

ČOČKY S PROMĚNNOU OHNISKOVOU VZDÁLENOSTÍ

Variable optical Components

Ing. Pavel Kajnar

Abstrakt: Single element optical systems are nowadays used very seldom due their limited optical properties. Possible solution can be the use of the variable optical components. Without need of movable mechanical parts and currently keeping small dimensions it's possible to get optical systems with variable focal length in wide range with just one optical element.

Key word: liquid, fluidic, lens, electrowetting, variable focal length, membrane

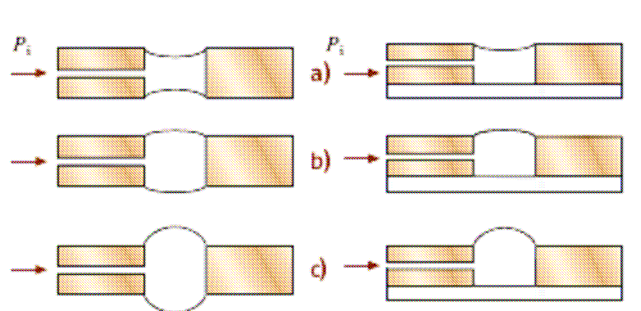
1. Úvod

Jednoprvkové optické systémy jsou v současné době využívány pouze v malém množství aplikací s nízkými požadavky na vlastnosti optického zobrazení. Sklo jako materiál pro výrobu optických prvků je v současné době co se kvality týče stále nejlepší možnou volbou. Jakmile je však čočka jednou vyrobena a vložena do sestavy, není dále možné žádným způsobem měnit její parametry. Často požadovanou vlastností však bývá možnost změny ohniskové vzdálenosti optické soustavy. Konstrukce takových soustav potom musí umožňovat vzájemnou změnu polohy jednotlivých optických členů a ve většině případů také zařazení členů dalších. Díky těmto skutečnostem obsahují tyto soustavy velké množství optických i mechanických částí, s čímž samozřejmě souvisí nárůst jejich velikosti, hmotnosti a v neposlední řadě také ceny. V určitých aplikačních oblastech (v současnosti se jedná převážně o objektivové čočky ve fotoaparátech mobilních telefonů, kamer nebo objektivy endoskopů apod.), kdy hlavním požadavkem je přijatelný optický výkon při zachování mechanické odolnosti a co nejmenších rozměrů, lze klasické optické prvky nahradit tzv. prvky kapalinovými, umožňující dosažení změny optické mohutnosti pouze změnou vlastního tvaru bez nutnosti použití dalších pohyblivých mechanických částí.

2. Kapalinové čočky

Historie čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností sahá do počátku 17. století, kdy britský fyzik Stehen Gray sestavil mikroskop pomocí kapek vody o průměru jen přibližně 0,3mm, díky čemuž byl vliv gravitační síly na křivost kapky zanedbatelný [2]. Kapky byly usazeny v desce s miniaturními otvory, přičemž různé průměry otvorů vedly k různým křivostem povrchu vodních kapek a tím k různým hodnotám zvětšení. V tomto případě byl tvar kapky „řízen“ pouze velikostí otvorů, ve nichž byly kapky usazeny. Z hlediska variability

je však tento způsob podobný klasické optice, kdy je tvar kapky předurčen právě daným otvorem. Na Obr.1 je zobrazena další metoda, kdy tvar povrchu kapky je ovlivňován na kapku působícím tlakem. I tento způsob provedení variabilních čoček však obsahuje převážně nevýhody, jako je např. možnost narušení tvaru kapky vnějšími vlivy (nejčastěji odpařováním) a není tak možné zajistit zachování potřebných vlastností po delší dobu [1].



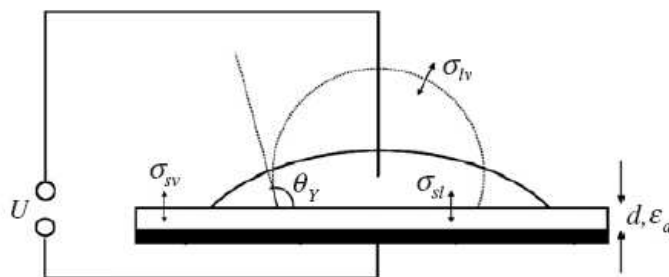
Obr. 1 Různé tvary kapalinových čoček, závisující na tlaku p_i a kapilárních silách

3. Electrowetting

V překladech můžeme tento jev definovat jako smáčivost povrchu v závislosti na přivedeném napětí, někdy je pak také používán pojem „elektrozvlhčování“. Podstata tohoto jevu spočívá ve smáčivosti kapky na pevném povrchu v závislosti na přivedeném napětí, kterou vyjadřuje Young – Lippmannova rovnice [3]

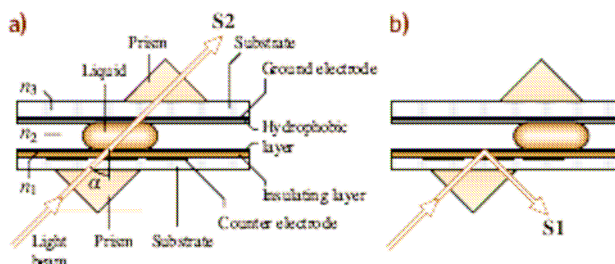
$$\cos \theta = \cos \theta_Y + \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{2 \cdot d \cdot \sigma_{IV}} \cdot (U - U_{pzc})^2 \quad (3.1)$$

kde d je tloušťka dielektrické vrstvy, ϵ_r relativní permitivita dielektrické vrstvy, σ_{IV} povrchové napětí rozhraní kapalina-vzduch, θ_Y úhel normály kapky bez přivedeného napětí, U přivedené napětí a U_{pzc} je velikost napětí, samovolně vznikajícího ponořením některých materiálů do roztoku elektrolytu.



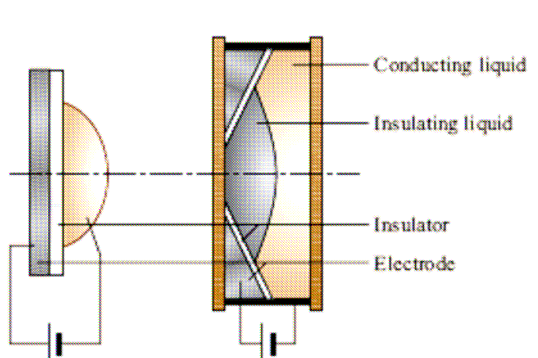
Obr. 2 – Základní podstata jevu „elektrozvlhčování“

V okamžiku přivedení napětí dochází ke zvětšení povrchu, který je kapkou smáčen a tím ke změně jejího tvaru. Kromě tohoto principu je možné electrowetting využít také pro pohyb kapek uvnitř elektrody, kdy pohybuje se kapka neslouží jako zobrazovací prvek, ale jako pomocný nástroj plnící funkci elektrooptického přepínače (Obr. 3) [4]



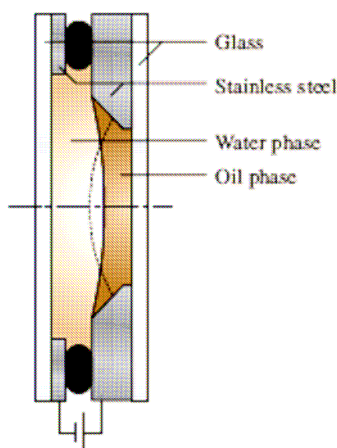
Obr. 3 – Schéma elektrooptického prepínače, fungujícího na principu „elektrozvlhčování“

Výše popsaný princip je však vhodný pouze pro malé rozměry kapek, kdy je vliv gravitační síly na jejich tvar zanedbatelný. Další nevýhodou je potom umístění elektrody přímo do světelného svazku, což má za následek vznik nežádoucí difrakce a reflexí. Abychom odstranili výše popsané nevýhody, bylo třeba do systému zavést další tekutinu (nevodivou), sloužící zároveň také jako ochranná vrstva. Tato musí být nemísitelná s vodivou tekutinou a měla by mít v ideálním případě stejnou hustotu a rozdílný index lomu. Schéma takové čočky v porovnání s předchozí verzí (jen s jednou tekutinou) je uvedeno na Obr. 4 [1].



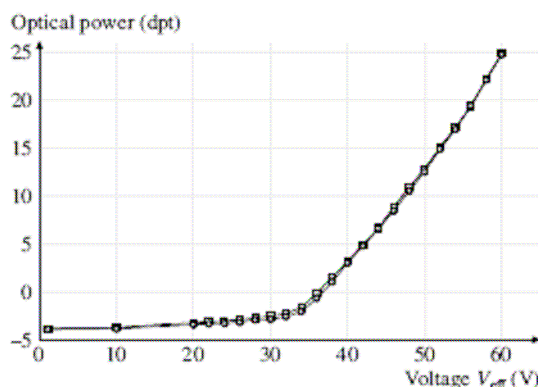
Obr. 4 – Porovnání dvou způsobů provedení kapalinových čoček

Jako izolující kapalina bývá nejčastěji používán nepolární olej, vodivou tekutinou potom nejčastěji bývají vodné roztoky soli. Jak již bylo uvedeno dříve, hustoty obou kapalin by měly být v ideálním případě totožné, v praxi potom stačí, jestliže se jejich hodnoty shodují s přesností 10^{-3} g/cm^3 . Tímto je zajištěna odolnost čočky proti nárazům a vibracím. Schematický příklad provedení skladby čočky je uveden na Obr. 5 (Varioptic).



Obr. 5 – Schematická skladba kapalinové čočky fy. Varioptic

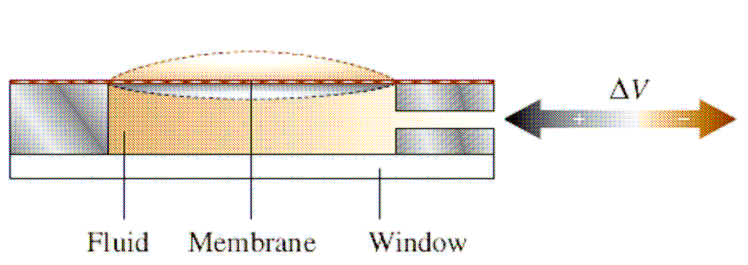
Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou těchto prvků je schopnost měnit svou ohniskovou vzdálenost pouze změnou přivedeného napětí. Obvyklý průběh optické mohutnosti v závislosti na přivedeném napětí je uveden na Obr. 6. Např. firma Varioptic uvádí garantovaný optický rozsah $(-2 \div 10)dpt$ u modelu Arctic 314 [6] a $(-5 \div 13)dpt$ u modelu Arctic 416 [5]. Udávaný garantovaný počet změn optické mohutnosti se zachováním požadovaného tvaru povrchu se potom pohybuje v řádu 10^6 při rychlostí změny okolo 10 ms pro čočku o průměru 2,5 mm (Varioptic) [7].



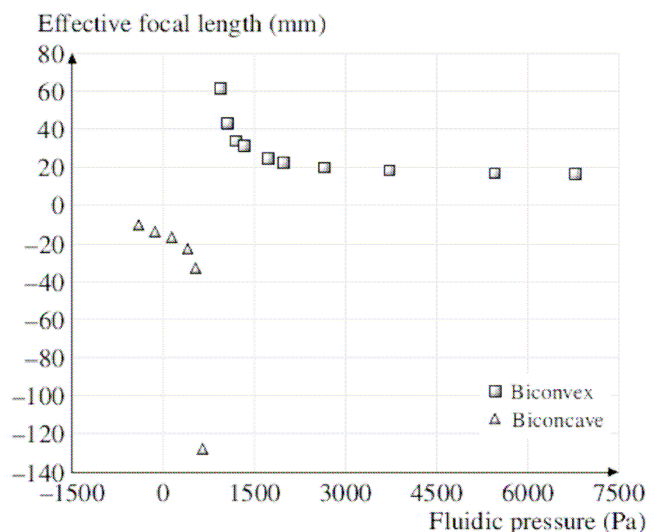
Obr. 6 – Závislost optické mohutnosti na přivedeném napětí

4. Membránové čočky

První pokusy o výrobu čočky s proměnnou ohniskovou vzdáleností s využitím membrány spadají do počátku 19. století. [8]. Schéma takové čočky je uvedeno na Obr. 7. Tekutina o indexu lomu přibližně 1,5 ohraničená ze tří stran pevným prostředím a uzavřena pružnou membránou vytváří plano – konvexní/konkávní čočku o průměru $0,5 \div 20mm$, přičemž je možné vyrobit také pole těchto mikročoček [9]. Jako materiál pro výrobu membrány slouží polydimethylsiloxan (PDMS), příp. polyvinylidenchlorid, polyetylen nebo polvinylchlorid a její tloušťka se pohybuje mezi 10 až $100\mu m$. Tlak uvnitř čočky je řízen napětím ovládaným pístem a nabývá hodnot v rozsahu přibližně -1 až 6,7 kPa. Optická mohutnost se pohybuje v mezích -20 až 16 dpt (Obr. 8).

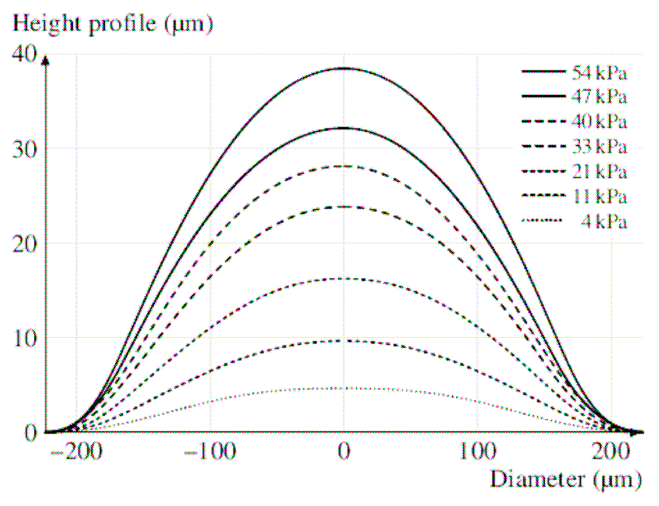


Obr. 7 – Základní schéma membránové čočky



Obr. 8 – Průběh ohniskové vzdálenosti membránové čočky v závislosti na vnitřním tlaku

I přes svou zdánlivou jednoduchost není tento princip fungování v současné době zcela zvládnutý, přičemž největší problémy jsou způsobeny právě membránou samotnou, a to především nelineárním průběhem jejího průhybu a způsobem uchycení. Tyto dva faktory mají největší vliv na výsledný, zatím ne zcela dokonalý tvar povrchu. Průběhy průhybu membrány pro vybrané hodnoty tlaku uvnitř čočky jsou uvedeny na Obr. 9.



Obr. 9 – Průběhy průhybu membrány pro vybrané hodnoty tlaku uvnitř čočky

5. Závěr

Kapalinové čočky nemají v současné době zatím za úkol nahrazení klasických čoček skleněných. Jedná však o vhodnou alternativu určenou k použití v místech, kde je kladen důraz na malé rozměry při dosažení přijatelných zobrazovacích vlastností, dnes převážně objektivy fotoaparátů mobilních telefonů, objektivy levných webových kamer apod. Membránové kapalinové čočky jsou pak i přes svou více než stoletou historii stále v počátcích

vývoje a jejich přechod z laboratoří do komerční výroby bude pravděpodobně ještě nějakou dobu trvat .

References

- [1] TRÄGER, Frank, et al. Springer Handbook of Lasers and Optics. [s.l.] : Springer Science + Business Media, LLC New York, 2007. 1332 s. ISBN 978-0-387-95579-7
- [2] GRAY, Stephen. Philosophical Transactions (1683-1775). Vol. 19. [s.l.] : [s.n.], 1695. A Letter from Mr. Stephen Gray, Giving a Further Account of His Water Microscope, s. 353-356
- [3] MUGELE, Frieder, BARET, Jean - Christophe. Electrowetting: from basics to applications. Journal of Physics: Condensed Matter. 2005, Matter 17, s. 705-774. Dostupný z WWW: <http://www.iop.org/EJ/article/0953-8984/17/28/R01/cm5_28_R01.pdf?request-id=c436722a-ce8e-48a8-80a7-85b455f44ccb>
- [4] GINDELE, Frank, KOLLING, Thomas. Optical systems based on electrowetting. In Proc. SPIE, Vol. 5455. [s.l.] : [s.n.], 2004. s. 89-100.
- [5] MADS - 070902 - ARCTIC 416 [online]. 2007 [cit. 2009-05-09]. Dostupný z WWW: <http://www.linos.com/pages/mediabase/original/MADS_-_070902_-_ARCTIC_416_5034.pdf>.
- [6] MADS - 071130 - ARCTIC 314 [online]. 2008 [cit. 2009-05-09]. Dostupný z WWW: <http://www.linos.com/pages/mediabase/original/MADS_-_071130_-_ARCTIC_314_6587.pdf>.
- [7] GABAY, Claude, et al. Danymic study of a Varioptic variable focal lens. In FISCHER, Robert E., SMITH, Warren J., JOHNSON, R. Barry. Proc. SPIE, Vol. 4767 : Current Developments in Lens Design and Optical Engineering III. Seattle, USA : SPIE, 2002. s. 159-165. Dostupný z WWW: <http://www.varioptic.com/res/documents/Dynamic_study.pdf>.
- [8] GRAHAM, Robert. J. Opt. Soc. Am. Vol. 30. [s.l.] : [s.n.], 1940. Issue 11. A variable focus lens and its use, s. 560-563.
- [9] WERBER, Armin, ZAPPE, Hans. Applied Optics. Vol. 11. [s.l.] : [s.n.], 2005. Issue 16. Tunable microfluidic microlenses, s. 3238-3245.

Kontaktní adresa

ČVUT v Praze, Fakulta Strojní, Technická 4, 16607 Praha, Česká republika, tel 739 382615,
E-mail: pavel.kajnar@fs.cvut.cz