

Mikroskop

Mikroskop představuje jeden ze základních dvoukomponentových optických systémů, sestává tedy z objektivu a okuláru. Narozdíl od dalekohledů, objektiv i okulár mikroskopu jsou striktně spojky, avšak podobě jako hvězdářské dalekohledy je mikroskop konstruován tak, aby (při pozorování neakomodovaným okem) zaostřil předmět v jedné konkrétní vzdálenosti. Narozdíl od dalekohledů však předmět neleží v nekonečnu, ale těsně před objektivem. Přesná poloha předmětu zpravidla není pro uživatele důležitá, k jejímu nastavení dojde pohybem vzorku při současném pozorování obrazu. V okamžiku maximální ostrosti je vzorek zastaven.

Cílem mikroskopu je dosáhnout vysokého zvětšení pozorovaného objektu, v tomto ohledu je mikroskop vylepšením lupy, u které je technicky možno dosáhnout pouze zvětšení relativně malých (cca 15x-20x). Myšlenka optického designu mikroskopu pak spočívá v pokusu nepozorovat lupou přímo předmět, ale jeho již (před)zvětšený obraz. Toto primární zvětšení je úkolem objektivu, který poskytuje zvětšený skutečný obraz předmětu v mezirovině uvnitř tubusu.

Uvažujme tedy matice pro objektiv a okulár jako tenké čočky, oddělené vzduchovou mezerou. Coby lupa, okulár o ohniskové vzdálenosti f_{ok} zvětší meziobraz poskytovaný objektivem d/f_{ok} krát, kde d je konvenční zraková vzdálenost. Zbývá tedy určit, jaké zvětšení poskytne objektiv, celkové zvětšení mikroskopu pak bude logicky součinem těchto dvou zvětšení.

Za tímto účelem vyšetříme průchod světla objektivem. Uvažujme předmět ve vzdálenosti a před objektivem o ohniskové vzdálenosti f_{ob} , který, v souladu se zobrazovací rovnicí, vytvoří obraz ve vzdálenosti a' za objektivem.

Situaci (na vzduchu) odpovídá celková matice

$$\mathbf{M} = \mathbf{T}' \Phi_{ob} \mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & a' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_{ob} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a' \varphi_{ob} & a - aa' \varphi_{ob} + a' \\ -\varphi_{ob} & 1 - a \varphi_{ob} \end{pmatrix}$$

Snadno se ukáže, že pravý horní člen v matici je přímo zobrazovací rovnice, a tedy se při zaostření obrazu anulují. Potom pro chod světla v takovém případě zbývá

$$\begin{pmatrix} h' \\ n'\gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - a' \varphi_{ob} & 0 \\ -\varphi_{ob} & 1 - a \varphi_{ob} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ n\gamma \end{pmatrix}.$$

Z této soustavy lze určit příčné zvětšení při zobrazení, jako

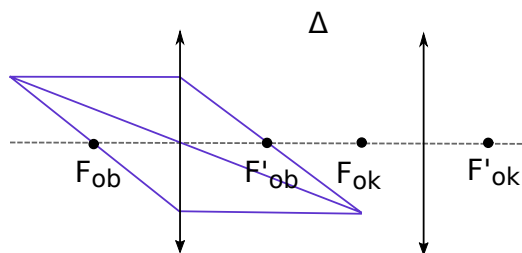
$$\frac{h'}{h} = 1 - a' \varphi_{ob} = 1 - \frac{a'}{f_{ob}}.$$

Tento výraz se značně zjednoduší, pokud zavedeme vzdálenost Δ , o kterou se obraz vytvoří za ohniskem objektivu: $a' = f_{ob} + \Delta$. Potom

$$\frac{h'}{h} = 1 - \frac{f_{ob} + \Delta}{f_{ob}} = -\frac{\Delta}{f_{ob}}.$$

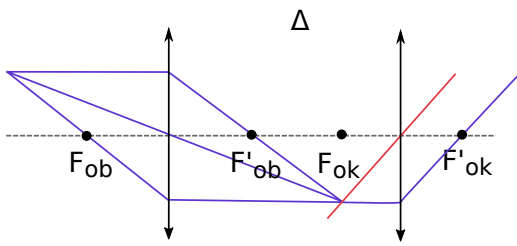
Veličina Δ se nazývá tubusová vzdálenost a její zavedení není samoúčelné. Jednak díky ní zvětšení objektivu nabývá formálně stejného tvaru jako zvětšení okuláru, přičemž Δ přebírá roli konvenční zrakové vzdálenosti, a jednak je potřeba uvědomit si, že má-li okulár (coby lupa) poskytovat rovnoběžný svazek pro pozorování neakomodovaným okem, musí být okulár umístěn svým předmětovým ohniskem právě do roviny, ve které vznikl meziobraz. Tubusová vzdálenost nám tak zároveň udává vzdálenost mezi ohnisky objektivu a okuláru.

Z těchto důvodů je každý mikroskop z optického hlediska popsán třemi parametry: ohniskovými vzdálenostmi objektivu a okuláru, a tubusovou vzdáleností.



Při konstrukci zobrazení mikroskopem v zásadě nejprve vytvoříme zobrazení objektivem a následně aplikujeme zobrazení okulárem. K tomu je potřeba zdůraznit, že konstrukce meziobrazu není triviální v tom smyslu, že z náhodně zvolené polohy předmětu nedojde k vytvoření obrazu ve správném místě (tedy v ohniskové rovině okuláru). Musíme tedy vždy buďto osadit schema okulárem až teprve poté, co zkonstruujeme meziobraz, nebo, pokud jsme již celé schema zakreslili předem, musíme začít

konstruovat zpětně od meziobrazu, čímž se dopracujeme ke správné poloze předmětu.



zkonstruovat. V souladu s očekáváním (předmět pozorovaný lupou je v jejím ohnisku) jsou paprsky za okulem rovnoběžné.

V případě konstrukce obrazu okulem postupujeme standardním způsobem. Pro konstrukci můžeme přímo využít paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou, zbývající dva paprsky nejsou použitelné. Abychom konstrukci mohli dokončit musíme si jeden paprsek doplnit, v tomto případě paprsek procházející středem okule. Protože víme, že i tento paprsek musel projít meziobrazem vytvořeným objektivem, je jeho poloha jednoznačně dána, i když jeho průchod objektivem neumíme přímo

Narozdíl od samotné lupy poskytuje mikroskop užitečné zvětšení až na hranici difrakčního limitu. Zpravidla se jedná o maximální hodnotu kolem 1000x, od které bychom sice obraz mohli ještě dále zvětšovat, ale nezískávali bychom již nové detaily, pouze bychom viděli homogenně rozmazané difrakční stopy. Jak bylo ukázáno výše, celkové zvětšení mikroskopu se dá zapsat jako

$$\beta = \beta_{ob}\beta_{ok} = \frac{\Delta}{f_{ob}} \frac{d}{f_{ok}}$$

a změna zvětšení mikroskopu je tak extrémně pohodlná - máme-li sadu objektivů a okulárů o různých zvětšeních, snadno se jejich postupnými výměnami zvládneme přesouvat na škále zvětšení, konkrétní hodnota je vždy dána jejich součinem.

Jelikož okulár ve své podstatě je lupa, typické hodnoty jeho zvětšení bývají 5x,10x,15x, hodnoty zvětšení objektivu pak zpravidla bývají v řádu 20x, 50x, 100x.