

Zdeněk Drozd, Petra Váchová

ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ



Vzdělávací modul FYZIKA

Výukový a metodický text

Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze:
aktivně, aktuálně a s aplikacemi – projekt OPPA



Praha 2012

Publikace byla vydána v rámci Operačního programu Praha – Adaptabilita (OPPA) a jeho projektu Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi. Řešiteli projektu jsou pracovníci Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze a Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

Autoři textu:

doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D., Mgr. Petra Váchová,
katedra didaktiky fyziky MFF UK v Praze

Recenzenti:

doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc.
RNDr. Stanislav Gottwald

Vydalo Nakladatelství P3K s. r. o. (www.p3k.cz) v Praze v roce 2012 v nákladu 120 ks. Vydání první.
Ze sazby dodané autory vytiskl xPrint s. r. o.
Publikace neprošla jazykovou korekturou.

© Zdeněk Drozd, Petra Váchová, 2012

© Nakladatelství P3K, 2012

ISBN 978-80-87186-82-4

OBSAH

1. Úvodem	5
1.1. K čemu lze tento materiál použít	5
1.2. Co je hlavní náplní této příručky	5
1.3. Jak příručku využít při výuce	6
1.4. Bezpečnost při práci a další obecné poznámky	7
2. Trocha teorie	9
2.1. Elektromagnetické záření ve středoškolské výuce	9
2.2. Něco málo nad rámec středoškolské fyziky (Fermatův princip)	9
2.3. Geometrická optika	10
2.4. Vlnová optika	15
3. Pokusy z geometrické optiky	17
3.1. Mezní úhel, index lomu a rychlost světla	17
3.2. Vady zobrazení	17
4. Pokusy z vlnové optiky	19
4.1. Něco na úvod – pokusy s vlnostrojem	19
4.2. Měření rychlosti světla a indexu lomu	23
4.3. Pokusy s mikrovlnami	28
4.4. Spektra výbojek a dalších zdrojů světla	33
4.5. Elektromagnetické vlny na Lecherově vedení	39
4.6. Elektromagnetické vlny „v podání Heinricha Hertze“	42
4.7. Hrátky s viditelným i neviditelným zářením	45
5. Na hranici optiky a mikrosvěta	51
5.1 Fotoelektrický jev	51
6. Závěrem	53
Literatura	54

1. Úvodem

1.1 K čemu lze tento materiál použít

Příručka, kterou držíte v rukou, vznikla v rámci modulu Elektromagnetické záření projektu OPPA „Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi“. Chtěli bychom dostat tomuto názvu, a zaměřit se na všechna tři „a“ v názvu projektu (aktivně, aktuálně, s aplikacemi). Nabízíme náměty na aktivní činnosti, které mohou být zařazeny do výuky tématu elektromagnetické záření na gymnáziu, nebo na jiné střední škole. Aktuálnost se pokusíme zaručit vhodným výběrem témat a využitím moderních přístrojů a pomůcek. Zaměříme se i na to, jak mohou žáci aplikovat poznatky získané při experimentování podle této brožurky, když se budou snažit porozumět jevům ve svém okolí.

V brožurce naleznete několik témat z oblasti elektromagnetického záření. Krátce se vždy věnujeme teorii potřebné pro další práci s tématem a v dalším potom uvádíme náměty na experimenty vhodné pro výuku na středních školách. Náměty na experimentální činnosti jsou dvojího druhu. Jsou zde uvedeny pokusy s jednoduchými pomůckami, popřípadě s běžně dostupnými předměty jako je např. dálkový ovladač televizoru, LED apod. Tyto pokusy mohou být provedeny jako demonstrační, ale i jako frontální žákovské experimenty. Lze je také žákům zadat jako domácí experimentální úlohy, nebo jako náměty na domácí projekty.

Druhou skupinou pokusů, jimž se v brožurce věnujeme, jsou experimenty připravené pro vás v Interaktivní fyzikální laboratoři (dále jen IFL) Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze. V IFL je řada experimentů, které většinou nelze dělat přímo při výuce ve škole. Jsou to pokusy náročné na experimentální vybavení. IFL vznikla mimo jiné proto, aby takové pokusy byly středoškolákům k dispozici. Pokud se tedy rozhodnete IFL se svými žáky navštívit, tato brožurka vám bude nápomocná při přípravě na práci v této studentské laboratoři.

Brožurka je tedy jednak „inspiromatem“, který mohou učitelé používat při výuce fyziky, jednak jakýmsi manuálem k experimentálním úlohám v IFL, které se týkají elektromagnetického záření.

1.2 Co je hlavní náplní této příručky

Výuka fyziky na našich školách stále trpí nedostatkem experimentů. Ať už jde o pokusy, které mají pouze demonstrovat probírané jevy, pokusy motivační, ale i o náročnější experimenty, při kterých žáci provádí měření s jeho následným vyhodnocováním, případně sami sestavují experimentální aparaturu. Důvody tohoto stavu jsou různé. Často bývá uváděn malý počet hodin fyziky, díky němuž na pokusy nezbývá čas a často zmiňovaným důvodem bývá nedostatek pomůcek pro experimentování. Pomůcky jsou dnes pro většinu škol neúnosně drahé.

O prvním důvodu – nezařazování pokusů do výuky z důvodu malého počtu hodin fyziky, by sice bylo možné diskutovat, důvod druhý je ale faktem. Pokud ve fyzikálním kabinetu nejsou pomůcky z dřívějších a učitel se nechce spokojit pouze s experimenty s jednoduchými pomůckami, jako jsou PET lahve apod., je přístup k novým pomůckám dosti obtížný. Na trhu je sice pomůcek dostatek, jejich ceny jsou ale mnohdy těžko překonatelnou překážkou. Pomůcky za desítky, někdy i stovky tisíc si prostě běžná škola nemůže dovést. Pokud navíc vezmeme v úvahu, že příslušná aparatura by byla využívána dejme tomu jeden až dva týdny v roce, kdy je zrovna probíráno příslušné téma, je případné zamítavé stanovisko ředitele školy k nákupu takového zařízení zcela pochopitelné.

Řešení tohoto problému nabízí IFL. Ta je postupně vybavována různými aparaturami, a to i těmi, jejichž cena by pro jednotlivé střední školy byla nepřekonatelnou bariérou. Školy potom mohou IFL využívat ve své výuce. Laboratoř mohou navštěvovat učitelé se svými žáky v rámci laboratorních prací. Drahá aparatura je tak efektivně využita. Pracovníci Katedry didaktiky fyziky (KDF) MFF UK se snaží navrhnout sady experimentálních úloh tak, aby do nich byly vneseny různé nové prvky, aby to byly úlohy zajímavé a aby si žáci z návštěv IFL odnášeli zajímavé a užitečné poznatky.

V IFL jsou sice k dispozici lektoři z KDF, přesto by ale návštěva bez předchozí přípravy ze stran učitelů a jejich žáků byla málo efektivní. Čas v IFL by měl být využíván co nejvíce na samotná měření a žáci by měli již předem vědět, co je zde očekává. Učitel by měl být také dostatečně obeznámen s úlohami, na které se chystá se svou třídou přijít. Umožní mu to jejich efektivní zařazení do konceptu své výuky.

Hlavní náplní této příručky je tedy seznámení učitelů fyziky s tím, co mohou v IFL očekávat. (V případě této brožurky konkrétně, co zde očekávat ve vztahu k tématu elektromagnetické záření.) Nechtěli bychom ale vytvořit jenom jakýsi manuál k některým úlohám v IFL. Téma pojímáme do větší šířky. Úlohy, které k tomuto tématu naleznete, jsou zasazeny do širšího kontextu. Podáváme k nim teoretický výklad, uvádíme historické poznámky, pokud je to možné, tak zde naleznete náměty, jak provést improvizované varianty těchto úloh s jednoduchými, nebo běžně dostupnými pomůckami (které jsou typicky určeny k jiným účelům). Předkládáme také své náměty, jak s tématem pracovat z hlediska jeho výuky.

1.3 Jak příručku využít při výuce

Příručka Elektromagnetické záření není učebnicí tohoto tématu. Je to pomůcka, která vám chce být při výuce nápomocná a tak ji i berte. Možná si z ní vyberete nějaké náměty na jednotlivé pokusy, možná se vám bude hodit něco z teoretických, nebo historických poznámek. Jednu věc bychom vám ale přece jenom poradit chtěli.

Pokud se rozhodnete navštívit se svými žáky IFL a absolvovat některé z úloh týkajících se tématu elektromagnetické záření, potom vám příručka bude užitečným pomocníkem. Naleznete zde podrobný popis našich experimentálních aparatur a dočtete se, co od nich můžete očekávat.

Pokuste se námi nabízené úlohy co nejefektivněji zahrnout do své výuky. Aby návštěva IFL přinesla očekávané výsledky, měli by být vaši studenti předem seznámeni s příslušnými partii fyziky a měli by také tušit, co budou měřit a na co se mají zaměřit. Neváhejte se na nás obrátit, pokud vám něco není jasné. Budeme také rádi, když přijdete s návrhy na to, co vám v námi navržených úlohách chybí, co tam je podle vás naopak nadbytečné a neváhejte nám dát vědět jakýkoliv vlastní námět, který by mohl provozu IFL prospět.

1.4 Bezpečnost při práci a další obecné poznámky

V některých experimentech uvedených v této příručce budeme pracovat s různými laserovými zařízeními (měřič rychlosti světla, laserové ukazovátko, ...). Při jejich používání musíme dodržovat následující základní zásady:

- Nedívat se do směru vystupujícího paprsku z laseru.
- Dávat si pozor, aby nám do oka neposvítíl odražený laserový paprsek.
- Když s laserovým zařízením přestaneme pracovat, musíme ho vypnout.
- Nesvítit laserem (ani laserovým ukazovátkem) do očí ostatních lidí.

Podle výkonu, vlnové délky a účinků na lidský organismus se lasery na základě mezinárodních norem zařazují do několika tříd bezpečnosti. V ČR je to upraveno nařízením vlády č. 480/2000 Sb. a zákonem o ochraně veřejného zdraví č. 258/2000. Východiskem je norma ČSN EN 60285.

Tab. 1 – Klasifikace laserů

Třída	Popis
1	Lasery o malém výkonu (do 0,4 μW), všech vlnových délek. Jsou bezpečné za všech podmínek.
2	Kontinuální lasery emitující záření ve viditelné oblasti s výkonem menším než 1 mW. Proti poškození sítnice je oko dostatečně chráněno mrkacím reflexem. Předpokládá se přitom, že doba mezi zásahem oka laserovým paprskem a zavřením víčka je kratší než 0,25 s. To stačí k tomu, aby se na sítnici oka nedostala taková světelná energie, která by ji poškodila.
3a	Kontinuální lasery s výkonem menším než 5 mW. Pokud dojde k okamžité reakci oka na svazek (zavření oka, otočení hlavy) nedojde k poškození zraku. Při sledování svazku se nesmí používat žádné optické přístroje, např. dalekohled. Tyto lasery musí být označeny nálepkou CAUTION, resp. DANGER.
3b	Kontinuální lasery s výkonem 5-500 mW, nebo pulsní lasery s plošnou hustotou energie do 10 J/cm ² . Při přímém vystavení poškozují tkáň. K ochraně oka před zářením laseru této třídy již nestačí mrkací reflex. Kromě přímého pohledu může být nebezpečný i odraz paprsku.
4	Lasery o velkých výkonech (nad 500 mW), které jsou nebezpečné nejen pro oči, ale i pro pokožku. Kromě zrcadlových odrazů jsou nebezpečné i odrazy na nerovných plochách, které způsobují rozptýlení svazku.

Je dobré si uvědomit, že například obyčejné laserové ukazovátko, které můžeme koupit na tržnici, většinou patří do třídy 2.

Na závěr této kapitolky si ještě připomeňme, že před zapojením jakéhokoliv zařízení si nejprve musíme přečíst návod, nebo se poradit s lektorem. Některá použitá zařízení se nesmí zapojit přímo do zásuvky 230 V.

2. Trocha teorie

2.1 Elektromagnetické záření ve středoškolské fyzice

Ve středoškolské fyzice je učivo o elektromagnetickém záření součástí celku Optika. Žáci se seznamují se základy geometrické a vlnové optiky, tedy s oblastmi, které ukazují dva základní přístupy k popisu elektromagnetického záření (zde konkrétně viditelného světla). V učebnici optiky je zařazena kapitola „Elektromagnetické záření a jeho energie“, kde je probráno šest témat: přehled elektromagnetického záření, přenos energie zářením, elektromagnetické záření těles, záření černého tělesa, spektra látek a rentgenové záření. V učebnici optiky jsou také zařazeny teoretická cvičení a laboratorní práce, které jsou věnovány základním měřením (index lomu, ohnisková vzdálenost čočky a měření vlnové délky světla pomocí optické mřížky).

2.2 Něco málo nad rámec středoškolské fyziky (Fermatův princip)

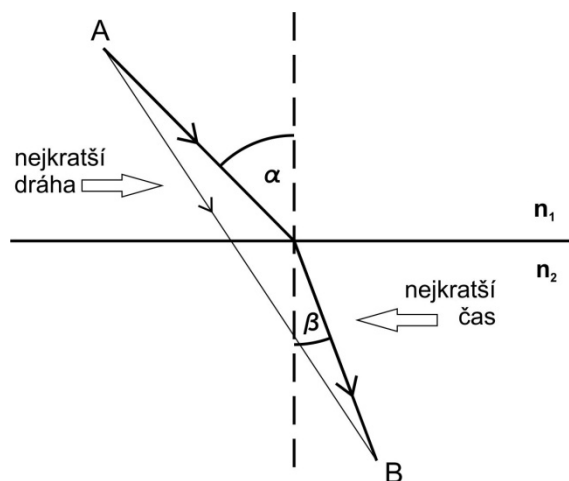
Světlo bylo vždy spojováno se řadou otázek a lidé se nad ním zamýšleli už v dávných dobách. Střídání dne a noci, stín, barvy, vidění a slepota, to byly náměty mnoha úvah, seriózního výzkumu i spekulací. Jednou ze zajímavých otázek vždy bylo, čím se světlo řídí přitom, když se šíří z místa na místo. Budeme-li si šíření světla znázorňovat pomocí paprsků, a pokud bychom se omezili jenom na situace, kdy se světlo šíří jedním prostředím s případnými odrazy, např. od zrcátek, mohli bychom usoudit, že se světlo šíří vždy po nejkratší dráze. Je to v souladu s tím, že se paprsek světla šíří mezi dvěma body přímočaře a také se zákonem odrazu světla. Tohoto faktu si podle všeho byli vědomi již starověcí učenci. Ti ale také věděli, že stačí, aby světlo procházelo ze vzduchu do vody, a pravidlo o šíření po nejkratší dráze neplatí. Často se traduje, že starověcí učenci nedělali experimenty. To je tak trochu v rozporu např. s tím, že se zachovaly starověké záznamy o měření úhlů dopadu a lomu světla ve vodě [1]. Právě z toho, že se světlo při přechodu z jednoho prostředí do druhého láme, je zřejmé, že se řídí nějakým jiným principem, než principem nejkratší dráhy.

Starověcí učenci problém lomu světla nikdy nevyřešili. Zákon lomu popsal v první polovině 17. století Willebrod Snell. Princip, kterým se přitom světlo řídí, objevil okolo poloviny 17. století Pierre de Fermat. Podle tohoto tzv. Fermatova principu se světlo šíří po takové dráze, kterou urazí za nejkratší dobu.

Na obr. 2.1 jsou zakresleny body A a B , z nichž každý je v prostředí s jiným indexem lomu n_1 a n_2 . Index lomu n_1 je menší než n_2 , to znamená, že světlo se šíří rychleji v prostředí, kde je bod A . Je zřejmé, že kdyby se světlo z bodu A do B šířilo po nejkratší dráze (tedy po přímé trajektorii), nebyla by to dráha, které odpovídá nejkratší čas přechodu z A do B . V „pomalejším prostředí“ by totiž světlo urazilo příliš velkou vzdálenost v porovnání se skutečnou cestou z A do B . Světlo si tedy najde takovou cestu, aby delší dráhu absolvovalo v rychlejším prostředí, a v prostředí

pomalejším mu zbude urazit dráhu kratší, než kdyby přešlo po přímé spojnici $A-B$. Nejkratšímu času potom odpovídá taková dráha, pro kterou je zároveň splněn Snellův zákon

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$



Obr. 2.1 – Světlo se při cestě z bodu A do bodu B šíří po dráze, kterou urazí za nejkratší čas

Pomocí Fermatova principu nejkratšího času lze např. navrhnout správný tvar čočky. Stačí si uvědomit, jaké máme na čočku požadavky a ze známé hodnoty indexu lomu skla čočky (a samozřejmě s uvážením toho, v jakém prostředí budeme čočku používat – v drtivé většině případů to bude vzduch) potom čočku navrhne. Zde v textu brožurky se nebudeme zabývat aplikacemi Fermatova principu. Naleznete je ale na přiloženém CD. Naleznete tam také konkrétní výpočet vztahující se k přechodu světla z jednoho optického prostředí do druhého, který potvrdí správnost zde popsaných úvah. O Fermatově principu se můžete více dozvědět např. v [1].

2.3 Geometrická optika

Geometrická optika je založena na poznacích o přímočarém šíření světla a nezávislosti chodu světelných paprsků. Vychází ze dvou základních zákonů, zákonu odrazu a lomu, a používá je při popisu optického zobrazení, tedy průchodu světelných paprsků čočkami, zobrazování zrcadly a jinými zobrazovacími prvky.

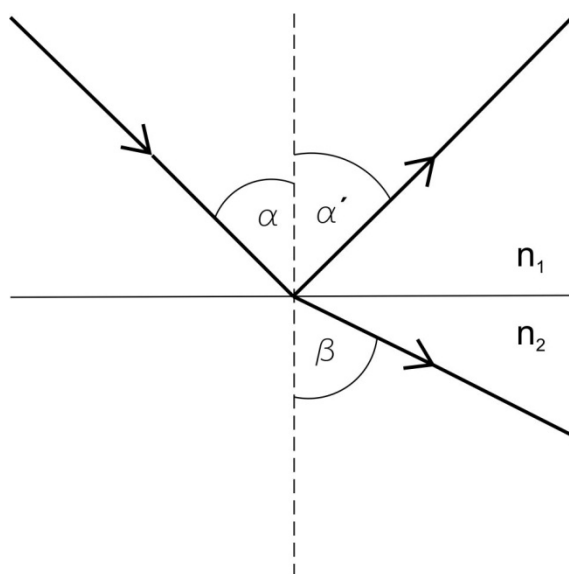
Při hodinách fyziky používáme k popisu optického zobrazení tzv. paraxiální paprsky. Jde o paprsky v blízkosti optické osy, kterými se bod zobrazuje jako bod, úsečka jako úsečka a rovina jako rovina. Takovému zobrazení se říká ideální optické zobrazení.

Skutečná optická zobrazení však nejsou realizována pouze paraxiálními paprsky, ale i paprsky, které se nacházejí dále od optické osy. Vzniklý obraz je potom různě deformován. Mluvíme o vadách zobrazení.

V následující části si připomeneme zákon odrazu a lomu a navíc se seznámíme se základními vadami optických zobrazení.

2.3.1 Zákon odrazu a lomu

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi pod úhlem α , pak se na rozhraní částečně odrazí pod úhlem α' a částečně láme do druhého prostředí pod úhlem β .



Obr. 2.2 – Odraz a lom světla na rozhraní dvou prostředí

Zákon odrazu:

Velikost úhlu odrazu se rovná velikosti úhlu dopadu, tedy $\alpha' = \alpha$. Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Zákon lomu (Snellův zákon):

Poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je pro dvě daná optická prostředí konstantní a je roven poměru rychlosti světla v_1 v prvním a rychlosti světla v_2 ve druhém prostředí, tedy

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} . \quad (2)$$

Lomený paprsek opět leží v rovině dopadu.

Index lomu n daného optického prostředí je definován jako

$$n = \frac{c}{v} , \quad (3)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a v rychlost světla v daném optickém prostředí.

Jestliže tedy světlo přechází z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 , můžeme zákon lomu napsat ve tvaru (1) použitým v kapitole 2.2.

Při porovnávání dvou optických prostředí o různém indexu lomu nazýváme prostředí o menším indexu lomu *opticky řidším* a prostředí o větším indexu lomu *opticky hustším*. Přechází-li světlo z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, nastává lom světla ke kolmici ($\alpha > \beta$). Přechází-li světlo z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí, nastává lom světla od kolmice ($\alpha < \beta$).

Při průchodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího se s rostoucím úhlem dopadu zvětšuje i úhel lomu. Při dosažení tzv. *mezního úhlu* dopadu α_m bude mít úhel lomu svou největší možnou velikost 90° . Úhel α_m je tedy maximální úhel dopadu, při němž ještě dochází k lomu světla. Při větších úhlech dopadu už se světlo jen odrazí, nastává úplný odraz.

Kde se úplný odraz (a s ním související mezní úhel) využívá? Měřením mezního úhlu můžeme zjistit index lomu látky, kterou světlo prochází. Například, zvolíme-li jako opticky řidší prostředí vakuum ($n = 1$), popř. vzduch, a jako opticky hustší prostředí látku, jejíž index lomu n chceme zjistit, platí pro mezní úhel vztah

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n}, \quad (4)$$

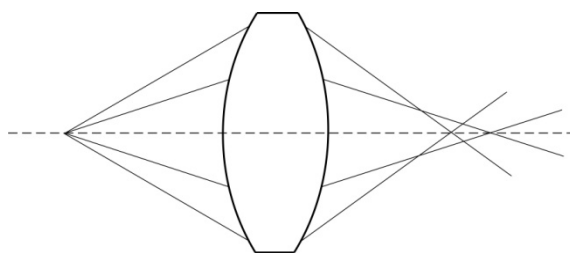
jak zjistíme z (1), když dosadíme $n_2 = 1$ a $\sin \beta = \sin 90^\circ = 1$.

Na tomto principu jsou založeny tzv. refraktometry (přístroje pro měření indexu lomu).

Úplný odraz se dále využívá u tzv. odrazných hranolů, a je také klíčem k pochopení přenosu světla optickými vlákny (viz příložené CD).

2.3.2 Vady zobrazení

Otvorová (sférická) vada

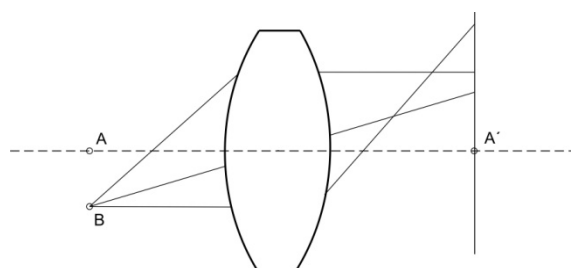


Obr. 2.3 – Otvorová vada

Otvorová vada se projevuje při zobrazení bodu na optické ose širokým svazkem paprsků. Paprsky procházející okrajem čočky se lámou více než paraxiální paprsky. Obrazem bodu potom není bod, ale rozmazaná kruhová ploška. Zostření obrazu můžeme dosáhnout zacloněním okrajových paprsků, nebo vhodnou volbou tvaru čočky. Často se také ke korekci otvorové vady používá vhodná kombinace několika čoček.

Koma

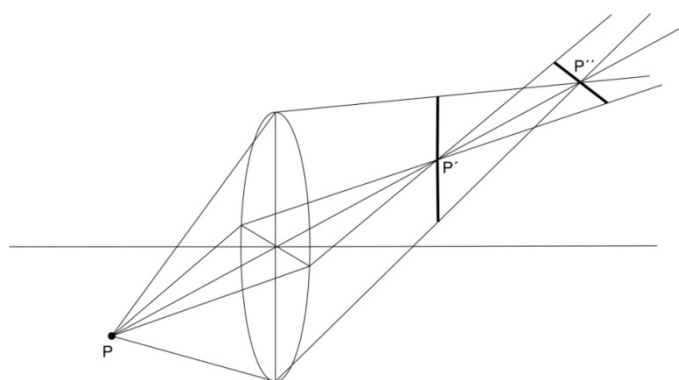
Koma vzniká při dopadu širokého šikmého svazku paprsků na čočku. Bod ležící mimo optickou osu se zobrazí jako skvrna tvaru komety s rozšiřujícím se ohonem směřujícím od optické osy. Velikost obrazu roste se vzdáleností od osy. Komu lze potlačit vhodnou volbou tvaru čočky.



Obr. 2.4 – Koma

Astigmatismus

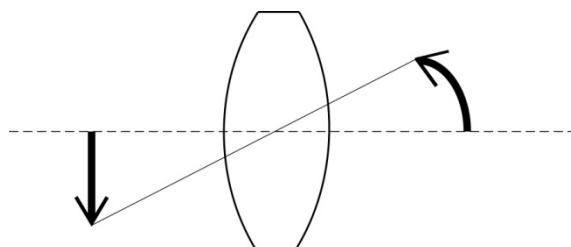
Další vadou, která se objevuje při zobrazování bodu ležícího mimo optickou osu, tentokrát ale úzkým svazkem paprsků, je tzv. astigmatismus. Paprsky vycházející z předmětového bodu a šířící se ve dvou navzájem kolmých rovinách (rovina obsahující předmětový bod a optickou osu, a rovina k ní kolmá) mají v tomto případě různá ohniska. Svazek paprsků za čočkou má eliptický průřez, jen v místech ohnisek se zužuje do úseček. Jejich vzdálenost se nazývá astigmatický rozdíl. Jestliže tedy například zobrazujeme mřížku, jsou svislé proužky zaostřeny a vodorovné rozostřeny, nebo naopak. Korekci astigmatismu lze provést kombinací dvou čoček se stejným velkým astigmatickým rozdílem, ovšem opačného znaménka.



Obr. 2.5 – Astigmatismus

Zklenutí obrazového pole

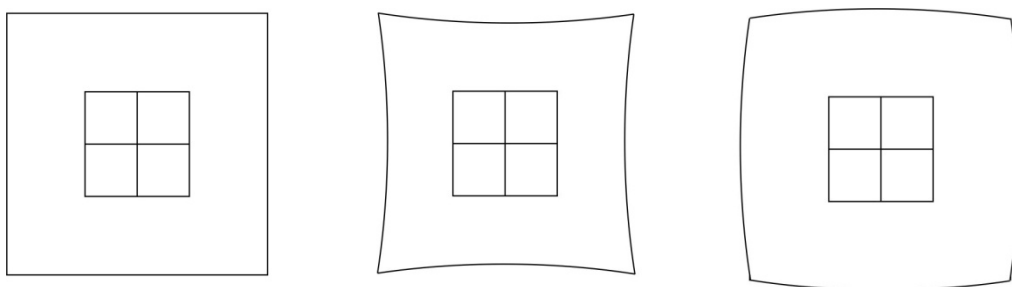
Společně s astigmatismem se u čoček projevuje i tzv. zklenutí obrazového pole. Dochází k němu v důsledku toho, že se čočka chová, jako by měla v různých místech různé ohniskové vzdálenosti. Obraz roviny se nevytvoří v rovině, ale na zakřivené ploše tvaru misky. Tato vada bývá odstraněna společně s astigmatismem.



Obr. 2.6 – Zklenutí obrazového pole

Zkreslení obrazu

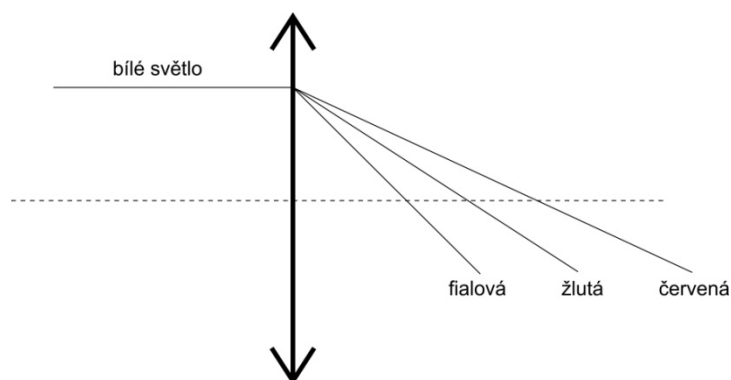
Zkreslení obrazu je způsobeno tím, že se příčné zvětšení zobrazovací soustavy mění se vzdáleností od optické osy. Dochází k deformaci tvaru zobrazovaného předmětu. Ostrost obrazu se však nezhoršuje. Pokud příčné zvětšení roste se vzdáleností od optické osy, dochází k *poduškovitému zkreslení*. Pokud příčné zvětšení se vzdáleností naopak klesá, dochází k *soudkovitému zkreslení*. Zkreslení obrazu je možné odstranit vhodnou kombinací dvou čoček tak, že soudkovité zkreslení první čočky je kompenzováno poduškovitým zkreslením druhé čočky.



Obr. 2.7 – Zkreslení obrazu (uprostřed soudkovité, vpravo poduškovité)

Barevná vada

Kromě již uvedených vad zobrazení existuje ještě vada, která souvisí s tím, že se na optickém zobrazení podílí bílé světlo, tedy světlo, které je složeno ze světél různých vlnových délek (barev). Tato vada se nazývá barevná (chromatická) vada. Vzniká v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce světla. Index lomu totiž s rostoucí vlnovou délkou klesá, a proto se fialové paprsky lámou více než paprsky červené. To se projeví tím, že obrazem bodu není bod, ale kruh s barevnými okraji. Korekci barevné vady lze provést pomocí vhodné kombinace čoček z různých skel. Některé druhy skla totiž odchylují barvy více, jiné méně.



Obr. 2.8 – Barevná vada

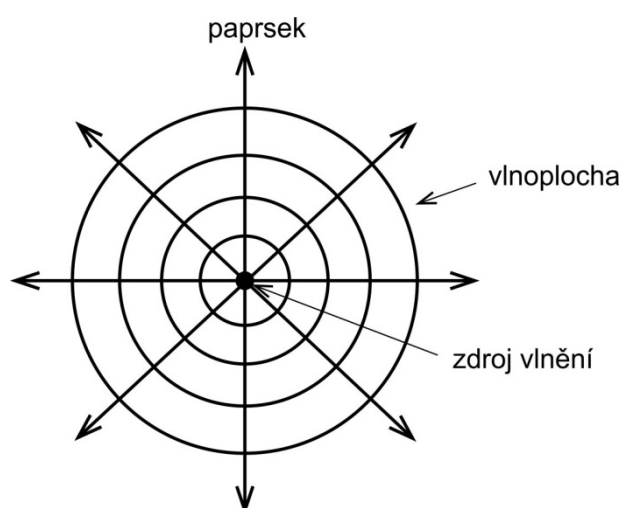
Na závěr je důležité připomenout, že se všemi uvedenými vadami (kromě barevné vady) se můžeme setkat nejen při zobrazování čočkami, ale i při zobrazování dutými zrcadly.

2.4 Vlnová optika

Jako úvod k vlnové optice je vhodné připomenout Huygensův princip. Ten je možné velmi efektně předvést s vlnami na vodní hladině. K tomuto účelu existuje několik školních demonstračních přístrojů. Dva typy těchto aparatur jsou k dispozici v IFL. Pokusy je ale možné předvést i v improvizovaných variantách – ve vaně, fotografické misce, na hladině rybníka apod.

Huygensův princip

Huygensův princip si vysvětlíme na vlnách, které se šíří po vodní hladině. Vlny si budeme znázorňovat pomocí vlnoploch. Možná nebudete souhlasit s termínem vlnoplocha, protože na vodní hladině jde spíše o jakési „vlnočáry“. Zůstaneme ale u zažité terminologie. Model, ve



Obr. 2.9 – Vlnoplochy a paprsky šířící se od zdroje vlnění

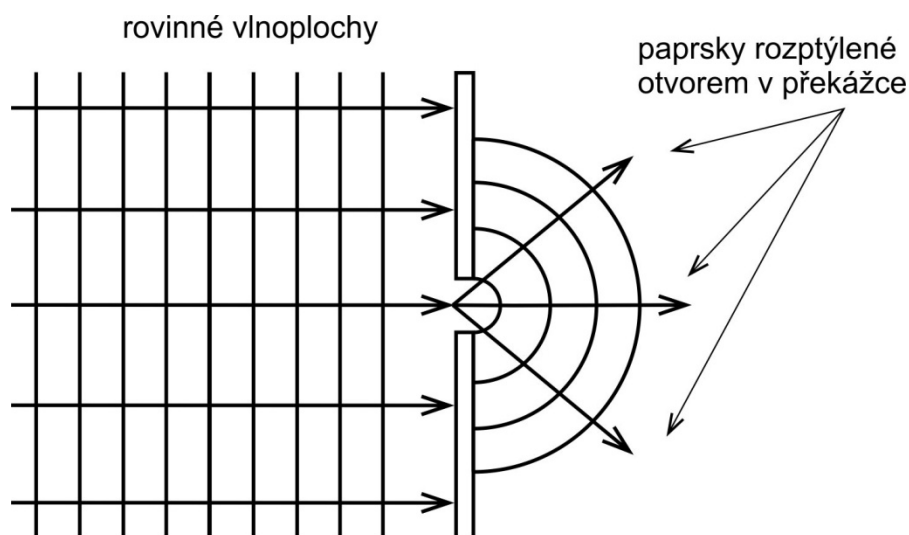
kterém využíváme vlnoplochy je velmi názorný. Budeme tedy kreslit vlnoplochy a užitečné také bude, když si do obrázků naznačíme i paprsky – přímé čáry kolmé k tečnám vlnoploch. Získáme tím užitečné propojení vlnového a paprskového modelu.

Na obr. 2.9 jsou načrtnuty vlnoplochy v blízkosti bodového zdroje vlnění (tím může být např. místo, kde právě do vody dopadl kámen). Obrázek 2.10 znázorňuje rovinné vlnoplochy, které dopadají na překážku s otvorem. Rovinná vlnoplocha může znázorňovat buď část vlnoplochy, která je už velmi vzdálená od bodového

zdroje a jejíž zakřivení zanedbáváme, nebo to může být vlnoplocha, která znázorňuje vlnění

šířící se po hladině od místa, kam „naplacato“ dopadlo dlouhé prkno. Toto je samozřejmě také idealizace – reálný dopad prkna by budil rovinné vlny pouze při patřičném „přimhouření oka“.

Podle Huygensova principu si představujeme, že každý bod vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění – na vodní hladině by mu odpovídaly kruhové vlnoplochy. Častou otázkou žáků bývá, jak velký kus vlnoplochy je oním bodem, tedy zdrojem elementárního vlnění. Ponechme stranou jistou nelogičnost otázky „jak velký je bod“ a chápeme dotaz jako náznak toho, že žáci o Huygensově principu začali přemýšlet a chtějí si vytvořit nějakou konkrétní, s ním spojenou, představu. Nejlépe bude ukázat odpověď pomocí experimentu. Vytvořme na hladině vody rovinné vlnění. Demonstrační přístroje, jako je VSP to přímo umožňují, s improvizací si jistě poradíte. Můžete také najít záznam tohoto experimentu [3]. Pokud vlnění nastavíte překážku v níž je otvor o rozměrech srovnatelných s vlnovou délkou, budou na otvor dopadat rovinné vlny, ale z otvoru se budou šířit vlny kruhové. Schematický je to naznačeno na obr. 2.10.



Obr. 2.10 – Dopad rovinných vlnoploch na překážku s otvorem – Huygensův princip

3. Pokusy z geometrické optiky

3.1 Mezní úhel, index lomu a rychlost světla

Úkoly:

1. Navrhněte a realizujte pokus, kterým změříte mezní úhel pro úplný odraz světla
 - a. ve vodě
 - b. ve skle
 - c. ve skle ponořeném ve vodě.
2. Naměřené hodnoty mezního úhlu využijte k výpočtu indexu lomu vody a použitého skla.
3. Jakou rychlostí se ve vodě a ve skle šíří světlo?

Pomůcky:

kádinka s vodou, vhodný zdroj světla (laserové ukazovátko, lampa s možností připevnění na magnetickou tabuli), skleněný hranol, úhloměr (Hartlův kotouč)

Postup:

Do kádinky nalijte dostatečné množství vody. Na zadní vnější stěnu připevněte úhloměr. Laserovým ukazovátkem posviťte zespodu šikmo vzhůru do vody. Posouvejte jím tak dlouho, až budete pozorovat úplný odraz paprsku na hladině vody. Poté pomocí úhloměru odečtete velikost naměřeného mezního úhlu.

Analogicky postupujte při měření mezního úhlu skla ponořeného do vody. V tomto případě proměříte úplný odraz na rozhraní sklo-voda.

Ke změření mezního úhlu pro sklo využijete magnetickou tabuli. Na ni připevněte Hartlův kotouč a na něj potom skleněný hranol. Zdrojem světla posviťte do hranolu a posouvejte ho tak dlouho, dokud v hranolu nepozorujete úplný odraz. Poté z Hartlova kotouče odečtete odpovídající mezní úhel.

Z naměřených hodnot mezních úhlů nyní můžete vypočítat index lomu vody a použitého skla. Dále lze určit, jakou rychlostí se v použitých materiálech šíří světlo. Vztahy, které pro výpočty použijete, jsou uvedeny v kapitole 2.3.1 této příručky. (Pokus je blíže popsán na přiloženém CD.)

3.2 Vady zobrazení

Následující pokus slouží k demonstraci vybraných vad optických zobrazení. Využita je k tomu magnetická optická souprava. V Interaktivní fyzikální laboratoři je však k dispozici i optická lavice. Komu více vyhovuje, může uvedené vady demonstrovat na ní.

Úkoly:

1. Připomeňte si, jaké vady mohou mít čočky a zrcadla. Čím se tyto vady projevují?
2. Demonstrujte otvorovou (sférickou) vadu spojky a rozptylky. Je charakter vady u obou čoček stejný?
3. Přesvědčte se, že otvorovou vadu mají i kulová zrcadla.
4. Sestavte pokus, kterým předvedete barevnou (chromatickou) vadu spojky a rozptylky. Opět porovnejte průběh vady u obou čoček.
5. Mají barevnou vadu i kulová zrcadla? Svě tvrzení ověřte pokusem.
6. Nyní si vezměte skleničku, naplňte ji vodou a podívejte se přes ni na čtverečkovaný papír. Co vidíte? Která vada zobrazení se projevuje podobně?

Pomůcky:

magnetická optická souprava (zdroj světla s více štěrbinami, spojka, rozptylka, duté a vypuklé zrcadlo), barevné filtry

Postup:

1. Otvorová (sférická) vada

Na magnetickou tabuli připevněte spojku a zdroj světla s více štěrbinami. Zdroj světla zapněte a paprsky z něj nechte dopadat na spojku. Při tom pozorujte, kde se paprsky po průchodu čočkou protnou.

Nyní na tabuli připevněte místo spojky rozptylku. Uspořádání prošlých paprsků bude jiné než u spojky. Čím se bude lišit?

Stejný postup nakonec zopakujte i s dutým a vypuklým zrcadlem.

2. Barevná (chromatická) vada

Na magnetickou tabuli opět připevněte spojku a zdroj světla s více štěrbinami. Barvu vzniklých paprsků budete měnit tak, že před zdroj postupně umístíte filtry různých barev. Vždy než filtr vyměníte, označte si na tabuli, v jakém místě se příslušné paprsky protnuly. Jaké je uspořádání ohnisek jednotlivých barev světla v případě použití spojky? Proč?

Nyní na tabuli vyměňte spojku za rozptylku. Celý pokus zopakujte a všimněte si, jestli se pořadí ohnisek jednotlivých barev liší od pořadí ohnisek v předchozím případě.

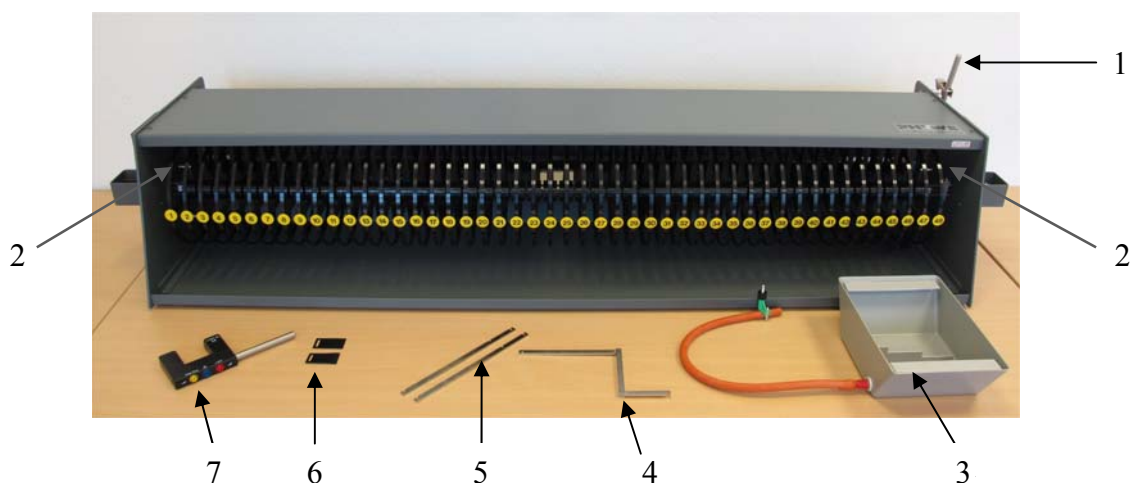
Nakonec vyměňte rozptylku za duté a vypuklé zrcadlo a ověřte svou hypotézu o tom, zda se barevná vada vyskytuje i u kulových zrcadel.

4. Pokusy z vlnové optiky

V následující kapitole jsou popsány pokusy z vlnové optiky, které lze provádět v Interaktivní fyzikální laboratoři MFF UK. Je to tedy jakýsi manuál k návštěvě IFL. Kromě pokusů, ke kterým jsou zapotřebí specializované přístroje a aparatury zařazujeme také náměty na provedení těchto pokusů s jednoduchými, snadno dostupnými pomůckami.

4.1 Něco na úvod – pokusy s vlnostrojem

Dříve, než se pustíme do samotných pokusů z optiky, je užitečné připomenout vlastnosti vlnění pomocí vlnostroje. S jeho pomocí žáci snadno a názorně pochopí, co to je vlnění a jaké jsou jeho hlavní fyzikální charakteristiky. Fotografie vlnostroje, který používáme v IFL vidíte na obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Fotografie vlnostroje

Na fotografii jsou označeny některé důležité součásti přístroje:

- 1 – aretační páčka vlnostroje
- 2 – místa pro nasunutí táhel pohonu vlnostroje
- 3 – tlumící miska
- 4 – táhlo pro „reversní chod“
- 5 – přímá táhla pro propojení motoru s vlnostrojem
- 6 – nástavce pro snímání poloh oscilátorů
- 7 – optická závora

Popis vlnostroje

Vlnostroj je tvořen 48 vázanými oscilátory. Jejich „buzení“ je možné provést ručně, nebo elektromotorem s možností regulace rychlosti. Pohonný systém je umístěn na zadní části vlnostroje. Skládá se z pákového mechanismu a elektromotoru. Je možné měnit rychlost otáček motoru, stejně tak jako směr otáčení. Připojením vhodného táhla je možné budít harmonický kmitavý pohyb levého krajního, nebo pravého krajního oscilátoru. Možné je i buzení obou krajních oscilátorů současně s tím, že lze nastavit libovolný fázový posun kmitů krajních oscilátorů.

Vazba mezi oscilátory je zprostředkována masivním gumovým vláknem. Pohyb oscilátorů je možné v libovolném okamžiku zastavit (tím provedeme jakési „zmrazení“ okamžitého stavu vlnostroje – při demonstraci některých jevů je tato funkce přístroje velmi užitečná). V okamžiku „zmrazení“ vlnostroje je automaticky odpojen pohon oscilátorů, takže motor dále běží, ale nemůže dojít k poškození jeho, ani pohonného systému přístroje.

Další užitečnou funkcí vlnostroje je tlumení posledních několika oscilátorů. Pod přístroj je možné zasunout misku s vodou v níž se pohybují „kormidélka“ spojená s příslušnými oscilátory. Odporová síla, která na tato kormidélka ve vodě působí, způsobuje výrazné tlumení pohybu oscilátorů. Tlumení je možné nastavit tak, že poslední oscilátor v řadě téměř nekmitá. V tomto případě lze demonstrovat tlumené vlnění a navíc nedochází k jeho odrazu na konci řady.

Snímání pohybu oscilátorů

Na oscilátory je možné přichytit plastové nástavce a pomocí optických závor připojených k čítači snímat jejich pohyb. Potom lze měřit periodu kmitů, nebo dobu, za kterou se vlnění rozšíří do určité vzdálenosti v řadě oscilátorů vlnostroje. Detail umístění snímače pohybu oscilátoru ukazuje obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Detail snímače pohybu vybraného oscilátoru

Náměty na pokusy s vlnostrojem

Pomocí vlnostroje můžeme zkoumat například:

- příčné vlnění
- charakteristiky vlnění:
- frekvenci, vlnovou délku, rychlost šíření vlnění
- stojaté vlnění
- odraz na volném a pevném konci
- tlumení vln

Demonstrační pokusy (bez měření)

S vlnostrojem lze provést řadu kvalitativních experimentů, které umožní názorně pochopit hlavní aspekty vlnění. V tomto případě sice jde o mechanické vlnění a v dalším textu nás bude zajímat vlnění elektromagnetické, přesto je demonstrace hlavních fyzikálních principů a charakteristik mechanického vlnění užitečným krokem před tím, než se budeme zabývat vlněním elektromagnetickým.

1. Demonstrace šíření příčné vlny řadou oscilátorů:
 - a) Kmitněte levým oscilátorem a všimněte si „iluze pohybu“ kyvadélek podél vlnostroje (oba krajní oscilátory jsou přitom volné – nejsou nasazena táhla).
 - b) Vyzkoušejte si „zmrazení vlny“ pomocí aretační páčky (hledejte ji v pravém zadním horním rohu vlnostroje).
2. Demonstrace odrazu vlny na volném a pevném konci: Pevný konec vytvoříte zablokováním pravého krajního oscilátoru pomocí táhla (zaklesněte jej příslušným otvorem na kostru vlnostroje).
3. Demonstrujte stojaté vlnění (použijte buzení elektromotorem).
4. Vyzkoušejte tlumení konce řady oscilátorů. K tomu účelu (opatrně) nasuňte misku pod pravý konec řady oscilátorů (levou stranu misky zasuňte mezi oscilátory č. 42 a 43, které mají za tímto účelem seříznuté kruhové terčíky). Pro tlumení použijte 2 l vody.
Vodu nalijte až po nasunutí a usazení misky! Misku s vodou po pokusu nejprve vypusťte k tomu určenou hadicí a teprve potom ji vyndejte.

Experimenty s měřením

Další náměty pro práci s vlnostrojem jsou náměty na kvantitativní experimenty. Při nich můžete s přístrojem provést některá jednoduchá měření.

1. Vztah mezi vlnovou délkou, frekvencí a rychlostí šíření vlny (fázovou rychlostí)
 - a) Ke dvěma oscilátorům (např. č. 1 a č. 36) přichyťte nástavce pro měření optickými závory.
 - b) Umístěte optické závory do vhodných stojánek a připojte je k čítači.
 - c) Nastavte určitou frekvenci buzení vlnění motorem. Pravý konec vlnostroje tlumte pomocí vody v misce.

- d) Změřte frekvenci (resp. periodu) kmitů oscilátorů. (Jsou pro oba oscilátory stejné?) Pokud Vám nevyhovuje měření frekvence optickými závory, můžete použít stopky
- e) Pomocí optických závor změřte rychlost šíření vlny. Nastavte přitom optické závory tak, aby příslušné oscilátory vlnostroje dosáhly do místa, kde v závoře prochází IR paprsek, právě v místě své maximální horní výchylky. Čítač nastavte tak, aby průchod levého „snímaného“ oscilátoru spustil měření času a průchod pravého oscilátoru ho zastavil. (U čítače v IFL je podrobný návod, jak jej zapojit.) Změřte vzdálenost obou oscilátorů a rychlost šíření vlnění snadno dopočítáte.
- f) „Zmrazte“ vlnu pomocí aretace vlnostroje a změřte vlnovou délku.
- g) Ověřte vztah $v = \lambda \cdot f$.

2. Měření rychlosti vlnění pomocí charakteristik stojatého vlnění

Fázovou rychlost vlnění šířícího se vlnostrojem můžete zkusit změřit i jinou metodou: vytvořením stojatého vlnění a změřením frekvence a vlnové délky.

- a) Vytvořte na vlnostroji stojatou vlnu.
- b) Změřte frekvenci kmitů některého vhodně vybraného oscilátoru.
- c) Změřte vzdálenost uzlů, nebo kmiten stojaté vlny. K tomu můžete použít „zmrazení vlny“ aretační páčkou.
- d) Ze známé hodnoty frekvence a vzdálenosti uzlů (kmiten) vypočítejte rychlost vlnění.

Jak experimentovat s mechanickým vlněním bez vlnostroje?

Snadno dostupnou náhražkou vlnostroje je gumová nit (tzv. klobouková guma), kterou můžete koupit v prodejnách galanterie [4].

Nit na jednom konci upevněte (např. ke klice od dveří, k tabuli apod.) Napněte gumu a „cvrkněte“ do ní. Pozorujete šíření rozruchu gumou k místu závěsu a zpět atd. Změřte dobu, za kterou se vám vrátil rozruch 5x (popř. 10x) k ruce. Změřte délku gumy a vypočítejte rychlost šíření rozruchu gumou.

Měňte napětí gumy a měřte rychlost šíření vlnění. Tímto experimentem ukážete, že při větším napětí v gumě se vlnění šíří rychleji. (Spokojíme se s tímto závěrem. Hlubší rozbor této problematiky jde nad rámec středoškolské fyziky a zde bychom tímto problémem odbočili od našeho záměru, kterým je demonstrace hlavních charakteristik vlnění.) Pokuste se vytvořit na gumě stojaté vlnění pomocí kmitání rukou.

Jako zdroj vlnění použijte akumulátorovou vrtačku se zahnutým drátem ve sklíčidle. Je-li guma uchycena ke klice, nebo k jinému podobnému úchytu, jde při odrazu vlnění v místě upevnění o odraz na pevném konci. Můžete tedy demonstrovat tento typ odrazu vlnění. Chcete-li ukázat také odraz na volném konci, přivažte konec gumy k niti a tu nechte někomu podržet v ruce, nebo ji přivažte ke vhodnému úchytu. V tomto případě se bude vlnění vracet od spoje gumy a niti a půjde v podstatě o odraz na volném konci.

Podrobný popis pokusů s vlnami na gumě naleznete v článku [4].

4.2. Měření rychlosti světla a indexu lomu

Měření rychlosti světla je jedním z lákadel IFL. Pro žáky bude jistě zajímavé seznámit se s tím, jak se takové měření provádí. V následující kapitole je popsáno měření s pomocí speciální školní aparatury a v jejím závěru podáme námět na improvizované měření indexu lomu (a zprostředkovaně tedy i rychlosti šíření světla v určitém prostředí). Popíšeme zde měření pomocí laserového měřiče vzdálenosti a měření rychlosti šíření mikrovlnného záření v mikrovlnné troubě.

Kompletní sestava aparatury pro měření rychlosti světla, tak jak ji můžete používat v IFL, je na obr. 4.3. Postupně (zleva doprava) je na obrázku vidět hlavní skříňka přístroje, v níž je zabudován laser a k měření potřebné elektronické obvody. Dále je zde válcová nádoba s vodou pro měření rychlosti světla ve vodě. Ta může být nahrazena průhlednou plastovou tyčí, pokud chceme měřit rychlost světla v tomto plastu. Chceme-li měřit rychlost světla ve vzduchu, musíme nádobku (tyč) sundat. Vpravo je umístěn koutový odražeč, který vrací laserový paprsek zpět k hlavní skříňce aparatury. Vše je umístěno na optické lavici. Za ní je na obrázku ještě dvoukanálový osciloskop.

Princip měření je poměrně jednoduchý. Laserový paprsek je modulován s frekvencí 50 MHz. Můžeme si tedy představit, že s touto frekvencí laser bliká. Měřicí skříňka snímá blikání přitom, když ji paprsek opouští, a zároveň snímá blikání paprsku, který se ke skříňce vrací po odrazu od koutového odražeče. Blikání dopadajícího a vyzařovaného paprsku je posunuto. Musíme tedy změřit, jaký je tento posun a jak daleko je koutový odražeč od skříňky. Tím získáme čas, který světlo potřebovalo k překonání známé vzdálenosti, a výpočet rychlosti, kterou se šíří, je už velmi jednoduchý.



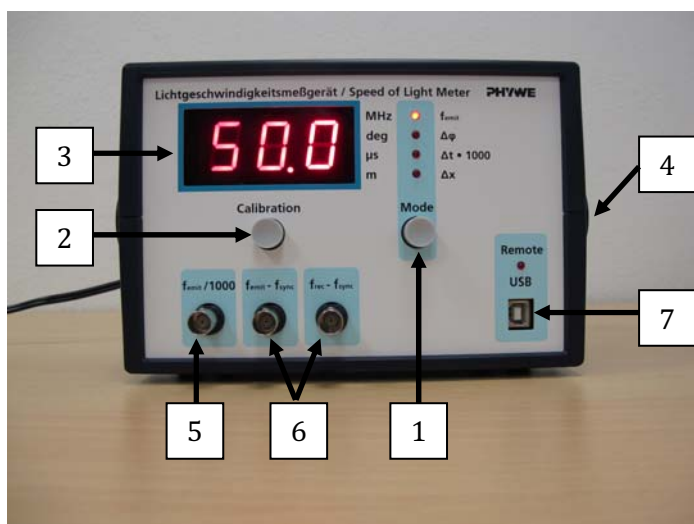
Obr. 4.3 – Sestava aparatury pro měření rychlosti světla

K tomu, abychom mohli změřit zmíněný fázový posun blikání paprsku, používáme dvoukanálový osciloskop. Snímáme blikání paprsku při opuštění skříňky a při jeho návratu. Vzhledem k tomu, že známe frekvenci blikání, je toto měření jednoduché. Signál má obdélníkový průběh a určování fázového posuvu je tedy poměrně snadné.

Určení správného fázového posuvu přijímaného a vysílaného modulovaného signálu je velmi důležité. Abychom nemuseli používat příliš rychlý osciloskop (levné osciloskopy neumožňují měřit signál s frekvencí 50 MHz), je každý z uvedených signálů aditivně mixován se synchronizačním signálem, který je modulován s frekvencí 50 kHz. Výsledkem jsou signály s frekvencí 50 kHz, jejichž vzájemné fázové posunutí je stejné, jako u původních signálů, ale může být snadno měřeno běžným osciloskopem.

Před popisem samotných experimentů s touto aparaturou bychom chtěli upozornit na jednu věc. Měřicí skříňka zdánlivě umožňuje měření i bez osciloskopu. Na jejím displeji je totiž možné odečítat fázový posun signálů odpovídající blikání odcházejícího a přicházejícího paprsku, vzdálenost odražeče od skříňky i čas, který světlo potřebuje na cestu k odražeči a zpět. Pokud byste tyto funkce přístroje použili pro měření rychlosti světla, byli byste asi mile překvapeni přesností, s níž jste ji změřili. Přesnost měření by vás ale jistě přivedla k pochybnostem a podívali byste se do dokumentace k aparatuře. Zjistili byste, že měřicí skříňka je vybavena programem, pomocí kterého počítá vzdálenost koutového odražeče s využitím známé hodnoty rychlosti světla, kterou má v sobě uloženu. Měří tedy čas a s použitím hodnoty rychlosti světla dopočítává vzdálenost. Přesnost měření potom už nepřekvapuje a je zřejmé, že použít přístroj tímto způsobem by nebylo seriózní. Skříňku ale samozřejmě můžeme používat jako dálkoměr. (Mohlo by být zajímavé, předvést takovéto „podvodnické“ měření žákům a sledovat, jestli někomu z nich budou naměřené hodnoty rychlosti světla podezřelé.)

Popis měřicí skříňky



- 1- přepínač pracovních režimů
- 2- kalibrační tlačítko
- 3- displej
- 4- polovodičový laser
- 5- BNC: modulační signál laseru
- 6- BNC: konektory slouží pro připojení k dvoukanálovému osciloskopu a určení fázového rozdílu (viz výše)
- 7- USB konektor

Obr. 4.4 – Ovládací skříňka aparatury pro měření rychlosti světla

Skříňka měřiče je na čelním panelu vybavena displejem, dvěma tlačítky, třemi BNC a jedním USB konektorem. Na pravém boku skříňky měřiče je otvor, z něhož vychází laserový paprsek. **POZOR, světlo laseru může poškodit zrak! Platí to i pro odražený paprsek!** (Jedná se o červený polovodičový laser spadající do třídy 2.)

Přístroj nemá klasický vypínač. Po zapojení do zásuvky se na displeji objeví nápis OFF. V tomto režimu je vypnutý laser a nesvítí žádná indikační LED. Tlačítkem MODE můžete přepínat mezi jednotlivými módy:

OFF – vypnutý laser (přístroj je v „pohotovostním režimu“)

femit – na displeji je zobrazená frekvence, se kterou je modulován laser

$\Delta\phi$ – na displeji se zobrazí fázový posuv vysílaného a přijímaného signálu; rozlišení je 1° , zobrazovaný rozsah 0° - 359°

$\Delta t \cdot 1000$ – dobu, za kterou se paprsek vrací (po odrazu) zpět, lze určit z fázového posuvu modulovaného signálu při jeho návratu k detektoru v přístroji. Protože je fázový posuv měřen heterodynní metodou při tisícině modulované frekvence, je zde zobrazen tisíckrát delší čas. Možná vás zarazil termín herodynní metoda. Ta byla původně vyvinuta pro přijímače rádiových signálů (superheterodyny). Heterodyn (někdy se mu říká lokálním oscilátor) vytváří signál o jiné frekvenci, než je přijímaný signál. Tato frekvence má však k frekvenci zpracovávaného signálu přesně definovaný vztah, aby s ní mohla být smíšena.

Δx – v tomto režimu přístroj funguje jako dálkoměr. Měří vzdálenost odrazky od místa, které vybereme kalibračním tlačítkem (viz dále). Rozlišení displeje je 1 cm, k výpočtu vzdálenosti přístroj používá tabulkovou hodnotu rychlosti světla.

Kalibrační tlačítko „Calibration“

Tímto tlačítkem nastavíte hodnoty v jednotlivých výše popsaných režimech na nulu. Je to tedy něco jako tárovací tlačítko na digitálních vahách.

Konektory BNC

Pomocí těchto konektorů můžete snímat potřebné signály tak, abyste mohli měřit nezávisle na údajích zobrazovaných na displeji přístroje.

BNC vlevo

Na BNC konektor, který je umístěn nejvíce vlevo, je přiveden signál, jímž je modulován laserový paprsek. Jeho frekvence je redukována faktorem 1000, aby ji bylo možné snímat běžným osciloskopem.

BNC uprostřed a vpravo

Pomocí těchto konektorů můžete snímat vysílaný a přijímaný signál (redukováný faktorem 1000, jak je popsáno výše). Po připojení dvoukanalového osciloskopu k těmto konektorům můžete oba tyto signály pozorovat současně a určit jejich fázový posuv.

USB zásuvka

K přístroji je možné připojit PC vybavené speciálním programem firmy Phywe. Tuto možnost momentálně nevyužíváme.

Pokusy s aparaturou

Rychlost světla můžete změřit dvěma způsoby. Jednodušší metodou, kdy měřič využijete jako stopky a změříte, za jak dlouho světlo urazí nastavenou vzdálenost, nebo pomocí měření fázového rozdílu vysílaného a přijímaného signálu, kdy opět nastavíte vzdálenost, kterou přitom světlo urazí. V tomto druhém případě tedy nebudete používat přístroj jako stopky, ale čas určíte ze záznamu vysílaného a přijímaného signálu.

Nejprve si vyzkoušíte metodu, která by se mohla zdát jako velmi elegantní změření rychlosti světla. Není to ale měření v pravém slova smyslu, jak za chvíli prozradíme. Tento experiment můžete použít jako test toho, zda studenti odhalí nekorektnost použitého postupu.

„Měření“ rychlosti světla „kruhem“ (neseriózní varianta použití aparatury)

1. Zapojte do zásuvky přívodní šňůru měřiče. Na displeji se objeví OFF.
2. Posuňte odrazku několik cm před otvor, z něž vychází laserový paprsek. Pomocí tlačítka „Mode“ nastavte režim Δt a stiskněte tlačítko „Calibration“. Na displeji se objeví hodnota 0.
3. Tlačítkem „Mode“ nastavte režim Δx a opět stiskněte *Calibration*. Tím jste přístroji „oznámili“ že v tomto místě je počátek měření vzdálenosti.
4. Nastavte odrazku do pozice, v níž přístroj ukáže 150 cm.
5. Nastavte mód Δt . Na displeji se objeví doba, za kterou paprsek urazil dráhu k odrazce a zpět. Protože přístroj používá hodnotu rychlosti světla pro měření vzdálenosti, asi vás nepřekvapuje, že jste získali velmi přesnou hodnotu rychlosti světla. Fakticky tady nejde o měření. Výpočtem vyjde hodnota rychlosti, kterou výrobce v aparatuře užívá pro určení vzdálenosti z naměřeného času.

Skutečné měření rychlosti světla

Zopakujte měření s tím, že vzdálenost změříte pravítkem na optické lavici. V nulové poloze odrazky zkalibrujte časomíru, vzdálenost ale měřte pravítkem.

Seriózní měření rychlosti světla

1. Zapojte osciloskop do sítě a zapněte jej. Pokud nejsou připojeny kabely ke konektorům BNC, připojte první kanál osciloskopu k prostřednímu konektoru (vysílaný signál) a druhý kanál k pravému konektoru (přijímaný signál).
2. Posuňte vzájemnou polohu zobrazení signálů na osciloskopu (ve svislém směru) tak, abyste mohli záznamy snadno srovnávat. (Tip: nastavte zobrazení tak, aby se nepatrně překrývala.)
3. Nastavte odrazku do nulové polohy pravítka na optické lavici.
4. Přepněte přístroj do módu $\Delta \varphi$ a stiskněte tlačítko *Calibration*. Tím jste pro tuto polohu odrazky nastavili nulový fázový posuv obou signálů.

5. Posouvejte odrazku tak dlouho, až budou osciloskopické záznamy signálů posunuty o polovinu periody. V této poloze odrazky odečtete na pravítku optické lavice její polohu. Pro nastavení fázového posuvu můžete také využít údajů na displeji „měřící skříňky“.
6. Z naměřených hodnot vypočtete rychlost světla.

Měření rychlosti světla v akrylovém skle (plexiskle) a ve vodě

Na optickou lavici upevněte dva držáky kruhových tyčí a uložte do nich tyč z plexiskla. **POZOR!** Nesahejte na čela tyče. Jsou přesně zabroušena a vyleštěna. Vymyslete, jak změřit rychlost světla v plexiskle. (Porovnejte s návrhem na příloženém CD.)

Plastovou tyč nahraďte trubkou se skleněnými šroubovacími čely, kterou jste před tím naplnili vodou. Změřte rychlost světla ve vodě. (Pokud budete mít problém se zachycením laserového paprsku detektorem, přisuňte trubku blíže ke skříňce měřiče.)

Ze změřených hodnot rychlostí světla ve vodě, plastu a vzduchu můžete vypočítat index lomu vody a použitého plastu. Index lomu vody můžete potom najít v tabulkách a získat představu o přesnosti vašich měření.

Jak na rychlost světla s běžnými pomůckami?

Poměrně dostupnou pomůckou je laserový dálkoměr. Ten lze zakoupit v prodejnách s náradím, pomůckami pro stavebnictví apod. Obsluha je poměrně intuitivní. S jedním z takovýchto dálkoměrů se můžete seznámit i v IFL. Změřte vzdálenost zdi přímým posvícením na ni a svícením přes kádinku s vodou. Tímto pokusem jednak ukážete, že světlo se šíří ve vodě jinou rychlostí, než ve vzduchu, ale také s pomocí naměřených hodnot můžete změřit index lomu vody. S dálkoměrem jistě dokážete navrhnout další vlastní experimenty.

Měření rychlosti světla pomocí mikrovlnné trouby

Abychom byli přesní, nebudete měřit rychlost „viditelného“ světla, ale rychlost šíření mikrovln. Využijete toho, že v mikrovlnné troubě vzniká stojaté vlnění a pokusíte se změřit vzdálenost sousedních kmiten.

Z trouby vyjměte otáčivý mechanismus. Na talířek položte čtyři krajíce toustového chleba. Talířek v troubě podložte skleničkou, troubu zavřete a nějakou dobu (3 minuty, popřípadě trochu déle) nechejte zapnutou na plný výkon. Začne-li se z trouby kouřit, přerušete ohřívání!

Po vyjmutí talíře s chleby zjistíte, že na nich jsou viditelné oblasti více propečeného chleba. To jsou místa, kde byly kmitny stojatého vlnění. Změřte vzdálenosti sousedních kmiten a hodnoty zprůměrujte. Změřili jste polovinu vlnové délky mikrovlnného záření.

Na štítku s technickými údaji si přečtete jaká je frekvence mikrovlnného záření v troubě.

Vypočítejte rychlost světla (resp. mikrovlnného světla) pomocí známého vztahu $c = f \cdot \lambda$.

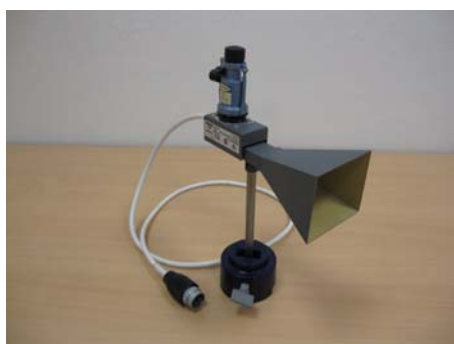
Poznámka: Měření vzdálenosti sousedních kmiten touto metodou je samozřejmě dost nepřesné. Není zřejmé, jestli třeba měříte pouze průmět kmiten do „roviny chleba“. Krajíce se navíc teplem deformují a mohou se posunout po talíři apod. Úspěchem bude, když rychlost světla touto metodou změříte s chybou okolo 10 %.

Pokusy s mikrovlnami nemusíte dělat jenom s pomocí mikrovlnné trouby. V IFL je k dispozici aparatura, s jejíž pomocí můžete s mikrovlnným zářením experimentovat. Těmto pokusům je věnována následující kapitola.

4.3 Pokusy s mikrovlnami

Důležitou částí spektra elektromagnetického záření je obor mikrovln. V IFL můžete provádět jak kvalitativní, tak i kvantitativní pokusy s mikrovlnami. Nejprve popíšeme hlavní části mikrovlnné aparatury.

Mikrovlnný vysílač s klystronem a mikrovlnný přijímač



Obr. 4.5 – Mikrovlnný vysílač



Obr. 4.6 – Mikrovlnný přijímač

Parametry vysílače jsou následující: frekvence vysílaných mikrovln: 9,45 GHz, vlnová délka: 3,2 cm, vyzařovaný výkon: 25 mW. Vysílač obsahuje speciální elektronku, tzv. klystron.

Přijímač je tvořen trychtýřem, v němž je zapojena speciální vysokofrekvenční dioda. Tuto diodu je možné v případě potřeby vyměnit. Trychtýř je možné přišroubovat ke stojánku. K tomu je vybaven dvěma závity, které umožňují jeho umístění v polohách lišících se o 90° (o tento úhel lze přijímač přetočit kolem podélné osy).

Mikrovlnný přijímací dipól

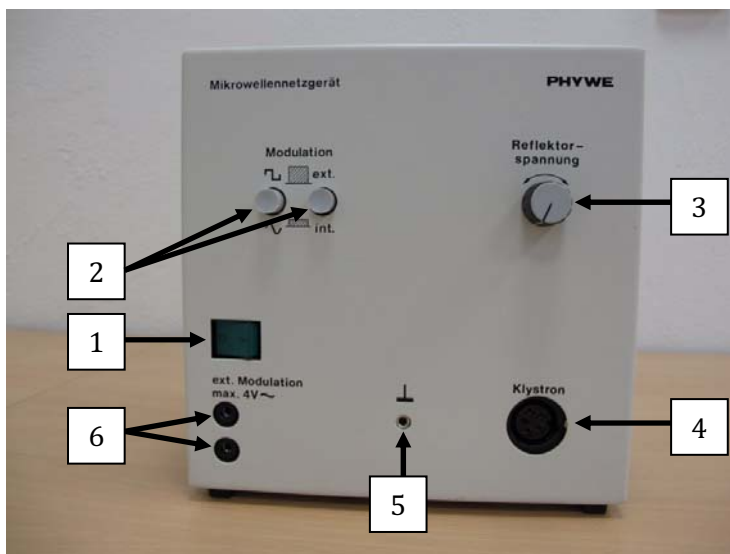
Vysokofrekvenční dioda, která je zabudována v přijímacím trychtýři může být používána i přímo, bez něj. Dioda je uchycena k tyčce, která umožňuje její uchycení ke stojánku a připojení k multimetru. V tomto provedení ji budete používat jako přijímací dipól.



Obr. 4.7 – Mikrovlnný diodový dipól

„Diodový dipól“ slouží pro relativně přesné „skenování“ mikrovlnného pole. Při manipulaci s ním je třeba dávat pozor na použitou diodu. Nevynávejte ji z držáku a zbytečně na ni nesahejte. Mohlo by dojít k jejímu poškození statickým nábojem z vašich rukou.

Napájecí zdroj pro vysílač mikrovln



- 1 – hlavní vypínač
- 2 – tlačítka ovládání modulace
- 3 – regulace vyzařovaného výkonu
- 4 – zásuvka pro připojení klystronu
- 5 – zemnicí zdířka
- 6 – zdířky pro externí modulaci

Obr. 4.8 – Ovládací prvky na skříňce mikrovlnného vysílače

Pokusy s mikrovlnnou aparaturou - ověření základních vlastností mikrovln - úvodní pokusy

1. Připojte (není-li to doposud provedeno) mikrovlnný vysílač ke zdroji. Vysílaný mikrovlnný signál je amplitudově modulován a to buď s frekvencí 50 Hz, pokud nastavíte interní modulaci, nebo je možné používat jinou externí nf modulaci. K tomuto účelu jsou na skříňce zdroje dvě zdířky. My se spokojíme s 50 Hz modulací. Nezapomeňte tedy správně nastavit příslušná tlačítka.
2. Do určité vzdálenosti (řekněme 50 cm) před trychtýř vysílače umístěte trychtýř přijímače. K přijímači připojte voltmetr s rozsahem 3V (zvolte stejnosměrný rozsah). Zapněte zdroj vysílače – po chvíli naměříte na přijímači napětí. Vyladte aparaturu na dostatečný výkon. (Pokud se Vám nedaří „zachytit signál“, zkontrolujte orientaci anténky vysílače a přijímače. Vysílané mikrovlny jsou polarizované; přesvědčte se o tom.)
3. Vyzkoušejte, od kterých materiálů se mikrovlny odráží, kterými materiály mikrovlny prochází a kterými ne. (Tip: Zkuste propustnost suchého a mokrého hadru.)

4. Ověřte zákon odrazu pro mikrovlny.



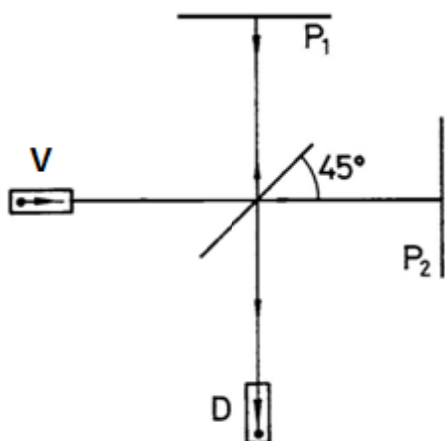
Obr. 4.8 – Sestava mikrovlnného vysílače

Stojaté vlnění a měření vlnové délky mikrovlnného záření

1. Místo trychtýřovitého přijímače použijte samotnou diodu na stojánku. **POZOR! NESAHEJTE PŘÍMO NA DIODU.** Připojte voltmetr a „zachyťte signál“ pomocí diody. Napětí na diodě bude mnohem menší, než bylo u předchozího přijímače – použijte proto multimetr s rozsahem mV, nebo použijte univerzální zesilovač.
2. Nastavte vysílač proti jedné z kovových desek. Stojánek s deskou postavte na metrovou měřicí tyč. Do prostoru mezi vysílač a deskou vsuňte přijímací diodu. Nastavte její správnou orientaci.
3. Posouvejte desku tak dlouho, až zachytíte dostatečně silný signál (a napětí se při nepohyblivé odrazné desce nemění). Nyní je mezi vysílačem a deskou stojaté mikrovlnné vlnění.
4. „Skenujte“ stojaté vlnění přijímacím dipólem (= diodou). Změřte vzdálenost několika uzlů (minim napětí) a vypočítejte její průměrnou hodnotu. Nyní můžete vypočítat rychlost šíření mikrovln (znáte frekvenci vysílaných mikrovln), nebo naopak můžete ověřit, zda frekvence vysílače odpovídá vámi naměřené vlnové délce.

Michelsonův (mikrovlnný) interferometr

Z komponent, které máte na stole lze sestavit Michelsonův interferometr. Jeho schematický obrázek i fotografii sestavy vidíte na následujícím obrázku.



Obr. 4.10 – Sestava Michelsonova interferometru, písmenem V je značen vysílač, D je detektor

Mikrovlnné záření dopadá na skleněnou desku, od které se částečně odrazí ke kovové desce P1 a částečně prochází k desce P2. Od obou desek se „paprsky“ odráží a skleněná deska část mikrovlnného záření, které se k ní po odrazech vrátilo, směřuje k detektoru („přijímacímu trychtýři“). Vlny jdoucí od desky k detektoru spolu interferují (jejich dráhy od zdroje k detektoru jsou různě dlouhé a obě vlny vznikly „rozdělením“ vlny z „vysílacího trychtýře“). Jde tedy o koherentní vlny s fázovým posunem a detektorem můžeme zachytit „stav interference“.

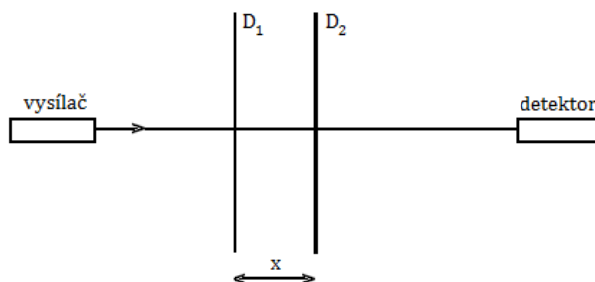
Budete-li posouvat jednou z desek (zvolte P2, která je nad měřicí tyčí a lze tedy odečítat její polohu), naleznete interferenční minima a maxima.

Měření pomocí interferometru

1. Změřte několik poloh desky P2, které odpovídají interferenčním minimům.
2. Co lze z těchto údajů vypočítat? (Vypočítejte to.)
3. Mohl by mít takovýto interferometr nějaké praktické uplatnění? Popřípadě v jaké jiné variantě? (Odpovědi naleznete na přiloženém CD).

Interference mikrovln na dvou rovnoběžných sklech

Sestavte aparaturu podle následujícího schématu (D₁ a D₂ jsou skleněné desky):



Obr. 4.11 – Schéma sestavy pro interferenci mikrovln na rovnoběžných sklech

Experiment

Měňte vzdálenost desek Δx a pečlivě zaznamenávejte napětí měřená na přijímači (použijte „trychtýřovitou verzi“). Vzdálenost měňte po malých krocích (\sim mm). Zaznamenávejte, popřípadě graficky znázorněte závislost naměřeného napětí na Δx .

Pokud budete pracovat s dostatečnou pečlivostí, podaří se vám zaznamenat interferenci danou nejenom tím, že mikrovlny se od skel částečně odráží a částečně jimi prochází. Možná zaznamenáte i interferenci danou „vnitřními odrazy“ ve skleněných deskách. (Naměřte dostatečný počet hodnot, vynesete je do grafu a zjistíte, že lze nalézt nejenom „hlavní minima“ na křivce, ale také malá minima, která odpovídají vnitřním odrazům v jednotlivých deskách.)

Difrakce mikrovln

S mikrovlnným vysílačem a diodou jako přijímacím dipólem můžete prozkoumat také difrakci mikrovln na šterbině a na hraně. Obě tyto překážky vytvoříte z plechových desek ve stojácích.



Obr. 4.12 – Sestava pro difrakci mikrovln

Použijete-li desku jako difrakční hranu, dejte ji asi 80 cm před vysílač a 20 cm za ní umístěte přijímací dipól (diodu). Osa diody je přitom rovnoběžná s hranou. Desku nasuňte zhruba do osy obou dipólů (vysílacího v „trychtýři“ a přijímacího).

Chcete-li sestavit difrakční šterbinu, volte podobné vzdálenosti vysílač-šterbina, šterbina-přijímač jako v případě hrany. Šířku šterbiny zvolte zhruba 6 cm.

Prozkoumejte mikrovlnné pole za hranou a šterbinou.

UPOZORNĚNÍ:

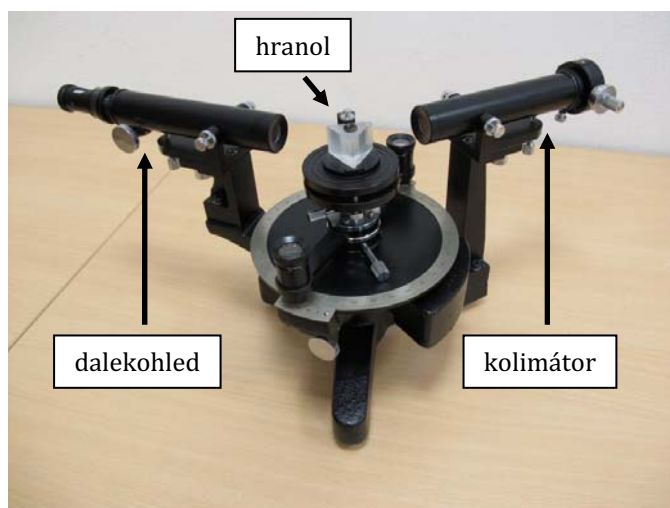
Napětí, které naměříte na samotné diodě, bude opět malé. Použijte proto multimetr s dostatečně citlivým rozsahem, nebo k přijímací diodě připojte univerzální měřící zesilovač a měřte zesílený signál.

4.4 Spektra výbojek a dalších zdrojů světla

V této kapitole vám představíme dva typy spektrometrů, které můžete používat v IFL: hranolový spektrometr, jako příklad klasického přístroje pro studium spekter a digitální spektrometr. V IFL je k dispozici i klasický mřížkový spektrometr.

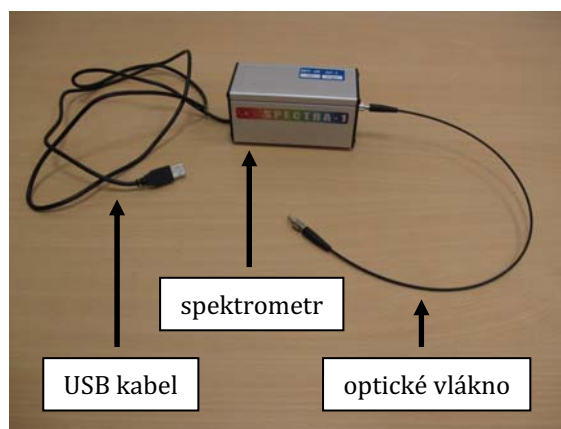
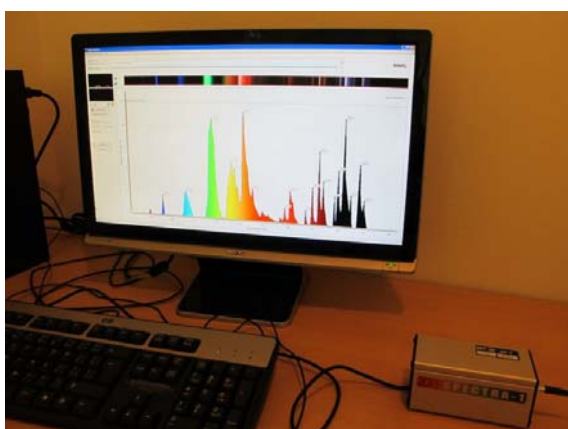
Hranolový spektrometr Krüss 1836

Jedná se o klasický spektrometr, na kterém jsou názorně vidět všechny jeho součásti – kolimátor se štěrbinou, stolek s hranolem, dalekohled a měřicí stupnice. U spektrometru je možné nastavit šířku štěrbiny. Pokud se nedaří zobrazit spektrum zdroje, může být problém právě v tom, že štěrbina je zcela zavřená. Jednotlivé součásti spektrometru jsou pohyblivé a mají aretační šrouby. Dejte pozor, abyste se nesnažili pohybovat zaaretovanými součástmi!



Obr. 4.13 – Hranolový spektrometr

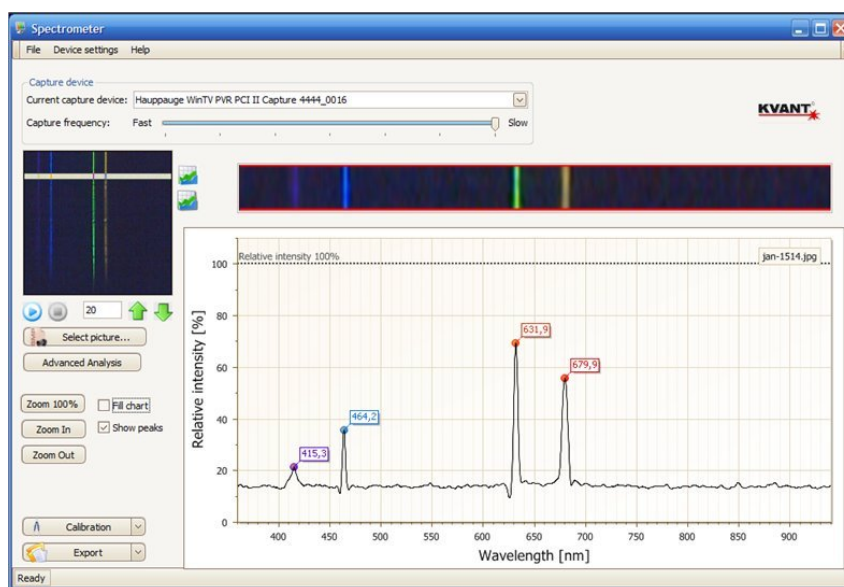
Digitální spektrometr SPECTRA



Obr. 4.14 – Digitální spektrometr připojený k počítači (vlevo) a samotný spektrometr (fotografie vpravo)

Tento přístroj umožňuje pozorovat spektra na monitoru počítače. Velmi snadno můžete měřit vlnové délky. Spektra je možné ukládat a exportovat do formátu vhodného pro další zpracování při výuce apod.

Spektrometr je vybaven optickým vláknem, do něhož svítíme zkoumaným světlem. Obr. 4.15 ukazuje, jak vypadá záznam spektra na monitoru počítače. Ovládání přístroje je velmi jednoduché a intuitivní. Na monitoru se zobrazuje tlačítko pro zahájení a konec záznamu a jsou zde volitelné možnosti, co všechno má výsledný záznam spektra obsahovat.



Obr. 4.15 – Záznam spektra na monitoru počítače

Náměty na experimenty se spektrometry

Spektroskopie, resp. spektrometrie je velmi atraktivní částí fyziky. Hovoříme-li o spektroskopii, máme na mysli pouhé pozorování (zaznamenávání) spekter. Pokud mluvíme o spektrometrii, provádíme ve spektrech také nějaká měření (typicky měříme vlnové délky). Se spektrometry, které jsou k dispozici v IFL, je možné proměřit spektra výbojů v různých plynech – k dispozici je velká řada různých výbojek. Pro žáky je ale mnohem zajímavější seznámit se spektry běžných světelných zdrojů, jako jsou žárovky a zářivky. Velice zajímavé je prozkoumat spektra tzv. „úsporných žárovek“ a srovnat je se spektrem obyčejné žárovky a se spektrem slunečního světla. V následujícím textu uvádíme náměty na několik zajímavých experimentů, tak jak je můžete provádět při návštěvě IFL. Uvádíme je přímo ve formě pracovního návodu (mohly by např. posloužit jako základ pro pracovní list).

Poznámka: Pracovní listy k úlohám jsou na přiloženém CD.

Pokyny k experimentům

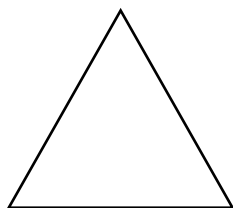
V IFL máte k dispozici (mimo jiné) dva spektrometry – klasický hranolový a digitální spektrometr. Nejprve se s nimi seznámete.

Klasický hranolový spektrometr

Prohlédněte si hlavní části spektrometru (identifikujte kolimátor, nastavitelnou štěrbinu, stolek pro hranol, hranol, dalekohled, aretační šrouby).

Úkoly:

1. Rozmyslete si, jak orientovat hranol na stolku. Načrtněte si k tomu chod paprsku skrz něj.
2. Vyznačte do náčrtku polohu kolimátoru a dalekohledu (náčrt naleznete na přiloženém CD):



Spektrum klasické žárovky

1. Před štěrbinou kolimátoru rozsviňte lampičku se žárovkou. Stínítko lampičky přitom natočte tak, aby vás žárovka neoslňovala.
2. Nastavte štěrbinu na velmi malou šířku (délka může být libovolná).
3. Na stolek položte hranol podle vašeho nákresu a zjistěte, ve kterém směru vychází světlo z hranolu. Do tohoto směru natočte dalekohled.
4. Pozorujte spektrum. Dolad'te jej pomocí otáčení hranolu a dalekohledu.
5. Obraz spektra zaostřete a zaaretujte stolek a dalekohled. Vzhled spektra upravte změnou šířky a délky štěrbinu.

Spektrum úsporné „žárovky“

1. Nahrad'te lampičku se žárovkou lampičkou s úspornou „žárovkou“. Prohlédněte si její spektrum.
2. Čím se tato dvě spektra liší?
3. Dokážete vysvětlit rozdílný charakter spekter obou použitých zdrojů světla? (Odpověď najdete na přiloženém CD.)

Digitální spektrometr

1. Spust'te program „spektrometr“ na počítači v optické kóji. Nastavte dobu měření 10 s.
2. Optické vlákno spektrometru přidržte proti lampičce s klasickou žárovkou a spust'te měření. Jste-li spokojeni se vzhledem spektra, zastavte měření. Pomocí myši zaškrtněte volbu barevného vyplnění znázorněného spektra a volbu měření vlnových délek píků.
3. Porovnejte znázorněné spektrum s tím, které jste pozorovali hranolovým spektrometrem. V čem je rozdíl?

4. Prohlédněte si také spektrum úsporné „žárovky“.
5. Zaznamenejte spektrum denního světla – namířte snímací optické vlákno proti oknu. (Spektra je možné uložit.)

Poznámky:

1. Srovnáním spekter zjistíte, že klasický spektrometr má lepší rozlišení. Neumožňuje ale tak snadné měření vlnových délek jako digitální přístroj.
2. Upozorněte žáky na to, že spektrum klasické žárovky je spojité, zatímco „úsporka“ má spektrum čárové. Rozeberte, jak tato spektra vznikají a vyvolejte diskusi o tom, který typ světelného zdroje je přirozenější pro náš zrak. (Vyjděte ze srovnání slunečního spektra se spektry zkoumaných zdrojů světla.)

Výbojky s různými plyny

1. Pomocí jednoho, nebo obou spektrometrů si prohlédněte spektra výbojek s různými plyny.
2. Všimněte si shody části spektra rtuťové výbojky se spektrem úsporné „žárovky“.
3. Se svítícími výbojkami manipulujte opatrně.

Jak zkoumat spektra, nemáte-li k dispozici spektroskop?

Pokud budete chtít zkoumat spektra i jinde než v IFL a nebudete mít k dispozici profesionálně vyrobený spektrometr, máte několik možností jak improvizovat. Máte-li chuť, můžete si dokonce vyrobit svůj vlastní spektroskop.

Pozorování spekter pomocí CD a DVD

Pokud vhodně nakloníte CD, nebo DVD vůči zkoumanému zdroji světla a podíváte se pod správným úhlem, uvidíte na ploše disku spektrum zdroje. Můžete se zaměřit na rozdíly ve vzhledu spektra získaného pomocí obou typů disků. Pokud budete mít štěstí, možná najdete starou válcovitou krabičku se zbytkem CD. Možná v ní ještě objevíte „ochranné kolečko“, kterým byly CD v krabičce přikryty. Byl to stejný disk jako CD, jenom na něm nebyla nanášena vypalovací vrstva. Je tedy průhledný. Pokud budete mít opravdu velké štěstí, zjistíte, že tento krycí disk má v sobě jemnou strukturu, která z něj dělá optickou mřížku. Snadno to zjistíte při pohledu skrz disk na nějaký zdroj světla, pohledem do okna apod. Některé ochranné disky z uvedených balení CD, ale v sobě mřížkovitou strukturu neměly.

Vyrobte si jednoduchou náhradu hranolu pro pozorování spekter

K tomuto jednoduchému pokusu budete potřebovat:

průhlednou hranatou nádobku (plastovou, nebo skleněnou – nejlepší je malé akvárium), obdélníkové zrcátko, které je možné do nádoby zasunout.

Popis pokusu

Pokus proved'te nejlépe za slunečného dne. Nádobu postavte na stůl a položte do ní zrcátko tak, jak je vidět na obrázku 4.16. Do nádoby nalijte vodu až téměř po její okraj. Vše natočte tak, aby bylo zrcátko nasměrováno k oknu, do něhož svítí Slunce. Postavte se mezi okno a nádobu (pozor, abyste si nestínili) a hledejte směr pohledu, při němž se vám podaří spatřit duhové barvy spektra. Bude užitečné, když se žáky rozeberete, proč dochází při tomto pokusu k rozkladu světla. Mohou nakreslit lom světla na hladině (vhodným modelem budou paprsky), měli by promyslet, jak se paprsky světla odráží od zrcátka. (Někoho možná napadne, že světlo se v běžném zrcátku odráží od zrcadlicí vrstvičky, která je až v jeho zadní části. Světlo tedy prochází i skleněnou destičkou zrcátka, ale částečně se odráží i na přední ploše skla. Při rozboru ale tento efekt můžete zanedbat a uvažovat o odrazu na přední straně zrcátka.)

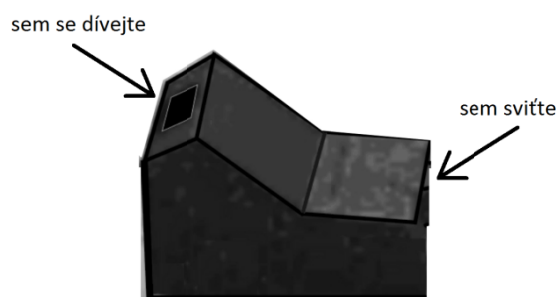


Obr. 4.16 – Jednoduchá náhrada hranolu pro rozklad světla

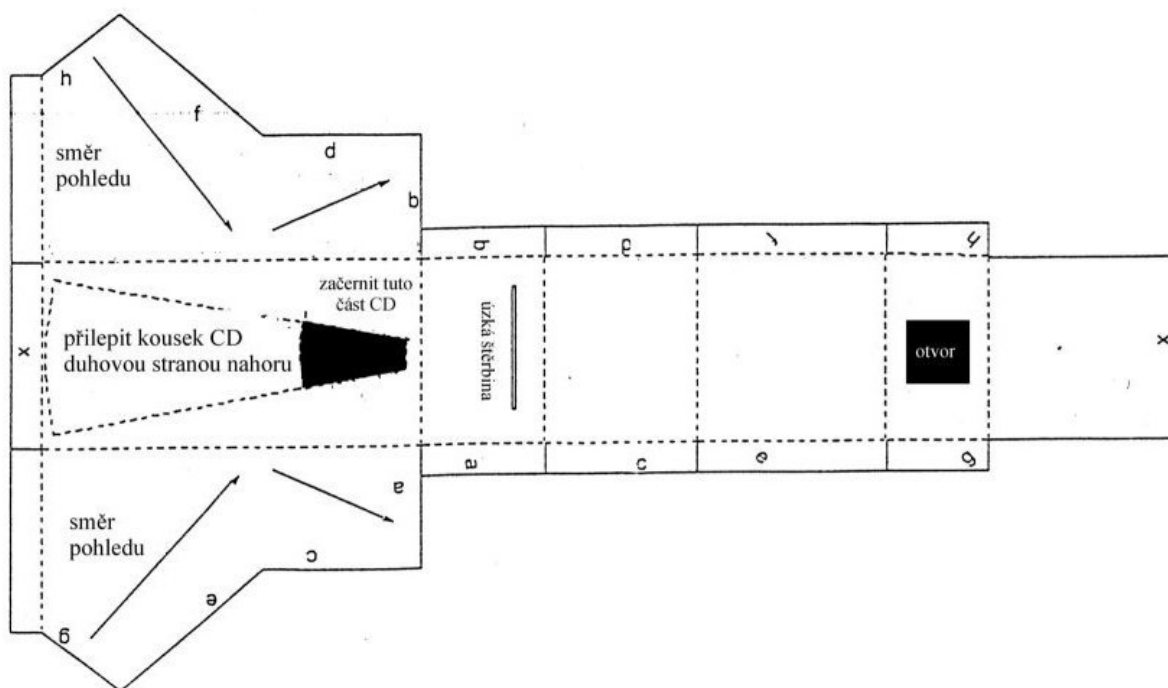
Vyrobte si svůj vlastní spektroskop

Přiložený náčrt (obr. 4.18) přeneste na papír a vlep'te kousek CD. Nalepit jej musíte tak, aby strana, na kterou se zaznamenávají informace (tedy lesklá, zrcadlicí strana) byla nahoře. Aby spektroskop dobře fungoval, musíte ho vyrobit z černého papíru, nebo jej černou barvou natřít (stačí, když bude černá jeho vnitřní strana). Měla by to být matná černá barva.

Spektroskop slepte – s jeho sestavením si jistě poradíte. Důležité jsou otvory, jimiž se do spektroskopu svítí a dívá. Oba jsou naznačeny na náčrtu rozloženého spektroskopu. Pečlivě proříznete štěrbinu, kterou se do spektroskopu svítí, a čtvercový otvor, jímž se do přístroje budete dívat. Jako pomůcka při sestavování se vám může hodit náčrt hotového spektroskopu (obr. 4.17).



Obr. 4.17 – Slepěný spektroskop



Obr. 4.18 – Rozložený spektroskop. Obrázek přeneste na tužší papír, vystřehněte, Prořízněte otvory, alespoň uvnitř natřete matnou černou barvou, vlepte střípek CD a přístroj slepte.

Prozkoumejte spektroskopem denní světlo. (Nedívejte se ale přímo do Slunce!) Dále si prohlédněte světlo obyčejné žárovky, tzv. úsporné žárovky a světlo zářivky (klasické dlouhé trubice, kterou asi máte jako osvětlení ve třídě, na chodbě apod.). Spektra se můžete pokusit vyfotografovat, tady necháváme volné pole vašim možnostem, vybavení apod. Srovnejte spektrum denního světla a obyčejné žárovky, obyčejné a „úsporné žárovky“, úsporné žárovky a zářivky. Měli bychom si uvědomit, že termín „úsporná žárovka“ není správný, nesvítl v ní totiž rozžhavené vlákno jako v žárovce, ale dochází v ní k elektrickému výboji, takže funguje podobně jako zářivka. Tento fyzikálně (technicky) nesprávný název je ale poměrně hodně používán. Z důvodu snadné srozumitelnosti jej používáme i v tomto textu.

Možná vás napadne, že bychom mohli použít střípek DVD místo doporučeného kousku CD. DVD je samozřejmě vhodnou náhradou difrakční mřížky, je ale zapotřebí rozmyslet, kam se budou zobrazovat interferenční maxima jednotlivých barev, která chceme spektroskopem pozorovat. Tvar pomůcky, který nabízíme na obr. 4.18, byl navržen a vyzkoušen pro střípek CD. Pokud se rozhodnete pro DVD, budete pravděpodobně muset nákres rozloženého spektroskopu upravit (včetně umístění pozorovacího okénka).

Poznámka: Námět k výrobě pomůcky a nákres rozloženého spektrometru pochází od kolegy doc. Milana Rojka, který jej upravil za pomoci různých podobných námětů pro soutěž Malých debružárů. S podobným jednoduchým spektroskopem jste se tedy už někdy možná setkali, nebo jej dokonce i máte. Jde o příklad „folklórního námětu“ u něhož již asi těžko vypátráme původního autora.

Jak si pořídit optickou mřížku?

V předchozím textu jsme jako funkční náhražku optické mřížky navrhovali použít CD, nebo DVD. Popřípadě v určité dřívější době dostupné ochranné disky z větších balení CD. Doba CD pomalu končí a proto je možná rozumné hledat jiné náhrady za optické mřížky do výuky. Skutečná, rytá skleněná mřížka je sice na trhu dostupná, pro školní účely by ale představovala (asi) zbytečný luxus. Taková mřížka sice vytváří velice kvalitní spektrum, je ale křehká, náchylná ke znečištění a hlavně – velmi drahá. U stejné firmy, která takovéto mřížky nabízí (např. Edmund Optics) si ale můžete objednat relativně levné plastové mřížky. Vyrábějí se ve tvaru různě velkých fólií, nebo filmů. Počet vrypů na mm, bývá u těchto mřížek 500, nebo 1000. Nejedná se ale o klasické vrypy. Difrakční struktura je na povrch fólií nanášena jinou technologií. Mřížky sice nejsou tak kvalitní, jako o několik řádů dražší ryté mřížky, pro školní účely ale zcela vyhovují. (Fólii můžete rozstříhat a jednotlivé kousky mřížky vložit do diarámečků, nebo do něčeho podobného.) Je ale zapotřebí dávat pozor na to, abyste na fólii, nebo film nesáhli. Pot velmi rychle ničí difrakční strukturu nanášenou na povrchu. Takovouto plastovou mřížku si můžete zkusit vyrobit při návštěvě IFL. Rádi vám také poradíme, kde a jak (a za kolik) lze momentálně fóliové mřížky sehnat.

4.5 Elektromagnetické vlny na Lecherově vedení

Pokusy s Lecherovým vedením (často se říká s Lecherovými dráty) patří k velmi působivým a názorným demonstracím vlastností elektromagnetických vln. Aparatura pro tyto pokusy je v současné době poměrně snadno dostupná. Elektronkové generátory (UKV generátory), které bývaly pro tyto pokusy používány dříve, dnes již zřejmě všude dosloužily. Je velmi obtížné sehnat náhradní elektronky potřebné pro opravu těchto generátorů. Aparatura, kterou používáme v IFL, je založena na obvodech s polovodičovými součástkami. Jejím autorem je doc. Hubeňák z Hradce Králové, od něž je možné soupravu koupit.

Pro experimenty s Lecherovým vedením je vhodné používat interval frekvencí 430-440 MHz. V tomto pásmu pracují radioamatéři. Nehrozí zde nebezpečí rušení provozu důležitých systémů (záchranná služba, hasiči apod.) Generátor, který můžete používat v IFL pracuje na frekvenci 433,92 MHz. Na této frekvenci sice pracují některé dálkové ovladače a např. bezdrátové zvonky, jejich činnost ale naší aparaturou neomezujeme. Generátor aparatury totiž nepoužívá žádnou modulaci vlnění.

Vlnová délka zkoumaných elektromagnetických vln je 69,1 cm. To je vcelku příznivá hodnota. Na vedení, které má zhruba 2 m se vejde několik vlnových délek a jevy, které budeme chtít demonstrovat, tedy budou realizovatelné na poměrně malé délce vedení (stačí jeden větší demonstrační stůl). Také další rozměry příslušenství k aparatuře jsou příznivé. Půlvlnný dipól měří 34,6 cm a dipól čtvrtvlnný má délku poloviční (17,3 cm) [5].

Bližší technické parametry polovodičového vysokofrekvenčního generátoru, jeho blokové schéma a další technické údaje o aparatuře lze nalézt v [5]. Kromě technických parametrů

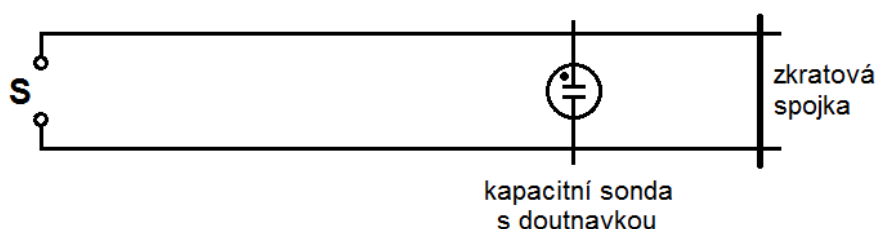
a popisu jednotlivých součástí aparatury je zde také názorným způsobem popsána řada experimentů s Lecherovým vedením. Nemá smysl, abychom v této brožurce suplovali návod [5]. Poukážeme pouze na hlavní „demonstrační potenciál“ Lecherových drátů - zaměříme se na podstatu demonstrace vlastností elektromagnetických vln pomocí Lecherova vedení. Aparatura, kterou můžete používat v IFL, je velmi pokročilou variantou původních přístrojů Heinricha Hertze a Ernsta Lechera, s nimiž byly ke konci 19. století provedeny zásadní experimenty, které se staly milníky na cestě lidstva k poznávání světa. Naznačíme zde, jak vypadaly ony původní experimenty. Jejich jednoduchost na jedné straně a důmyslnost na straně druhé je inspirační i do dnešních dob. Můžete se dokonce pokusit o jejich rekonstrukci.

Stojaté vlnění na Lecherově vedení

Pro studium vlastností elektromagnetického vlnění je vhodné vlnění stojaté. Pokud změříte vlnovou délku stojatého elektromagnetického záření, které budete budít zdrojem o známé frekvenci, budete schopni dopočítat rychlost šíření elektromagnetických vln. Experimenty tohoto typu prováděl už Heinrich Hertz, který nechal elektromagnetické vlnění odrážet od kovového zrcadla. Vylepšení pokusu a poměrně přesná měření rychlosti šíření elektromagnetických vln provedl Ernst Lecher podobným postupem, jak to provedeme my. Rozdíl je samozřejmě v technických prostředcích, které používáme v IFL a které měli k dispozici H. Hertz, nebo E. Lecher.

Aby byla intenzita stojatého vlnění dostatečně znatelná, je dobré, když bude naše experimentální vlna postupovat ve vytčeném směru. Toho dosáhneme tak, že použijeme dvojici rovnoběžných vodičů, které na jednom konci spojíme zkratovou spojkou. Polohu této spojky na vodičích můžeme měnit a tím „naladit“ stojaté vlnění. Začátek vedení je připojen k vysokofrekvenčnímu zdroji – to bude zdroj elektromagnetického vlnění pro náš pokus. Lecherovo vedení v IFL je tvořeno měděnými trubičkami dlouhými 2 m o průměru 6 mm. Jejich vzájemná vzdálenost je 35 mm, impedance vedení je 280 Ω . Jak jsme už uvedli, technické detaily aparatury lze nalézt v návodu [5], který je k dispozici přímo u experimentu v IFL.

Elektromagnetické pole je v podstatě omezeno na prostor okolo vodičů, jimiž prochází proud (díky připojenímu vf zdroji). Zkratová spojka odráží vlny, které se k ní dostaly. V prostoru okolo vodičů tedy vzniká stojaté vlnění. O poloze kmiten a uzlů se přesvědčíme pokusem.



Obr. 4.19 – Schéma Lecherova vedení s napěťovou sondou

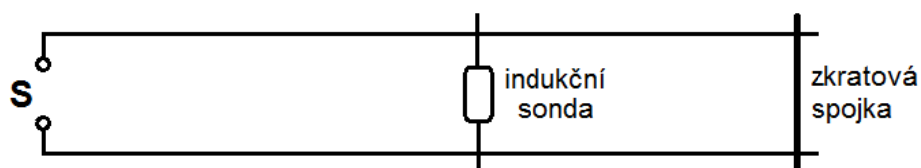
Aparatura je vybavena dvěma typy sond. Pro sledování kmiten napětí je určena kapacitní sonda. Ta je vyrobena z jednostranného tištěného spoje. Jsou na ni ponechány dva měděné pásy, které tvoří jednu desku kondenzátoru, druhou deskou je vodič Lecherova vedení. Sonda obsahuje doutnavku. Druhou sondou, která je k dispozici, je indukční sonda používaná pro určení kmiten proudu. Je to opět destička plošného spoje, na níž je vyleptán jeden čtvercový závit, který je v místě přerušení připojen na žárovíčku 24 V/50 mA. Závit má strany o délce 25 mm.

Nalezení napěťových kmiten

Na Lecherovy dráty položíme napěťovou sondu (s výbojkou – po položení na vedení v její blízkosti „zajiskřete“ piezoelektrickým zapalovačem z příslušenství aparatury, aby začala svítit). Při pohybu sondy po vedení mezi zdrojem a zkratovou spojkou pozorujeme, že se postupně rozsvěcí a zhasíná. Nejvíce svítí v místech, kde jsou kmitny elektrické intenzity. Určování poloh kmiten napětí je tedy způsobem, kterým zkoumáme průběh elektrické intenzity ve stojaté elektromagnetické vlně. Vzdálenost dvou sousedních kmiten je zároveň polovinou vlnové délky zkoumaného elektromagnetického vlnění.

Nalezení proudových kmiten

Proudové kmitny hledáme pomocí indukční sondy, kterou posouváme po vedení. Hledáme tím vlastně kmitny magnetické intenzity ve stojatém elektromagnetickém vlnění. Sonda reaguje na indukční účinky proměnného magnetického pole.



Obr. 4.20 – Schéma Lecherova vedení s proudovou sondou

Pokusy ukazují, že kmitny magnetické intenzity jsou tam, kde jsou uzly elektrické intenzity (nebo naopak). V místě zkratové spojky (odrazného zrcátka pro elektromagnetické vlnění) je uzel elektrické intenzity a kmitna magnetické intenzity. To znamená, že od kovového povrchu se postupující kmity elektrické intenzity odrážejí s opačnou fází (se „ztrátou“ půlvlny), zatímco „magnetická vlna“ se odráží s nezměněnou fází (bez „ztráty“ poloviny vlny).

Naměřené parametry stojatého elektromagnetického vlnění vám umožní výpočet rychlosti šíření tohoto vlnění (frekvence vlnění je 433,92 MHz).

Vyzařování elektromagnetického vlnění

Ke konci vedení (tam, kde jsme umisťovali zkratovou spojkou v předchozích experimentech) můžeme připojit půlvlnný dipól a tím vyrobit vysílač elektromagnetického vlnění. Vstupní impedance půlvlnného dipólu je asi 75 Ω a jeho připojením na konec vedení dojde k částečnému

odrazu vlnění zpět. Lepší variantou „vysílače“ je připojení skládaného dipólu se vstupní impedancí asi 300 Ω. Větší část vlnění se potom vyzařuje do okolí. Přiložením indukční sondy na vedení se ukáže, že jsou zde detekovatelná jen nevýrazná maxima a minima proudů, takže na vedení je v podstatě postupná vlna. Podle návodu k soupravě můžete prozkoumat elektromagnetické vlny v blízkosti dipólu. Použít můžete upravenou zářivku, dipól se žárovíčkou a skládanou anténu. Můžete zkoumat polarizaci vlnění, jeho odraz, interferenci... Náměty na experimenty jsou opět dobře popsány v manuálu k aparatuře a nemá smysl je zde přepisovat. Pojdme se raději podívat na historické kořeny těchto experimentů.

4.6 Elektromagnetické vlny „v podání Heinricha Hertze“

První experimenty s elektromagnetickými vlnami prováděl Heinrich Hertz. Svými pokusy z let 1887–88 dokázal, že elektromagnetické vlny existují, což byl velmi významný okamžik v dějinách fyziky. Experimentálně tím byla ověřena jejich předpověď, která vyplynula z práce Jamese Clerka Maxwella. Maxwell ze své teorie odvodil, že prostorem by se měly šířit rozruchy elektromagnetického pole, a to v podobě příčných vln. Vypočítal jejich rychlost a k velkému překvapení zjistil, že je shodná s rychlostí světla ve vakuu, která byla již v té době poměrně přesně známá. (Např. Foucault naměřil roku 1862 rychlost světla $c = 3,08 \cdot 10^8$ m/s [6])



Heinrich Rudolf Hertz
(1857-1894)

Na obr. 4.21 vlevo je schéma obvodu v němž je zapojen kondenzátor a cívka. Po nabití kondenzátoru s kapacitou C a připojení cívky s indukčností L se v obvodu objeví elektromagnetické kmity. Perioda těchto (vlastních) kmitů je dána vztahem

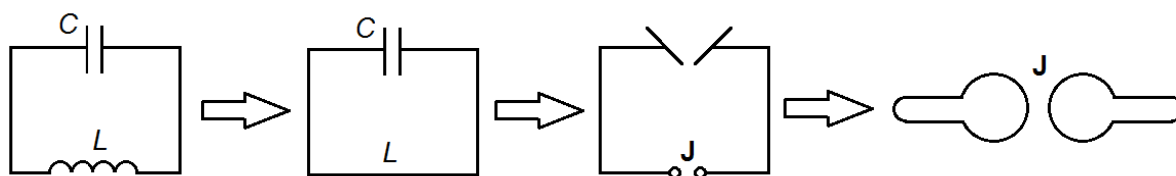
$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (5)$$

V okolí obvodu vzniká proměnné elektrické a magnetické pole. V prostoru mezi deskami kondenzátoru se s periodou T mění intenzita elektrického pole, cívka vytváří proměnné magnetické pole. Pokud bychom použili kondenzátor s malou vzdáleností mezi deskami a cívku ve tvaru solenoidu s hustým vinutím, bylo by pole v podstatě soustředěno na prostor mezi deskami a na vnitřek solenoidu. To ale není situace, které bychom chtěli dosáhnout, máme-li v úmyslu vysílat elektromagnetické vlny do okolí.

Aby se zvětšilo vyzařování, je zapotřebí zvětšit vzdálenost mezi deskami kondenzátoru a části obvodu v níž dochází k vlastní indukci dát tvar nikoli solenoidu, ale nějakého otevřenějšího obvodu. V obrázku 4.21 jsme tento proces schematiky znázornili nejprve náhradou cívky obyčejným „lineárním“ vodičem a dále pootevřením desek kondenzátoru. Při takové úpravě obvodu se samozřejmě zmenšuje indukčnost i kapacita a klesá tedy i perioda vlastních kmitů

v obvodu. Kmity bude třeba udržovat tím, že k deskám kondenzátoru budeme přivádět energii z nějakého vnějšího zdroje s vhodnou frekvencí. V našem myšlenkovém procesu úpravy obvodu jsme lineární vodič ještě přerušili jiskřištěm J. K jiskřišti je připojen zmíněný vhodný vnější zdroj. V okamžiku, kdy napětí mezi kuličkami jiskřiště dosáhne potřebné hodnoty, přeskočí mezi nimi jiskra. Ta spojí elektrický obvod a vzniknou v něm elektromagnetické kmity. (Popis, který zde uvádíme je pouze zjednodušením, které situaci popisuje nepříliš přesně. Naší snahou ale není přesný popis. Jde nám o „první vhled“ do problematiky.)

Naznačené úvahy zřejmě dovedly Heinricha Hertze k tomu, že by bylo možné zcela odstranit desky kondenzátoru a vytvořit oscilátor, který by se skládal pouze ze dvou tyčí s jiskřištěm. Toto řešení je v obr. 4.21 naznačeno zcela vpravo.



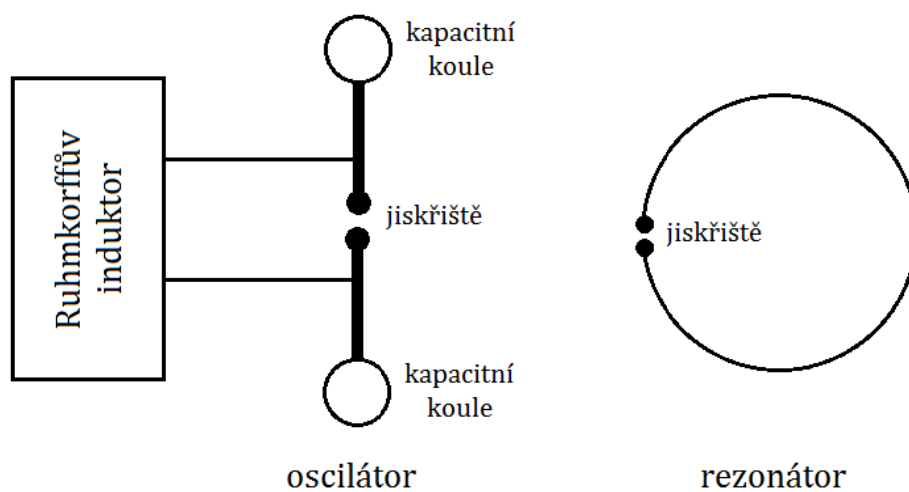
Obr. 4.21 – Přechod od uzavřeného oscilačního LC obvodu k Hertzovu dipólu

Odstraněním desek se ale velmi výrazně zmenší kapacita. Hertz tedy svůj dipól vylepšil tak, že na oba konce tyčí, které jsou vzdálenější od jiskřiště, nasadil velké kovové koule. Původní Hertzův oscilátor se skládal ze dvou kovových tyčí dlouhých 40 cm. Kuličky jiskřiště byly od sebe vzdáleny 5 mm a na opačných koncích tyčí byly nasazeny koule ze zinkového plechu. Jiskřiště bylo připojeno k Ruhmkorffovu induktoru, který byl napájen baterií galvanických článků. Ruhmkorffův generátor vybavený přerušovačem – Wagnerovým kladívkem přerušovaně napájel Hertzův oscilátor. Při přeskočení jiskry na jiskřišti došlo k rozkmitání oscilátoru tlumenými kmity a do okolí byly vysílány elektromagnetické vlny o vlnové délce asi 1,6 m.

Jako přijímač používal Heinrich Hertz kruhový závit s jiskřištěm – toto zařízení sám Hertz nazýval rezonátorem. Kuličky rezonátoru byly pouze několik desetin milimetru od sebe a jejich vzdálenost bylo možno velmi citlivě měnit mikrometrickým šroubem. Jiskřiště Hertz pečlivě pozoroval pomocí lupy a tím zjišťoval, zda rezonátor přijímá elektromagnetické vlny vysílané oscilátorem. Svá měření prováděl v zatemněné místnosti.

Když Heinrich Hertz provedl dostatečný počet experimentů a získal jistotu, že skutečně objevil elektromagnetické vlny předpovězené Maxwellem, nadšeně o tom informoval svého učitele Herrmanna Ludwiga von Helmholtze. Ten objev stejně nadšeně přijal a vyjádřil Hertzovi svůj obdiv. Samotný Heinrich Hertz sice prokázání elektromagnetických vln považoval za velký úspěch fyziky své doby, k praktickým aplikacím tohoto objevu se ale vyjadřoval poněkud skepticky. Jeho život byl krátký, zemřel po čtyřleté těžké nemoci první den roku 1894 ve věku 37 let. O pozdějších, neobyčejně významných aplikacích svého objevu, se tedy nic nedozvěděl.

Na obrázku 4.22 je schématický nákres Hertzovy aparatury, pomocí níž byly poprvé v historii lidstva vysílány a přijímány elektromagnetické vlny. Na obr. 4.23 je fotografie původního zařízení.



Obr. 4.22 – Schématický nákres aparatury pomocí níž H. Hertz prokázal existenci elektromagnetických vln

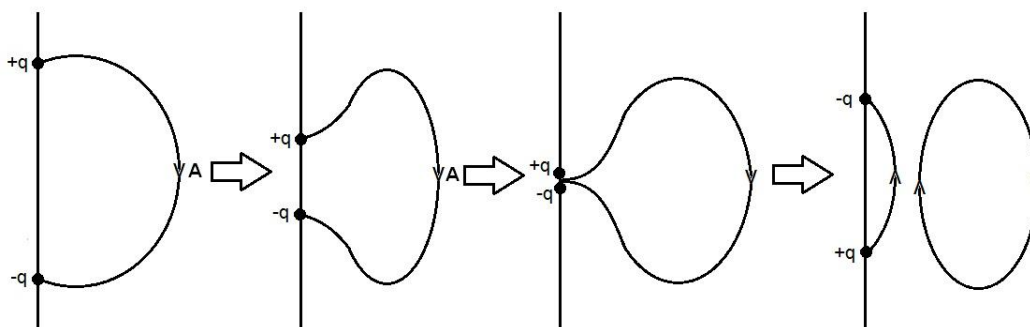


Obr. 4.23 – Hertzův oscilátor (vlevo) a rezonátor (vpravo)

Jak funguje dipól?

Vraťme se ještě na chvíli k dipólu a naznačme si aspoň v hrubých rysech, jak je možné, že dipól vysílá do svého okolí elektromagnetické vlny.

U „statického“ dipólu, tedy u dipólu tvořeného dvěma náboji, které jsou vůči sobě nepohyblivé, by siločáry začínaly na kladném náboji a končily na náboji záporném. U dipólu jehož dvě složky se vůči sobě pohybují to ale takto jednoduché není. Důvodem je to, že pole se šíří prostorem konečnou rychlostí a intenzita elektrického pole E v kterémkoli bodě mimo dipól odpovídá v daném okamžiku poloze nábojů v dřívějším čase.



Obr. 4.24 – Vývoj elektrické siločáry v okolí oscilujícího dipólu

Situace je načrtnuta na obr. 4.24. Dipól tvoří dva náboje $+q$ a $-q$, které kmitají nahoru a dolů podél naznačené svislé čáry. Jejich vzdálenost se tedy s časem mění. Na obrázku je načrtnuta jedna ze siločar. Na nákresu zcela vlevo se náboje k sobě přibližují a siločára mění tvar. Například v bodě označeném písmenkem A neodpovídá intenzita E zakreslené okamžité poloze nábojů $+q$, $-q$, ale jejich poloze v dřívějším čase. Siločára tedy získává přibližně tvar, jako je zakresleno ve druhé situaci zleva. Jakmile jsou oba naše náboje „u sebe“, získává siločára tvar smyčky (třetí situace zleva). Vzniklé elektrické pole má v jisté vzdálenosti od dipólu vřový charakter. Po překmitnutí nábojů do „opačných poloh náboje zpomalují, vzdalují se od sebe do určité polohy, opět se přibližují...

Vznik uzavřených čar proměnného elektrického pole má podle Maxwellovy teorie za následek vznik uzavřených čar proměnného pole magnetického, ty zase způsobují vznik uzavřených čar elektrické intenzity atd. Oscilující dipól tedy ve svém okolí vytváří elektromagnetické vlny.

4.7 Hrátky s viditelným i neviditelným zářením

V této úloze, která je pro vás také připravena v IFL, budete experimentovat s infračerveným, viditelným a ultrafialovým světlem. Budete k tomu používat přístroje a pomůcky, které sice nejsou původně určené pro školní pokusy, výborně se k nim ale hodí. Z toho, co jsme právě uvedli je zřejmé, že tato experimentální úloha není nutně vázána na prostory IFL. Pomůcky, které zde používáme, pravděpodobně snadno seženete. Chápejte tedy tuto kapitulu spíše jako náměty na experimenty než jako průvodce experimentální úlohou v Interaktivní fyzikální laboratoři. I když vše, co zde popisujeme si samozřejmě v IFL můžete vyzkoušet a vzít k tomu také své žáky.

Pokusy s infračerveným zářením

Bezkontaktní teploměr

Bezkontaktní teploměry jsou dnes poměrně snadno dostupné. Obzvláště potom, co byl zakázán prodej lékařských rtuťových teploměrů, se na trhu objevily různé typy elektronických teploměrů. My zde ale nebudeme popisovat pokusy s lékařskými teploměry. Zaměříme se na experimenty s infračervenými teploměry, které jsou určeny pro různá průmyslová, nebo i amatérská měření. Tyto teploměry mívají poměrně velký měřicí rozsah. Jejich obsluha bývá pohodlná a vcelku intuitivní.

Následuje několik experimentálních úkolů, které si můžete vyzkoušet s uvedeným teploměrem.

Měření teploty bezdotykovým teploměrem

Vyzkoušejte si funkci teploměru. Namiřte jej na místo, jehož teplotu chcete změřit a stiskněte „spoušť“ teploměru. Pozor ale na to, v jak širokém kuželu teploměr měří. Všimněte si taky, že teploměr ukazuje údaj na desetiny stupně, ale přesnost měření určitě taková není. Chyba může být i několik stupňů. Navrhněte a zrealizujte pokus, kterým ověříte věrohodnost naměřených údajů.

Měření teploty oblohy

Pokud máte štěstí a není zataženo, namiřte teploměr na oblohu (ne přes zavřené okno) a změřte její teplotu. Můžete zkusit zaměřit mrak a porovnat naměřený údaj s měřením jasné oblohy. Jde skutečně o měření teploty oblohy, nebo se jedná o nějaký „klam přístroje“? (Odpověď naleznete dále v textu.)

Horká a chladná lžíce

Zahřejte ve vodě lesklou lžici, utřete ji do sucha a změřte její teplotu IR teploměrem. Pokuste se vysvětlit výsledek pokusu. Totéž vyzkoušejte se lžicí ochlazenou pod teplotu okolí.

Odraz IR záření

1. Vyrobtě si zrcátko z kousku alobalu (nalepte jej např. na kousek tvrdého papíru). Jako zdroj IR záření použijte svou ruku. Měřte její teplotu odrazem od alobalového zrcátka.
2. Určete oblast, z níž teploměr snímá IR záření
3. Zaměřte nějaký předmět, který má vyšší teplotu než okolí (může to být např. i dlaň) a zjistěte, z jaké oblasti teploměr snímá IR záření.

UPOZORNĚNÍ: Při manipulaci s IR teploměrem, který je k dispozici v IFL, buďte opatrní. Pro usnadnění zaměření měřeného místa je teploměr vybaven laserovým zaměřovačem. Dávejte pozor, abyste někomu laserovým paprskem neposvítili do oka.

Náměty na tyto experimenty jsou převzaty z článku [7]. Tento článek naleznete i na přiloženém CD.

Doplňující informace k pokusům s IR teploměrem

Teplota oblohy

Infračerveným teploměrem skutečně měříte teplotu oblohy. Pokud je obloha bez mraků, naměřili jste nejspíš hodnoty mezi -30 °C až -24 °C . Jde o teplotu vyšších vrstev atmosféry, z nichž k nám přichází infračervené záření o vlnových délkách registrovaných IR teploměrem (tedy o vlnových délkách kolem deseti mikrometrů). Namíříme-li teploměr na mraky, ukáže teplotu výrazně vyšší. Inspiraci k tomuto měření lze nalézt v [8].

Měření teploty zahřátého lesklého kovového předmětu (např. lžice)

V tomto případě ukázal teploměr zhruba teplotu okolí, i když lžice byla evidentně teplejší. IR záření se na lesklém povrchu odráží, samotný kov na daných vlnových délkách vyzařuje velmi špatně. (U dražších teploměrů lze nastavit emisivitu příslušného povrchu, levnější teploměry ji mívají pevně nastavenou na hodnotu 0,95. Na lesklých kovových površích však nejspíš neuspějeme ani s drahými teploměry.) U lesklého kovu ochlazeného pod teplotu okolí je vysvětlení obdobné.

Pokusy s dálkovým ovladačem

Zdrojem IR záření je většina dálkových ovladačů. K detekci záření použijete infračervenou fotodiodu. Pro lepší funkci detektoru je fotodioda vsunuta do papírové trubičky. Fotodiodu pro infračervený obor bez problémů koupíte v prodejnách s elektronickými součástkami. Může to být např. typ HSDL-4220, nebo HSDL-4230 (první z uvedených reaguje na IR světlo dopadající v úhlu asi do 30° od podélné osy pouzdra, druhá je více směrová – zachytíte pomocí ní IR světlo, které přichází z úhlu zhruba 17° od podélné osy jejího pouzdra). Obsluha v prodejně vám jistě s výběrem fotodiody poradí. Jako dále zmiňovaný voltmetr můžete použít běžný digitální multimetr. Očekávejte napětí několik desetin voltu. Pomůcky jsou snadně dostupné, experimenty jsou tedy přístupné každému.

1. Fotodiodu připojte k voltmetru a sviťte na ni dálkovým ovladačem. Nastavte vhodný rozsah voltmetru. Porovnejte napětí na fotodiodě při zapnutém a vypnutém ovladači. Tím si uděláte představu o tom, jak dioda reaguje na denní světlo, popř. na světlo v místnosti, kde experimentujete. Pro odstínění (ne úplné, ale dosti účinné) vlivu světla v místnosti je vhodné vsunout fotodiodu do úzké papírové trubičky dlouhé několik cm. Trubičku uvnitř natřete matnou černou barvou. Tato úprava také zlepší směrovost vašeho detektoru IR světla.
2. Pomocí alobalového zrcátka ověřte zákon odrazu pro IR světlo.
3. Vyzkoušejte, jak jsou různé materiály průhledné pro IR světlo. Naleznete nějaký materiál, který je neprůhledný pro „viditelné světlo“ ale průhledný pro světlo infračervené (nebo naopak)?
4. Prosviťte ovladačem optickou mřížku a pokuste se najít interferenční maxima pomocí fotodiody. Za pomocí laserového ukazovátka změřte počet vrypů mřížky a potom změřte vlnovou délku IR záření ovladače.
5. Pomocí polarizačních filtrů zjistěte, zda je možné IR světlo zpolarizovat.

6. Prohlédněte si IR záření! Dívejte se na diodu ovladače digitálním fotoaparátem (pomocí jeho displeje). Mačkejte přitom některé tlačítko na ovladači.
7. Připojte trubičku s fotodiodou k osciloskopu a pokuste se znázornit modulaci IR záření vysílaného při tisknutí různých tlačítek na ovladači.

Pokusy s dálkovým ovladačem a IR fotodiodou lze nalézt v nejrůznějších článcích a sbornících. Naleznete-li takové články, zjistíte, že náměty v nich popsané jsou si často podobné a těžko nalézt jejich původního autora. Z tohoto důvodu zde necitujeme jiné zdroje (i když jsme jimi samozřejmě inspirováni). První pokusy s dálkovými ovladači např. předváděl v době těsně po jejich uvedení na trh německý učitel a popularizátor fyziky dr. Heinrich Brockmeyer (viz např. [9]).

Pokusy s aparaturou ISES

Pokud máte k dispozici ISES vyzkoušejte, jak s jeho pomocí můžete registrovat infračervené světlo. Použijete k tomu modul optické závory. Ten totiž pracuje právě v IR oboru. Podobné experimenty lze provádět i s jinými školními měřicími systémy (Vernier, Pasco, ...). Naše úloha v IFL je sestavena s aparaturou ISES.

Připojte k ISESu čidlo optické závory, namiřte jej na žárovku ve stolní lampě a zaznamenejte, jak žárovka svítí. Zaznamenejte také světlo žárovky při rozsvěcení lampy. Čidlo musíte mírně upravit. Vyndejte obě válcové části optické závory ze společného držáku. Jeden z válečků obsahuje zdroj IR světla, ve druhém je IR fotodioda. Právě tento „přijímací váleček“ použijte pro snímání infračerveného záření.

Stejná měření proveďte s úspornou „žárovkou“ a s běžnou zářivkovou trubicí. Při těchto experimentech lze velmi názorně ukázat, že žárovka pohasíná s frekvencí 100 Hz. Překvapivé může být to, jak výrazný pokles intenzity IR záření z vlákna žárovky zaznamenejeme. Frekvence 100 Hz by možná mohla někoho na první pohled překvapit. Musíme si ale uvědomit, že vlákno žárovky je „přihříváno“ dvakrát během každé periody, s níž je proměnný střídavý proud v síti. Vzhledem k síťové frekvenci 50 Hz je tedy frekvence pohasínání žárovky 100 Hz snadno zdůvodnitelná. Zajímavým experimentem je také zaznamenání rozsvěcení žárovky. V tomto případě zaznamenávejte svit žárovky např. 0,2 s. Pro start měření nastavte režim trigger tak, aby záznam začal ihned při rozsvícení žárovky. U zářivky (jak běžné, tak i u tzv. úsporky) také zaznamenáte její zhasínání (blikání). U úsporky může být frekvence jejího blikání vyšší, než u běžné zářivky.

Jak již bylo uvedeno, IR fotodioda reaguje i na denní světlo. Její citlivost je ale maximální v infračervené oblasti a to konkrétně (pro námi zmíněné dva typy fotodiod) v intervalu vlnových délek 860-895 nm. V tomto textu se nebudeme zabývat tím, proč a jak fotodioda funguje. Je pro nás vhodným a dostupným detektorem IR světla, které s její pomocí můžeme zkoumat, nebudeme se ale zabývat fotodiodou samotnou. Zájemce odkazujeme na vhodnou literaturu, např. [10].

Pokusy s ultrafialovou LED

Ultrafialová LED je také běžně dostupnou elektronickou součástí, kterou bez větších problémů seženete ve specializovaných elektrotechnických prodejnách. Experimenty s ní jsou bezpečné. Na rozdíl od různých UV výbojek je intenzita světla, které vydává UV LED, velmi malá a nehrozí poškození zraku. Zapojte UV LED pomocí vodičů s krokosvorkami k ploché baterii. Musíte použít ochranný rezistor v sérii s LED! ($R = 120 \Omega$)

1. Prohlédněte si (v zatemněné místnosti, nebo v optické kóji v IFL) bankovky ve světle UV diody. Posviťte si na různé jiné věci (např. na jízdenky MDH, na zuby, ...). Proč některé látky výrazně svítí v UV světle a jiné ne?
2. Prozkoumejte světlo UV LED pomocí digitálního, nebo klasického spektrometru. Podobně jako UV LED připojte k baterii různé barevné LED (vždy s ochranným odporem!). Zaznamenejte spektra těchto LED.

Skládání barev

Proveďte pokus s aditivním skládáním barev pomocí soupravy, kterou máte k dispozici v IFL. Každou ze tří lampiček s barevným filtrem nastavte tak, aby vytvářela barevný kruh na bílé zdi. Jednotlivé barevné kruhy na zdi překrývejte. Intenzitu osvětlení měňte tím, že lampičky přibližujete, nebo vzdalujete od zdi. Vyzkoušejte, které barvy lze namíchat ze tří použitých monochromatických světél.

Barevné a polarizační filtry

K pokusům se světlem je možné použít různé druhy filtrů. Vyzkoušejte si funkci tzv. 45° filtru. Tento filtr odráží ze světla, které k němu dopadá pod úhlem 45° , pouze jednu vlnovou délku (resp. úzkou oblast vlnových délek). Filtrem navíc prochází světlo doplňkové barvy k barvě odražené.

POZOR! Filtry jsou velmi citlivé na dotyk rukou a na jakékoli jiné znečištění! Pracujte s nimi velmi opatrně a nikdy je neberte jinak, než pouze „z boku“. Neodkládejte je ani na stůl, vraťte je do původního obalu.

Vyzkoušejte si také experimenty s velkými polarizačními filtry. Navrhněte nějaké zajímavé pokusy s těmito filtry a proveďte je.

Všechny typy filtrů, které používáme v IFL, lze bez problémů objednat od specializovaných firem. Jejich ceny jsou ale poměrně vysoké a vzhledem k jejich náchylnosti k poškození, nebo i zničení, asi nejsou vhodnou pomůckou pro běžné školní experimentování. Pokud byste ale o filtry měli vážný zájem, rádi vám sdělíme, kde a jak (a přibližně za kolik) je můžete získat.

Pozn.: Pokud byste se chtěli blíže seznámit s problematikou „neviditelného světla“, konkrétně s různými zajímavostmi okolo zobrazování pomocí infračerveného světla, vřele doporučujeme knihu [11].

5. Na hranici optiky a mikrosvětla

5.1 Fotoelektrický jev

Ke studiu fotoelektrického jevu budete používat aparaturu podle následujícího obrázku.



Obr. 5.1 – Aparatura pro měření fotoelektrického jevu

Zdrojem světla je rtuťová výbojka umístěná ve skříňce, která zajišťuje její snadné připojení k napájecímu zdroji.

POZOR!!! Výbojku **nezapojte** do zásuvky 230 V, ale připojte ji k tomu určenému napájecímu zdroji! Vidlice na konci napájecí šňůry skříňky s výbojkou má shodou okolností takové rozměry, že by ji do síťové zásuvky bylo možné zasunout. Pokud by se to ale nějakým nedopatřením stalo, došlo by ke zničení výbojky.

Skříňka je vybavena objímkou pro nasunutí monochromatického filtru. Budete používat 5 filtrů pro různé vlnové délky světla.

Výbojka s filtrem osvětluje fotonku, která je připojena k zesilovači s připojeným multimetrem.

Fotonka má vstupní okénko kryté záslepkou, kterou je nutné před experimentem odsunout a nastavit vhodnou šířku otvoru, kterým budete při měření na fotonku svítit. Nezapomeňte záslepku před měřením otevřít.

Teorie k fotoelektrickému jevu

Ozařujeme-li světlem vhodné (dostatečně krátké) vlnové délky čistý kovový povrch, vyraží z něj světlo elektrony. Tento jev nazýváme fotoelektrický jev, nebo též fotoefekt. Fotoefekt v našem případě studujeme ve fotonce. Vyražené elektrony mohou být při vhodném zapojení elektrod fotonky nositeli elektrického proudu (tzv. fotoproudu). Pomocí vnějšího regulovatelného zdroje elektrického napětí můžeme tento fotoproud měnit. Klesne-li fotoproud na nulu (zabrzdili jsme všechny vyražené elektrony) hovoříme o napětí, při němž k tomu došlo, jako o brzdném napětí U_b .

Albert Einstein popsal fotoefekt rovnicí:

$$h\nu = E_k + A, \quad (6)$$

kde E_k je kinetická energie vyraženého elektronu, A výstupní práce a $h\nu$ je energie fotonu (Planckova konstanta násobená frekvencí světla).

Tato rovnice popisuje zákon zachování energie pro jednu interakci fotonu s elektronem v kovu. Za nejvýhodnějších podmínek vystoupí elektron z kovu s maximální možnou kinetickou energií $E_{k,max}$. Při zastavení tohoto elektronu brzdným napětím U_b platí

$$E_{k,max} = eU_b, \quad (7)$$

kde e značí náboj elektronu.

Rovnici (6) tedy přepíšeme (a upravíme) na tvar:

$$U_b = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}, \quad (8)$$

Vezmeme-li v úvahu ještě kontaktní potenciál ϕ , potom rovnici (8) přepíšeme na tvar:

$$U_b = \frac{h}{e}\nu - \frac{A+\phi}{e}. \quad (9)$$

Zpřesnění rovnice fotoelektrického jevu zavedením kontaktního potenciálu zavedli ve 30. letech 20. století Owen Richardson a Arthur Compton. Jsou-li dva různé kovy navzájem spojeny (přímo, nebo prostřednictvím elektrického obvodu), existuje mezi nimi rozdíl elektrických potenciálů. Tento rozdíl nazýváme kontaktním potenciálem. Elektrody v naší fotonce mají povrchy z různých kovů, s kontaktním potenciálem tedy musíme počítat.

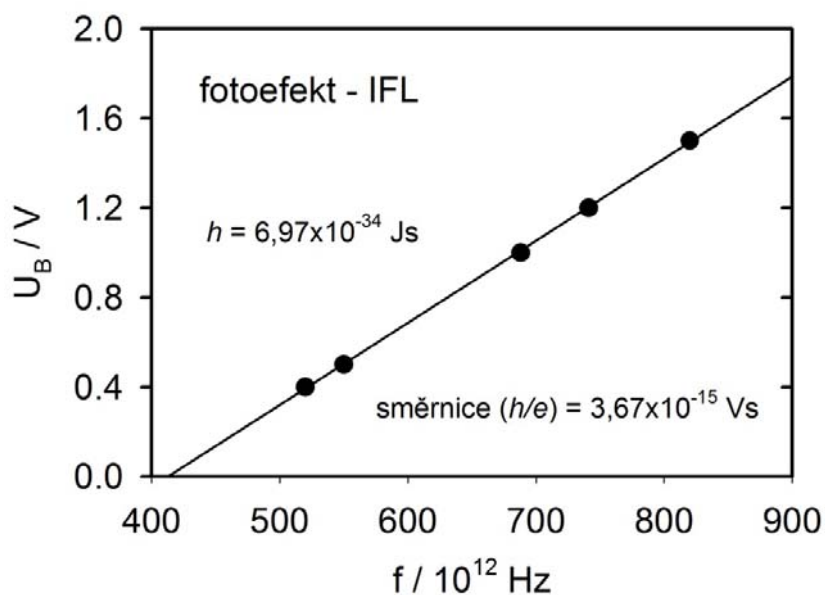
Můžeme předpokládat, že výstupní práce ani kontaktní potenciál nezávisí na frekvenci světla a proto je mezi brzdným napětím (resp. potenciálem) a frekvencí přímá úměrnost. Směrnice jejího grafického vyjádření je podílem Planckovy konstanty a náboje elektronu.

Provedení experimentu:

Použijte postupně všechny filtry a změřte brzdná napětí U_b odpovídající frekvencím použitého světla.

POZOR!!! S filtry pracujte velmi opatrně. V žádném případě nesmíte sahat na jejich optickou plochu! Berte je do rukou pouze za objímky!

Na obrázku 4.26 si můžete prohlédnout naše kontrolní výsledky. Hodnota Planckovy konstanty nám vychází $h = 6,97 \cdot 10^{-34}$ Js. (Tabulková hodnota je $6,62 \cdot 10^{-34}$ Js.)



Obr. 5.2 – Výsledky měření Planckovy konstanty

Závěrem

V této brožurce jsme se věnovali popisu experimentů s elektromagnetickým zářením. Zaměřili jsme se na experimenty, které jsou připraveny v Interaktivní fyzikální laboratoři MFF UK. Pokud IFL navštívíte se svými žáky, můžete si všechny popsané pokusy vyzkoušet.

V předchozím textu se objevily některé otázky, na které jsme přímo neodpověděli. Příručka ale obsahuje jako přílohu CD, kde odpovědi na zmíněné otázky naleznete. Na CD najdete také text této brožury s tím rozdílem, že většina fotografií je barevných. Naleznete zde i některé doplňující texty k tématům, kterým je brožura věnována. Na CD jsou také pracovní listy a návody k úlohám. Ty jsou k dispozici v IFL ale můžete se s nimi seznámit již před návštěvou laboratoře.

Pokud Vás některé z témat probíraných v této brožurce zaujalo natolik, že byste jej rádi zahrnuli do své výuky, budeme se na vás těšit v IFL.

Literatura:

- [1] Feynmann R. P., Leighton R. B., Sands M.: *Feynmanovy přednášky z fyziky 1*. Fragment, Havlíčkův Brod 2000.
- [2] Rojko M.: *Vlny kolem nás* (výukový film JČMF).
- [3] Drozd Z., Dvořák L., Svoboda E., Němec L.: *DVD Světlo a zvuk*. Otevřená věda regionům, AVČR 2008.
- [4] Dvořák L.: *Vlnění a akustika s gumičkou a počítačem*. In: Dvořák L. (ed.) *Dílňky Heuréky 2003–2004* (Sborník konferencí projektu Heuréka). Prometheus, Praha 2005, s. 21
- [5] Hubeňák J.: *Souprava pro demonstraci vlastností elektromagnetické vlny na vedení a v prostoru* (návod k použití demonstrační aparatury). Hradec Králové 2002.
- [6] Mayer D.: *Pohledy do minulosti elektrotechniky*. KOPP, České Budějovice 2004.
- [7] Dvořák L.: *Trocha fyziky z Malé Hraštic*. In: *Jak učím fyziku?* (Sborník příspěvků ze semináře Vlachovice 2011.)
- [8] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika* (Část 2 Mechanika – Termodynamika). Vutium Brno + Prometheus Praha, s. 516.
- [9] Brockmeyer H.: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik* 30, 7 (1981) 48.
- [10] Vobecký J., Záhlava V.: *Elektronika*. Grada Publishing sro., Praha 2001.
- [11] Vollmer M., Möllmann K. P.: *Infrared Thermal Imaging*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany 2010.