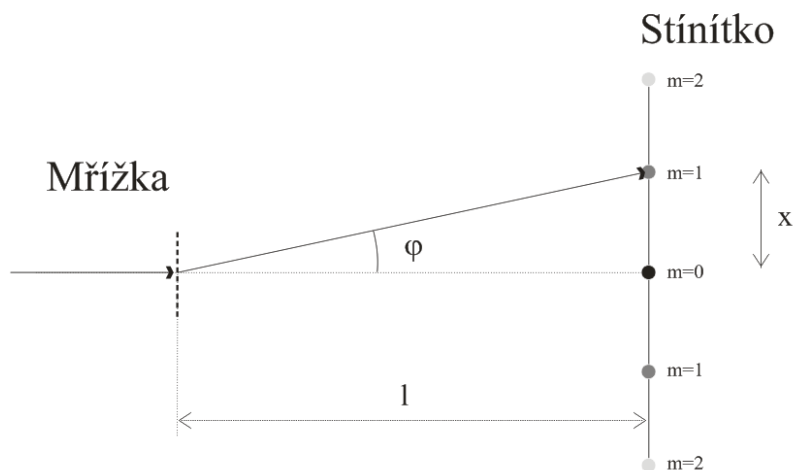
$$d \sin \varphi = m \lambda \quad (4)$$



Obr. 3 Difrakce na mřížce, vlevo ilustrační zobrazení situace, vpravo detail difrakce na konkrétní štěrbině optické mřížky.

Rovnice (4) se využívá k experimentálnímu stanovení charakteristického rozměru mřížky, d . Mřížka se umístí do vzdálenosti l od stínítka a nechá se jí procházet monochromatické koherentní záření o známé vlnové délce. Vhodným způsobem se zaznamená difraktogram na stínítka (např. obkreslení tužkou na papír přiložený na stínítka) a z polohy x jednotlivých maxim ($m = 1, 2, 3, \text{atd.}$) vůči centrálnímu maximu ($m = 0$) a vzdálenosti stínítka l se vypočítá úhel φ , viz rovnice (5) a Obr. 4.

$$\tan \varphi = \frac{x}{l} \quad (5)$$



Obr. 4 Difrakce na mřížce, stanovení úhlu φ pro maximum 1. řádu.

Pracovní postup:

1. Vyberte si tři optické mřížky, poznamenejte si jejich parametry udávané výrobcem a řádově odhadněte typický rozměr mřížky (tj. vzdálenost šterbin).
2. Vložte mřížku do držáku, do vzdálenosti l od mřížky umístěte stínítko a zapněte červený laser. Nechejte laserové záření procházet přes mřížku a dopadat na stínítko. Na stínítku si zaznamenejte vzniklý difraktogram.
3. Pro danou mřížku zopakujte experiment pro další dvě vzdálenosti l .
4. Pro danou mřížku zopakujte experiment se zeleným laserem pro další tři vzdálenosti l . Vzdálenosti nemusí být nutně stejné jako v kroku 2 a 3.
5. Zopakujte kroky 2 – 4 pro zbylé dvě mřížky.
6. Z polohy x maxima prvního a druhého řádu vypočítejte pomocí rovnic (4) a (5) vzdálenost šterbin mřížky. Srovnajte výsledky dosažené pro danou mřížku pomocí červeného a zeleného laseru a oba srovnajte s původním odhadem.

Poznámka:

Vlnová délka červeného laseru $\lambda = 635 \cdot 10^{-9}$ m

Vlnová délka zeleného laseru $\lambda = 532 \cdot 10^{-9}$ m

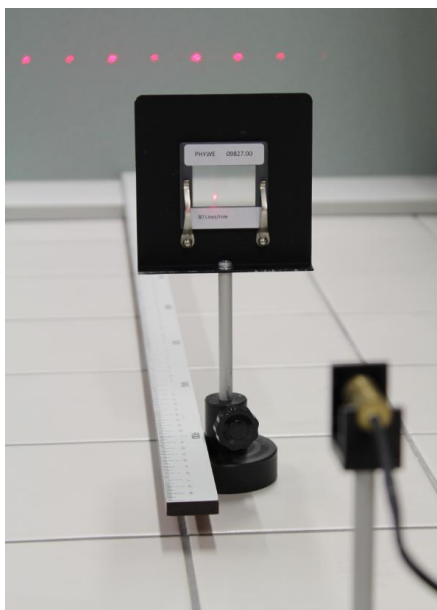
!!! Při práci s laserem buďte maximálně pozorní a opatrní. Dávejte pozor, abyste laserovým paprskem na nikoho nemířili, zejména ne na hlavu nebo do očí. Totéž platí o paprsky odražené, např. od lesklých předmětů. Zásah laserovým paprskem do oka může způsobit nenapravitelné poškození nebo dokonce ztrátu zraku !!!

Použitá literatura:

- [1] Halliday D., Resnick R., Walker J.: Fyzika, VUT v Brně, Nakladatelství VUTIUM, (2000).

Příloha: Použitá měřící aparatura

Obr. 5 Modul červeného laseru se zdrojem napájení



Obr. 6 Sestavení úlohy difrakce na mřížce – modul laseru, optická mřížka 80 čar/mm v držáku, měřítko, stínítko. Na stínítku jsou výrazně vidět maxima nultého, prvního, druhého a třetího řádu.