

Amatérská videokamera jako detektor infračerveného záření

ZDENĚK BOCHNÍČEK

Katedra obecné fyziky Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Příspěvek popisuje několik experimentů využívajících amatérskou videokameru pro detekci infračerveného (IR) záření. Některé z nich jsou tak jednoduché, že je lze využít i při výuce na základní škole. Jiné vyžadují složitější interpretaci a mohou se tak stát dobrým doplňkem výkladu vysokoškolského.

Úvod

Vždy je výhodou, pokud si student či žák může probíranou látku konfrontovat se svou zkušeností, případně pokud lze při výkladu zapojit vlastní smysly. Ty oblasti, kde názorná představa chybí, jsou pro pochopení těžší. Například elektřina a magnetismus patří k nejobtížnějším a nejméně oblíbeným disciplínám. S elektrickým napětím, proudem, či polem nemáme přímé smyslové zkušenosti, a tak i jednoduché vztahy a souvislosti, jako třeba Ohmův zákon, jsou chápány obtížně. Proto každý experiment, který zpřístupní lidským smyslům jinak nepozorovatelnou část fyzikální reality, je velmi cenný. Pomocí některých amatérských videokamer můžeme snadno zviditelnit část IR spektra a získat tak názornou pomůcku pro výuku optiky, fyziky mikrosvětla i fyziky pevných látek.

Níže uvedené experimenty jsou přibližně uspořádány dle rostoucí náročnosti provedení a interpretace.

Amatérská videokamera

Snímací prvek amatérské videokamery i digitálního fotoaparátu je tvořen tzv. CCD čipem – integrovaným obvodem vyrobeným na monokrystalickém křemíku. Spektrální citlivost této součástky, tedy schopnost registrovat elektromagnetické záření různých vlnových délek, je poněkud odlišná od citlivosti lidského oka a zasahuje více do infračervené oblasti (viz příloha). Pro běžné využití kamery při snaze o věrné zobrazení snímané scény je tato vlastnost nežádoucí a vedla by ke zkreslení barevného podání obrazu. Proto se před CCD čip předkládá filtr, který IR záření absorbuje, a tak přibližuje vlastnosti snímacího prvku lidskému oku. Videokamery, které jsou vybaveny režimem tzv. nočního vidění, umožňují filtr vysunout. Tím se jednak zvýší citlivost kamery a jednak lze snímanou scénu osvětlit „neviditelným“ IR zářením a získat obraz i za úplné tmy¹.

¹ Toto platí pro kamery s režimem NightShot umožňujícím snímat zcela ve tmě. Nejmodernější kamery s tzv. barevným nočním viděním (Digital NightScope), dosahují nočního vidění zvýšením citlivosti ve viditelné oblasti bez použití IR záření.

Infračervená LED dioda

Kombinace CCD čipu a IR absorpčního filtru však není věrnou kopií vlastností oka. O tom se můžeme přesvědčit jednoduchým experimentem. Namíříme libovolný IR dálkový ovladač na kameru a stiskneme některé tlačítko. V obrazu z kamery (bez režimu nočního vidění) zřetelně vidíme záblesky z infračervené LED diody dálkového ovladače, i když pouhým okem nevidíme nic. LED diody dálkových ovladačů pracují ve velmi blízké IR oblasti (cca 0,85 – 0,95 μ m), kde lidské oko již není citlivé, ale IR filtr před CCD čipem nedokáže toto záření zcela absorbovat.

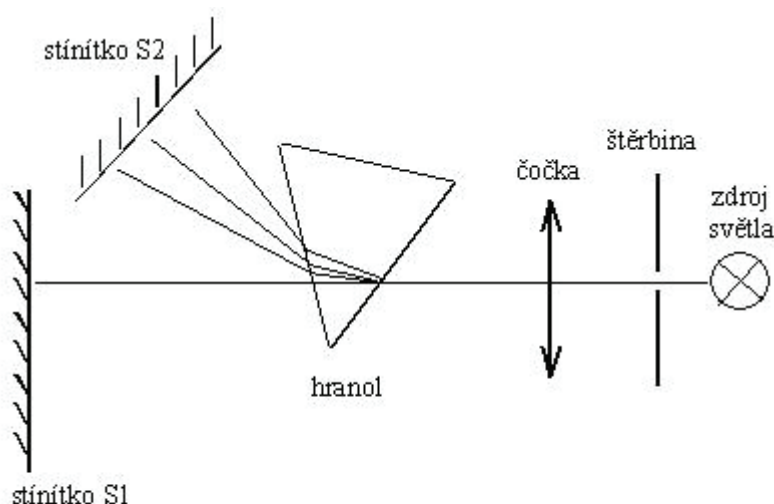
Spektrum žárovky v IR oblasti

Nyní je třeba se přesvědčit, že právě IR záření je to, co kamera vidí navíc oproti lidskému oku. Zatímco předchozí experiment lze provést i za denního světla, k tomuto pokusu je třeba dobře zatemněná místnost. Použijeme standardní uspořádání spektroskopu, ve kterém demonstrujeme například rozklad světla hranolem. Jedna z možností je na obr. 1. Jako zdroj světla použijeme nejlépe halogenovou žárovku, která je intenzivním zdrojem viditelného a IR záření. Spojnou čočkou nebo korigovanou optickou soustavou nejprve zobrazíme svislou štěrbinu na pomocné stínítko S1, které je přibližně stejně vzdálené od stolku pro optický hranol, jako stínítko S2, na kterém očekáváme obraz rozloženého spektra. Poté vložíme do svazku optický hranol a nastavíme jej do polohy minimální deviace. Na světelné spektrum zamíříme videokameru, nejprve bez zapnutého režimu nočního vidění². Tmavým fixem (ne červené barvy) vyznačíme na stínítku červený okraj viditelné oblasti. K tomuto účelu je dobré nalepit na stínítko čistý bílý papír. Nyní zapneme mód nočního vidění³. Zcela zřetelně pozorujeme, že kamera „vidí“ mnohem dál za vyznačený červený konec spektra. Umístíme-li nyní do IR části spektra například ruku, kamera ji zobrazí velmi dobře osvětlenou, i když při pozorování pouhým okem je ruka zcela ve tmě.

Nyní můžeme regulací napájení žárovky měnit její teplotu a sledovat vyzařované spektrum. Zřetelně pozorujeme, jak při poklesu teploty ubývá kratších vlnových délek, zatímco IR oblast je dotčena jen málo, což je v kvalitativní shodě s Planckovým vyzařovacím zákonem. Pokud snížíme napájecí napětí žárovky tak, že jen mírně žhne, můžeme si dovolit namířit kameru přímo na vlákno žárovky. Dalším snižováním napětí lze dosáhnout situace, kdy pouhým okem již vlákno svítit nevidíme, ale IR záření z něj vycházející je kamerou stále detekováno. Tento experiment není příliš vhodné prezentovat jako demonstrační, vlákno je třeba očima sledovat z bezprostřední blízkosti. Může se však uplatnit v praktiku nebo zájmovém kroužku.

² Je výhodné vypnout automatické ostření kamery a zaostřit manuálně, pokud to přístroj umožňuje.

³ Pokud při zapnutí režimu kamera automaticky rozsvítí infračervené LED diody, je třeba tyto předem zastínit, například přelepením kovovou fólií nebo tmavou lepicí páskou.



Obr. 1: Rozklad světla hranolem

IR reflektor

V dalším experimentu můžeme využít IR reflektoru, kterým je pro noční vidění kamera vybavena, případně jej doplnit dalším reflektorem z IR LED diod, který lze zakoupit nebo jednoduše vyrobit. Svítíme do temné učebny neviditelným IR zářením a pomocí kamery s nočním viděním pozorujeme jasný obraz. Tento experiment již není tolik překvapivý, protože jej řada studentů zná z běžné práce s amatérskou videokamerou. V kombinaci s předchozími demonstracemi však má svou cenu a ukazuje praktické využití IR citlivosti CCD čipu s již osvojenou znalostí jeho principu.

Absorpce záření v křemíku a GaAs

K provedení následujícího experimentu budeme potřebovat hůře dostupný prvek – křemíkovou desku, nejlépe oboustranně leštěnou. Křemík je polovodič temně šedé barvy s kovovým leskem, v běžných tloušťkách zcela neprůhledný. Křemík má absorpční hranu v blízké infračervené oblasti, a proto je pro infračervené záření průhledný (viz příloha), Vzhledem k tomu, že CCD čip kamery je tvořen křemíkovým integrovaným obvodem, klesá citlivost čipu právě tam, kde roste propustnost křemíku jako takového. Přesvědčíme se nyní, že videokamera vidí i přes křemíkovou desku. Výstupní otvor halogenové lampy překryjeme křemíkovou deskou a nejprve ukážeme, že prostým okem nelze pozorovat žádné záření prošlé přes desku. Potom na zakrytou halogenovou lampu zaměříme videokameru. I bez zapnutého režimu nočního vidění je zřetelné, že světlo žárovky trochu prosvítá. Při přepnutí do nočního vidění se deska stává prakticky průhlednou a získáme velmi dobré zobrazení žárovky i vnitřku lampy. Experiment je možné modifikovat s různými zdroji světla, velmi působivé je zobrazení hořící svíčky, jejíž plamen dokonce osvětlí blízkou ruku či tvář. Na druhé straně světlo z tzv. úsporné žárovky je v křemíkové desce absorbováno sil-

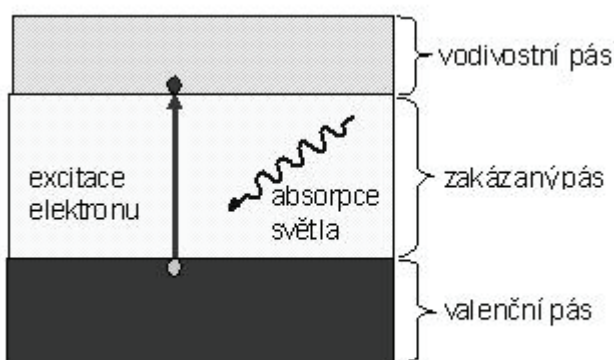
ně. Důvodem je to, že se nejedná o žárovku, ale o výbojku, v jejímž spektru není na rozdíl od žárovky IR záření výrazněji zastoupeno.

Křemík je jen jedním z řady známých a prakticky využívaných polovodičů. Jednotlivé polovodiče se od sebe liší šířkou zakázaného pásu a tedy i polohou absorpční hrany. Arsenid galitý GaAs (obvykle nazývaný galium arsenid) má zakázaný pás široký 1,43 eV [2], čemuž odpovídá absorpční hrana 0,86 μ m. Průhledné okno GaAs je tedy blíže viditelné oblasti, než v případě křemíku. Deska z GaAs je z pomoci CCD čipu ještě lépe průhledná, než Si. Přesvědčíme se o tom následujícím pokusem. Upevníme Si a GaAs desky na plochu vedle sebe tak, aby k sobě jednou rovnou hranou těsně přiléhaly. Posvítíme na ně zezadu světlem žárovky a zepředu je snímáme videokamerou. Zřetelně pozorujeme rozdíl v jasnosti mezi Si a GaAs částí, způsobený odlišnou propustností obou materiálů v blízké IR oblasti.

Existence absorpční hrany, jako rozmezí dělicí oblastí vyšší a nižší absorpce, je pro optické vlastnosti nekovových pevných látek typická. Jeden příklad je všeobecně dobře známý: ultrafialové záření je v obyčejném skle absorbováno, takže přes sklo se slunečním světlem neopálíme. Větší vlnové délky elektromagnetického záření (zde viditelné světlo) sklem procházejí, ale kratší vlnové délky nad absorpční hranou sklo pohltí.

Příloha: Absorpce elektromagnetického záření v křemíku a citlivost CCD čipu

Podmínkou detekce záření kterýmkoliv detektorem je absorpce fotonu v určité části struktury detektoru. To platí pro lidské oko, fotografický film i moderní CCD čip,

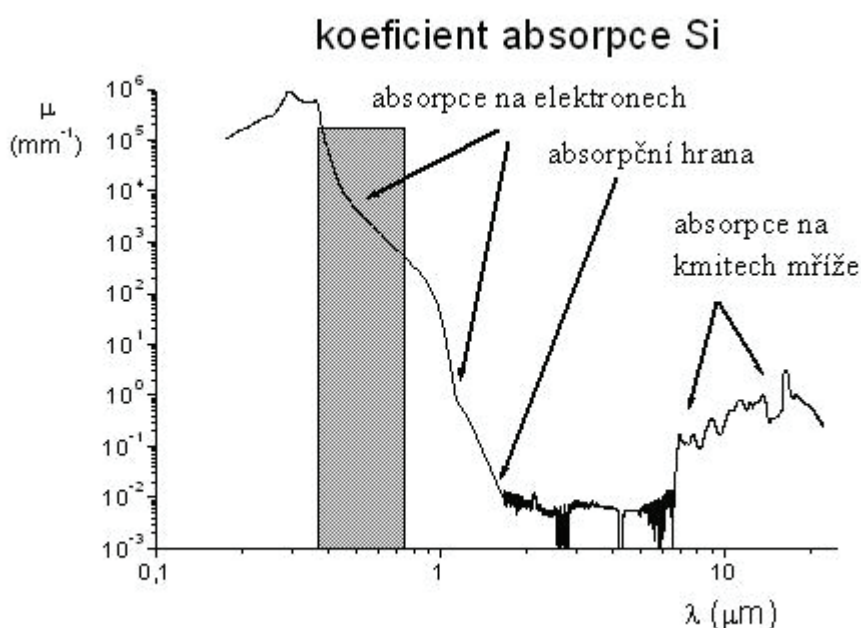


Obr. 2: Excitace elektronu absorpcí fotonu.

kterým jsou vybaveny současné videokamery a digitální fotoaparáty. Struktura CCD čipu je integrována na monokrystalickém křemíku, citlivost CCD čipu pro detekci elektromagnetického záření je tedy omezena na ty oblasti spektra, ve kterých křemík záření absorbuje, navíc specifickým způsobem: excitací elektronu z valenčního do vodivostního pásu (viz obr. 2).

Křemík je polovodič s šířkou zakázaného pásu 1,11 eV, fotony s energií menší (tedy s vlnovou délkou větší než 1,1 μ m) nemohou elektrony excitovat a nejsou proto křemíkem tímto mechanismem absorbovány. V absorpčním spektru křemíku se tak objeví tzv. absorpční hrana, jako prudké zvýšení absorpce ve směru rostoucí energie fotonu (klesající vlnové délky).

Absorpční spektrum křemíku je na obr. 3. Vedle absorpce na elektronech zde vidíme i dlouhovlnnou absorpci na kmitech krystalové mříže, která je však pro citlivost CCD čipu bezvýznamná. V oblasti 1.1 – 7 μm je absorpce velmi nízká a zde je křemík prakticky průhledný. Elektronová absorpce v křemíku zasahuje do infračervené oblasti, a proto je CCD čip citlivý i na infračervené záření do vlnové délky 1.1 μm . Nárůst absorpce nad absorpční hranou je velmi strmý (svislá osa na obr. 3 je v logaritmickém měřítku). Zatímco pro záření s $\lambda = 1,5\mu\text{m}$ je polotloušťka⁴ křemíkové desky řádově stovky milimetrů, polotloušťka pro modré světlo je vrstvička tenká jen několik meziatomových vzdáleností.



Obr. 3: Absorpční spektrum křemíku, pás vyznačuje viditelnou oblast.

Literatura

- [1] Halliday D. a kol.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, Prometheus Praha, 2000.
 [2] Například <http://www.semiconductorglossary.com/>

⁴ Při absorpci klesá intenzita s tloušťkou x dle známého vztahu

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

kde I_0 je intenzita dopadajícího světla a μ koeficient absorpce, který je zobrazen na obr. 3. Polotloušťka je definována jako tloušťka, ve které se absorbuje právě polovina dopadajícího (a neodraženého) záření. Z podmínky $I = I_0/2$ snadno získáme pro polotloušťku d vztah $d = \ln 2/\mu$.