

Zobrazení v IR oblasti s využitím termocitlivých fólií

ZDENĚK BOCHNÍČEK

Přírodovědecká fakulta MU, Brno, Kotlářská 2, 611 37

Úvod

Pokusy s infračerveným zářením se staly tématem již několika příspěvků na minulých ročnících Veletrhu nápadů. V demonstračních experimentech můžeme infračervené záření detekovat v podstatě třemi způsoby:

1) Fotodiodou [1]. V oblasti p-n přechodu fotodiody vzniká absorpcí IR záření elektrické napětí. Pro demonstrační účely je vhodné jej převést na akustický signál. Fotodiody je pouze bodový detektor a neposkytuje informaci o prostorovém rozložení infračerveného záření.

2) Digitálním fotoaparátem nebo videokamerou [2,3]. Citlivost křemíkového CCD nebo CMOS čipu, kterým jsou běžné přístroje standardně vybaveny, sahá až po vlnovou délku záření asi 1,1 μm , tedy do blízké infračervené oblasti (absorpční hrana křemíku). U barevných přístrojů je tato vlastnost nežádoucí a citlivost v IR oblasti je snížena absorpčním filtrem, který je umístěn před vlastním snímačem (případně je již nanesen na samotném čipu). Levné černobílé kamery často filtr nemají a jsou pro tyto účely vhodnější. Ideální je videokamera, která je vybavena režimem IR nočního vidění, při kterém se absorpční filtr vysouvá. Pokusy s videokamerou jsou velmi působivé, některé však vyžadují dobře zatemněnou místnost. Určitou nevýhodou může být skutečnost, že IR záření je zviditelněno přístrojem – “černou skříňkou” a vlastní fyzikální princip je skryt.

3) Termocitlivými fóliemi [4]. Fólie využívají tepelných účinků IR záření, nejsou tedy omezeny absorpční hranou použitého polovodičového materiálu. Na druhé straně měřitelný ohřev fólie získáme pouze s intenzivními zdroji IR záření. Za velkou výhodu lze považovat skutečnost, že experimenty nevyužívají žádnou „černou skříňku“, nepotřebují zatemnění a jsou velmi názorné.

V tomto článku se budeme věnovat pouze experimentům s termocitlivými fóliemi. Příspěvek je doplněním a rozšířením příspěvku z Veletrhu nápadů č. 12 [4].

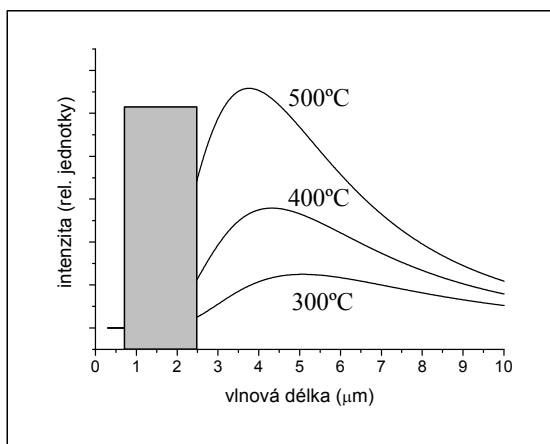
Termocitlivé fólie, někdy zvané teplotní nálepky, jsou komerčně běžně dostupné jako orientační snímače teploty. Pro níže popsané experimenty jsou nejvhodnější velké fólie o rozměrech 30×30 cm^2 , které získáme za cenu cca 700 Kč [5]. Malý rozsah teplot je na jedné straně zárukou vysoké citlivosti, na druhé straně komplikuje experimenty v případě, kdy se teplota v učebně mění. Pro spolehlivé použití fólií za různých teplotních podmínek je nutné mít několik kusů různého teplotního rozsahu.

Použití skleněné optiky pro IR záření

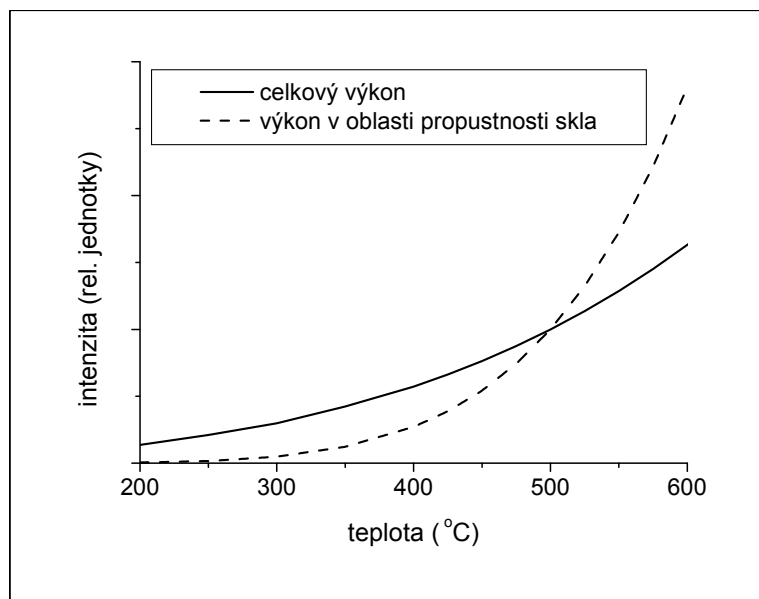
Běžné prvky skleněné optiky jsou konstruovány pro viditelnou oblast elektromagnetického spektra a mají jen omezené možnosti zpracovávat jiné druhy záření. Je všeobecně dobře známo, že běžné sklo nepropouští UV záření, přesněji: propouští jen velmi úzkou oblast těsně sousedící s viditelným světlem. V této části spektra je záření pohlcováno elektronovými přechody. V IR oblasti je situace složitější a propustnost velmi kolísá. IR záření je pohlcováno kmity krystalové mřížky a propustnost klesá pro různé druhy skel v oblastech od $2,5 \mu\text{m}$ do $4 \mu\text{m}$ [6]. Absorpční spektra různých druhů skel jsou dostupná, obvykle však nevíme, z jakého skla jsou vyrobeny čočky, které máme k dispozici. V dalším tedy budeme počítat s nejméně příznivou variantou, kdy sklo začíná pohlcovat IR záření již od vlnových délek $2,5 \mu\text{m}$.

Je zřejmé, že tento fakt je velmi nepříznivý: hlavním cílem většiny níže uvedených experimentů je zobrazovat tepelné záření těles, které zanedbatelně září ve viditelné oblasti, tedy do cca $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Při těchto teplotách však většina vyzařované energie leží v dlouhovlnné IR oblasti, pro niž jsou skleněné čočky nevhodné. Situace je dobře patrná z obrázku 1, na kterém je spektrální hustota vyzařování dokonale černého tělesa podle Planckova zákona pro vybrané teploty. S růstem teploty nejen roste celková vyzářená energie (Stefanův Boltzmannův zákon), ale celá křivka se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám (Wienův posunovací zákon). V důsledku toho zářivý výkon v oblasti propustnosti skla s teplotou velmi prudce roste. Kvantitativně to znázorňuje obrázek 2, kde je srovnána teplotní závislost celkové vyzářené intenzity a její části omezené pouze na oblast, kde sklo záření propouští. Pro lepší přehlednost jsou křivky normovány na intenzitu při teplotě $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Z obrázku je zřejmé, že zářivý výkon, který máme k dispozici po průchodu běžnou skleněnou optikou, roste s teplotou mnohem rychleji než se čtvrtou mocninou absolutní teploty, se kterou roste celkový vyzářený výkon.

Z výše uvedených výpočtů plyne, že zobrazit tepelné zdroje IR záření běžnou optikou je možné pouze je-li jejich teplota dostatečně vysoká, téměř $500 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž každých $10 \text{ }^\circ\text{C}$ navíc zřetelně usnadňuje provedení experimentu. Musíme se tak pohybovat na samé hranici teplot, kdy objekt již začíná vyzařovat viditelné světlo.



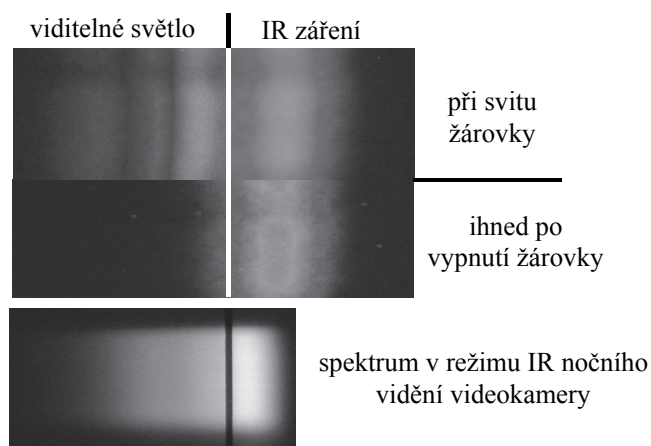
Obr. 1. Záření černého tělesa pro tři vybrané teploty. Šedá oblast vyznačuje část spektra, která dobře prochází sklem.



Obr. 2. Srovnání celkové vyzářené intenzity a intenzity vyzářené v oblasti do $2,5 \mu\text{m}$ vlnové délky. Křivky jsou normovány na intenzitu při teplotě $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zobrazení IR spektra

Pomocí termocitlivé fólie lze dosáhnout zobrazení části IR záření žárovky. Použijeme klasické uspořádání hranolového spektrometru. Zdrojem záření by měla být co nejsilnější žárovka. Ideální je lineární halogenová žárovka, která poskytuje vysoký jas v podlouhlém vlákně. Lineární zdroj světla již nevyžaduje štěrbinu – čočkou zobrazujeme přímo samotné vlákno. V tomto uspořádání získáme o dva až tři řády vyšší intenzitu ve srovnání se situací, kdy bychom použili stejně výkonnou klasickou halogenovou žárovku a štěrbinu.



Obr. 3. Zobrazení spektra žárovky na termocitlivou fólii a jeho srovnání s IR obrazem z videokamery [7].

Pro přesvědčivé znázornění přiložíme k termocitlivé fólii umístěné na stínítku bílý papír, na kterém čarou označíme červený kraj viditelného spektra. Po jisté době ozářování stínítka se fólie v předpokládané IR části spektra ohřeje a zřetelně změní barvu. Po vypnutí zdroje záření vidíme, že v místech, kam dopadalo viditelné světlo se fólie prakticky neohřála, viz obrázek 3. To je v souladu s dobře známou skutečností, že většina energie vyzařované žárovkou je v IR části spektra. Zajímavé je porovnání rozsahu spektra IR záření zaznamenaného na fólii a pomocí kamery s IR nočním viděním [7]. Fólie detekuje záření mnohem dále, nejméně do vlnové délky $2,5 \mu\text{m}$, zatímco citlivost kamery končí přibližně u $1,1 \mu\text{m}$ vlnové délky.

Zobrazení horkého objektu

Z výše uvedeného textu je zřejmé, že při snaze zobrazit horký objekt obyčejnou skleněnou optikou potřebujeme, aby teplota povrchu tělesa byla blízká $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Této teploty dosahuje například plotýnka spirálového elektrického vaříče (ale nikoliv vaříče s rovnou souvislou plotýnkou). Elektrický vaříč má však značný celkový zářivý výkon, který nežádoucím způsobem ohřívá celé okolí. Lepší výsledky získáme s topnými tyčemi, například z elektrických grilů. Pokud nechceme amatérsky upravovat nějakou součást elektrického spotřebiče, můžeme zakoupit tzv. elektrický zapalovač dřevěného uhlí – obnažená topná tyč s profesionálním bezpečnostním krytím. Příklad zobrazení zapalovače pomocí termocitlivé fólie je na obr. 4. Vidíme, že obraz je převrácený, stejně jako při zobrazení v optickém oboru.



Obr. 4. Obraz zapalovače dřevěného uhlí. Povrchová teplota zdroje $500 \text{ }^\circ\text{C}$, čočka s průměrem 12 cm a ohniskovou délkou 24 cm, přibližně symetrické uspořádání polohy předmětu a obrazu. Postříbřená část je kontrastnější než ostatní části (viz dále).

Vliv emisivity

Reálné zdroje záření za dané teploty vyzařují menší zářivý výkon než dokonale černá tělesa, mají tedy emisivitu menší než 1. V IR oblasti je emisivita všech izolantů vysoká a blízká emisivitě dokonale černého tělesa. A to bez ohledu na to, jsou-li ve viditelné oblasti světlé nebo tmavé. Kovové lesklé povrchy na druhé straně mají emisivitu vždy nízkou. Toto ukazuje experiment na obr. 5. Zoxidovaná plotýnka vaříče má vysokou emisivitu. Ústa a kulaté oko jsou natřeny stříbrenkou, která má emisi-

vitou nízkou (přibližně 0,25). Křížek na místě druhého oka je z bílé žáruvzdorné barvy. I když je bílý, jeho emisivita v IR oblasti je vysoká. Při zobrazení na termocitlivou fólii jsou proto kulaté oko a ústa mnohem více kontrastní, než křížek.



Obr. 5. Vaříč s motivem a jeho obraz. Obraz je pouze náčrt. V černobílém podání fotografie není patrný žádný kontrast. Při pozorování prostým okem je však pokus přesvědčivý.

Překvapivě odlišný efekt pozorujeme, pokud stříbřenkou natřeme část topné tyče zapalovače. Elektrický příkon podél tyče můžeme považovat za konstantní. Snížení emisivity povrchu tedy znamená zvýšení teploty příslušné části tyče. I když celkový vyzářený plošný výkon musí být v ustáleném stavu nezávislý na emisivitě povrchu, v části pokryté stříbřenkou je větší část emitovaného spektra v krátkovlnné oblasti, a proto větší část emitovaného záření prochází skleněnou čočkou. Toto je zřejmé i na obrázku 3, kde obraz stříbřenkou pokryté části (pravý meandr předmětu, levý meandr obrazu) je jasnější, než obraz zbylé části topného tělesa.

Literatura

- [1] Tokar J.: Zařízení pro pokusy s infračerveným světlem. Veletrh nápadů učitelů fyziky 4. Příbram 1999
- [2] Bochníček Z.: Amatérská videokamera jako detektor infračerveného záření. Veletrh nápadů učitelů fyziky 10. Praha 2005.
- [3] Polák Z.: Náměty na experimenty s infračerveným zářením. Veletrh nápadů učitelů fyziky 15. Praha 2010.
- [4] Bochníček Z., Strumienský J.: Pokusy s ultrafialovým a infračerveným zářením. Veletrh nápadů učitelů fyziky 13. Plzeň 2008.
- [5] http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=LCS_LABELS&Nav=temf01.
- [6] TIE-35: Transmittance of optical glass. Dostupné online: http://www.schott.com/advanced_optics/german/download/schott_tie-35_transmittance_october_2005_en.pdf.
- [7] Bochníček Z.: An amateur video camera as a detector of infrared radiation. *Physics Education*. vol. 43, no. 1, p. 51-56.