

# Mikrovlny

## Abstrakt

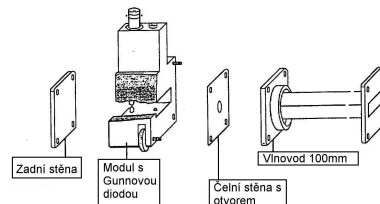
Mikrovlnné záření je běžnou součástí každodenního života, ať už díky mobilním telefonům, satelitům či mikrovlnným troubám. Seznámíme se s jeho vlastnostmi a využijeme jich k demonstraci vlastností viditelného světla.

**Pomůcky:** Gunnův oscilátor 737 01, sonda elektrického pole 737 35, zdroj napětí se zesilovačem 737 020, trychtýřovitý nástavec 737 21, tyč 240mm 737 15, transformátor 220V/12V 562 791, 2 BNC kabely 737 01, reproduktory, 3 podstavy, USB link PASCO 2100, osobní počítač, program pro datový sběr Data Studio, kartonová souřadnicová síť, polarizační mřížka, 2 držáky na desky, 2 kovové desky 230 × 230mm, dielektrická deska PVC 20mm, dielektrická deska (akrylátové sklo), kovová deska 230 × 60mm, pravítko, dutý půlválec, křemenný písek 1, 5kg, držák půlválce, trychtýř, "A" podstava, konvexní čočka, Lecherovo vedení + kovová spojka, kovový vlnovod, funkční generátor,

## 1 Základní pojmy a vztahy

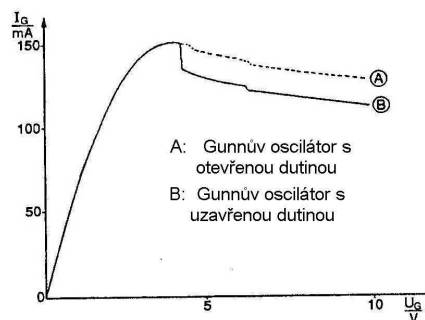
Mikrovlnné záření je elektromagnetické vlnění v rozsahu frekvencí 300MHz - 300GHz, což odpovídá vlnovým délkám 1mm - 1m. Mikrovlny o nižších frekvencích se používají k televizním a radiovým přenosům. Přestože jejich frekvence je minimálně o tři řády nižší než u viditelného světla, mají oba typy záření řadu shodných vlastností.

Zdrojem záření pro nás bude **Gunnův oscilátor**. Jeho frekvence je pevně stanovena na 9,4 GHz a výkon 20 mW, což je hladina bezpečná pro provádění všech experimentů. Takto malý výkon má však za následek velké tlumení postupující vlny dokonce i ve vzduchu, proto je třeba přijímaný signál zesílit seriovým zesilovačem. Oscilátor se skládá z centrální části, která obsahuje Gunnovu diodu v obdélníkovém výřezu.



Obrázek 1: Gunnův oscilátor

Vzadu je kovová destička a vepředu destička s otvorem. Dohromady tak tvoří dutinu (viz. obr.1), ve které záření z Gunnovy diody vytváří stojaté vlnění a to pak prochází otvorem do obdélníkového vlnovodu. Vlnová délka stojatého vlnění tak závisí pouze na velikosti dutiny. Oscilace vycházející z dutiny jsou tlumeny v čase, což je způsobeno nedokonalou vodivostí kovových stěn (ztráty v dielektrických částech).



Obrázek 2: Voltampérová charakteristika Gunnovy diody

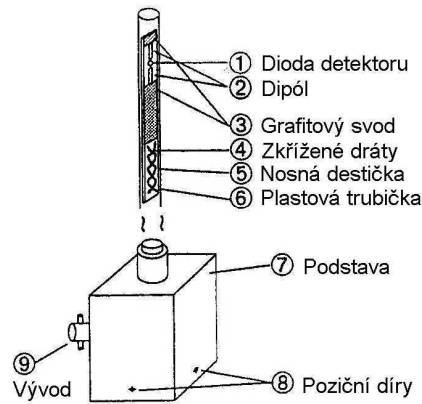
Proto musí Gunnova dioda působit jako aktivní prvek a dodávat další energii stojatému vlnění. Gunnova dioda využívá Gunnova jevu, který se vyskytuje u některých polovodičů (GaAs). Představme si, že přivedeme napětí  $U$  na dva konce polovodiče, potom nosiče náboje budou uchlovány na driftovou rychlost

$$v_D = \mu E, \quad (1)$$

kde  $\mu$  je pohyblivost nosičů [ $m^2V^{-1}s^{-1}$ ] a  $E$  intenzita elektrického pole. Pokud stále zvyšujeme napětí, dostaneme se do bodu, kdy driftová rychlost přestane růst a náhle začne klesat (viz. obr. 2).

Tato mezní intenzita může dosáhnout obrovských hodnot, třeba i  $400\,000\,Vm^{-1}$ . Pro takto vysoké intenzity už  $\mu$  není konstantní, ale závisí složitě na  $E$  a má klesající tendenci. Výsledkem je tedy pokles driftové rychlosti. Tento pokles rychlosti nosičů však není globální a okamžitý, ale přísně lokální. Díky tomu se v krystalu vytvoří domény (jakési shluky nosičů) a tyto shluky procházejí mezi elektrodami, čímž generují mikrovlnné záření. Gunnův oscilátor produkuje lineárně polarizované vlnění.

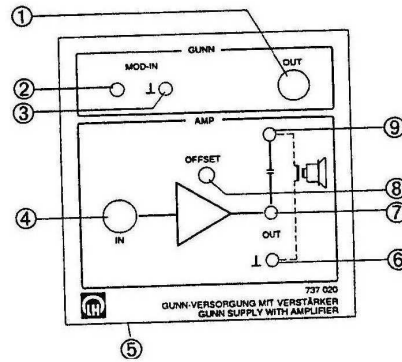
Pro detekci záření budeme používat **sondu elektrického pole** (viz. obr. 3).



Obrázek 3: Sonda elektrického pole

Jedná se o tištěný spoj ve skleněné trubičce. Krátká část na vrcholu sondy slouží jako dipolová anténa. Je umístěna rovnoběžně se sondou a tedy přijímá vlnění převážně v tomto směru. Přijatý signál je předán diodě detektoru. Svod signálu dolů není řešen vodiči, aby nedocházelo k rušení díky proměnné magnetické složce pole, ale je řešen vysokoodporovou grafitovou vrstvou. V dolní části jsou měděné vodiče, které jsou ze stejného důvodu překříženy. Díky konstrukci sondy lze snadno změřit polarizaci lineárně polarizovaného elektromagnetického pole. Pokud natáčíme sondu, až najdeme maximální signál, pak směr polarizace je rovnoběžný se směrem sondy.

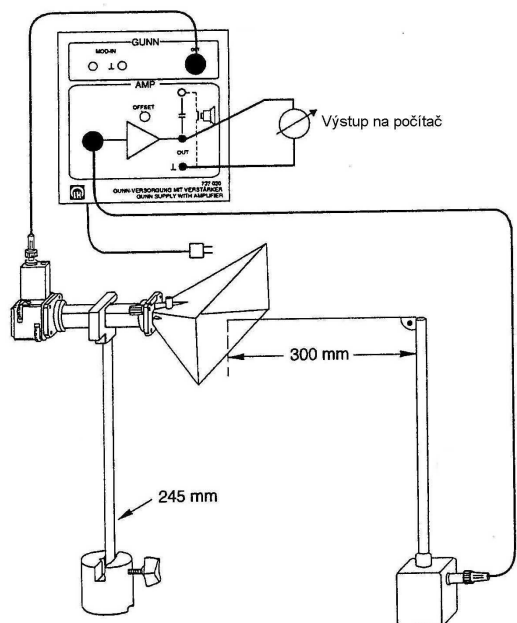
Zesilovacím článkem bude **zdroj se zesilovačem**. Pro napájení Gunnova oscilátoru je třeba zdroj 9 V střídavého napětí.



- 1: Zdroj napětí pro Gunnův oscilátor
- 2: Vstup pro funkční generátor
- 3: Vstup pro funkční generátor zem
- 4: Výstup ze sondy
- 5: Napájení zesilovače
- 6: Výstup ze zesilovače zem
- 7: Výstup ze zesilovače na multimetr
- 8: Kalibrační vstup
- 9: Výstup ze zesilovače na reproduktor

Obrázek 4: Zdroj napětí se zesilovačem

Tento zdroj je dohromady se zesilovačem (viz. obr 4). Zesilovač dává na výstupu signál asi 100 krát zvětšený. Je třeba počítat s tím, že ze sondy vychází záporné napětí a tedy všechna měření budou záporná (jen konstrukční detail - nás bude vždy zajímat jen absolutní hodnota napětí). Standardní zapojení je na obr. 5. Toto nastavení je výchozí a v každém experimentu z něj budeme vycházet.



Obrázek 5: Výchozí nastavení experimentu

## 2 Pracovní úkoly

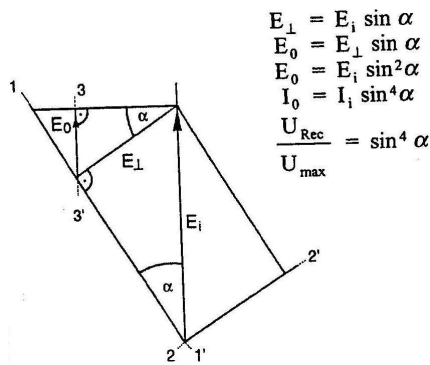
1. Ověřte, že pole před zářičem je lineárně polarizované a určete směr polarizace. Ověřte Malusův zákon pro danou polarizační mřížku. Sestrojte dva grafy závislosti přijímaného napětí na úhlu pootočení polarizační mřížky nejprve pro sondu vertikálně a potom horizontálně.
2. Proměřte rozložení elektromagnetického pole v rovině před zářičem a zobrazte jeho prostorový graf v programu Mathematica. Do protokolu zpracujte podélné a příčné rozložení pole (nezávislou veličinou budou souřadnice a závislou velikost napětí).
3. Demonstrujte a proměřte stojaté vlnění. Z rozložení pole určete vlnovou délku. V druhé části pokusu vložte dielektrickou desku do pole stojaté vlny a pomocí vztahů odvozených v postupu stanovte index lomu dielektrické desky.
4. Ověřte kvazioptické chování mikrovln - difrakce na hraně, štěrbině a překážce, zákon lomu a fokusace čočkou. Spočítejte vlnovou délku z grafu vlnění na štěrbině a index lomu cukru pomocí ohniskové vzdálenosti čočky. Sestrojte příslušné grafy.
5. Ověřte šíření mikrovln pomocí Lecherova vedení a vlnovodu. Ověřte, že podél Lecherova vedení se šíří stojatá vlna a určete z ní vlnovou délku.

## 3 Postup měření

1. **Polarizace:** Určení polarizace patří k základním charakteristikám vlnění. Jak víme z popisu Gunnova oscilátoru, elektromagnetické pole před zářičem je lineárně polarizované. Abychom se o tom přesvědčili, musíme zjistit, zda vektor intenzity  $\mathbf{E}$  kmitá stále v jednom směru. Vyjdeme z výchozího nastavení. Vezměte sondu a natáčením v rovině kolmé k postupu vlnění naleznete směr, ve kterém sonda přijímá maximální napětí. Jelikož sonda může detekovat pouze intenzitu v rovnoběžném směru a napětí v sondě se nemění, musí proto být vektor intenzity stále ve stejném směru. Pro ověření Malusova zákona použijeme mikrovlnnou polarizační mřížku. Ta má (stejně jako polarizační filtr v optice) tu vlastnost, že propouští vlnění polarizované jen v určitém směru. Vlnění polarizované v jiných směrech propouští sice také, ale jen ve velmi malé míře a Malusův zákon toto popisuje kvantitativně. Naši mřížkou jsou tenké kovové pásky na dielektrické desce a fungují následovně. Tyto pásky zabraňují průchodu vlny polarizované rovnoběžně s nimi a naopak propouštějí vlnu polarizovanou kolmo na proužky. Vysvětlit to lze tak, že kdyby procházela i vodorovně, pak díky velké konduktivitě kovu by se vytvářel velký proud v kovových vodivých proužcích a celá energie vlnění by byla spotřebována na udržení proudu. Dále předpokládáme, že dielektrická deska nemá pozorovatelný účinek na průchod mikrovln. Z optiky známe formulaci Malusova zákona jako

$$I_{(\theta)} = I_0 \cos^2 \theta, \quad (2)$$

kde  $I_0$  je intenzita vstupujícího záření a  $\theta$  je úhel mezi vektorem intenzity a propustným směrem filtru. Tento vztah je však odvozen za předpokladu, že průchozí směr je pro úhel  $\theta = 0^\circ$  a detektor přijímá vlnění v libovolném směru. V našem experimentu je však průchozí směr pro  $\theta = 90^\circ$ , musíme tedy nahradit funkci kosinus funkcí sinus a dále naše sonda detekuje pouze složku intenzity rovnoběžnou s ní, proto musíme důkladněji zanalyzovat experiment. Nechť tedy máme osu zářiče i sondu rovnoběžně (viz. obr.8). Vyjdeme z následujícího obrázku 6.

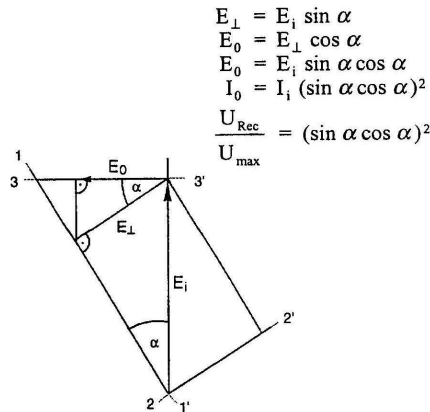


Obrázek 6: Modifikace Malusova zákona I.

Rozložíme vektor  $\mathbf{E}_i$  z dopadající vlny do dvou směrů kolmo s proužky a rovnoběžně s proužky. Z původního vektoru projde pouze část kolmá na proužky, tedy  $\mathbf{E}_\perp$ . Ta dopadá na sondu, ale sonda umí zachytit pouze její složku v rovnoběžném směru. Musíme tedy  $\mathbf{E}_\perp$  rozložit do směru rovnoběžně se sondou ( $\mathbf{E}_0$ ) a kolmo k sondě. Pak už jen použijeme definici intenzity  $\mathbf{I} = \langle \mathbf{E}^2 \rangle_T$  a dostaneme výsledný vztah

$$\mathbf{I}_{(\theta)} = \mathbf{I}_0 \sin^4 \theta. \quad (3)$$

Pro sondu kolmo na osu zářiče (viz. obr. 9) je odvození podobné, podle následujícího obrázku 7.



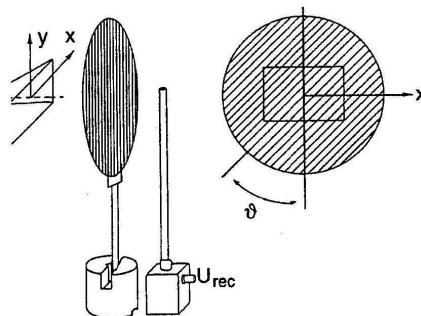
Obrázek 7: Modifikace Malusova zákona II.

Výsledkem je vztah

$$\mathbf{I}_{(\theta)} = \mathbf{I}_0 (\sin \theta \cos \theta)^2. \quad (4)$$

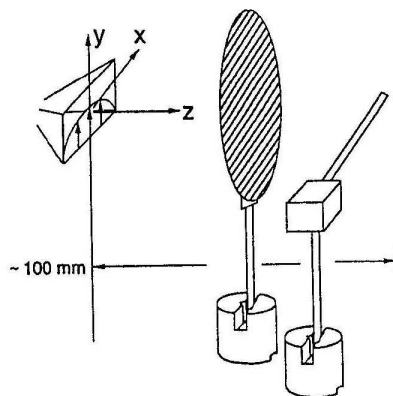
Ovšem kvůli standartizaci použijeme raději vztah

$$\mathbf{I}_{(\theta)} = \mathbf{I}_0 4 (\sin \theta \cos \theta)^2. \quad (5)$$



Obrázek 8: Ověření Malusova zákona se sondou vertikálně

Sestavte experiment podle obrázku 8. Měřte přijaté napětí jako funkci pootočení mřížky pro úhly od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v krocích po  $10^\circ$ . Sestrojte graf závislosti  $U$  na  $\theta$  z vámi naměřených hodnot i z Malusova zákona. Za  $I_0$ berte hodnotu, kterou jste naměřili pro  $\theta = 90^\circ$ .



Obrázek 9: Ověření Malusova zákona se sondou horizontálně

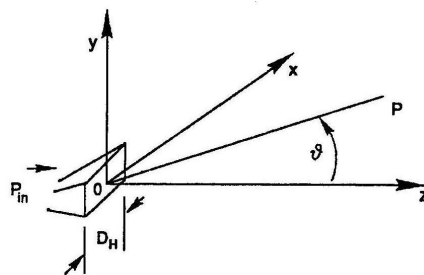
Pokus zopakujte i pro sondu kolmo na zářič podle obrázku 9 a zpracujte příslušný graf. Je třeba dbát na to, aby dipól sondy byl vždy ve stejné výši jako střed zářiče.

## 2. Rozložení pole:

V tomto experimentu se pokusíme zjistit, jak vypadá pole před zářičem. Tento zdroj, byť je specificky konstruován, má vlastnosti podobné, jako ostatní mikrovlnné zdroje. Proto analýzou jeho pole můžeme poznat obtíže spojené s šířením mikrovlnného záření. Musíme rozlišit mezi blízkým a dalekým polem. Blízké pole bezprostředně před zdrojem má obecně velmi složité rozložení. Hranice je dána rovnicí

$$r_0 = \frac{2D_H^2}{\lambda_0}, \quad (6)$$

kde  $D_H$  je největší rozměr naší antény (tedy vodorovný rozměr trychtýřového nástavce).

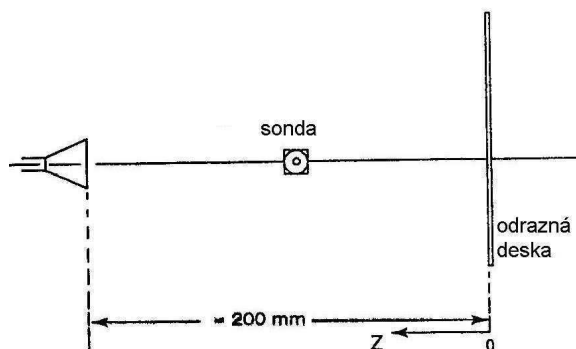


Obrázek 10: Soustava souřadnic před zářičem

V našem případě bereme  $r_0 = 100\text{mm}$ . Zároveň je třeba si uvědomit, že toto měření je velmi závislé na rušení z okolních odrazů. Abyste dostali základní představu o rozložení pole, použijeme nejprve zapojení s reproduktory. Protože náš zdroj umožňuje modulovat frekvenci, použijeme frekvenční generátor, který připojíme na vstup zdroje. Nejlepší výsledky dostanete, pokud zvolíte pilovitý signál a nějakou vhodnou slyšitelnou frekvenci. Výstup ze zesilovače nepůjde do počítače, ale do reproduktorů. Máme-li takto připravené zapojení, spustíme zářič a zkusíme před ním pohybovat sondou. Intenzita zvuku je úměrná intenzitě záření v daném místě, můžeme si tedy udělat představu, jak asi bude pole před zářičem vypadat. Doporučujeme projet sondou podélně od zářiče a také v příčném směru k zářiči. Nyní se pokusíme naše poznatky kvantifikovat. Předělejte zapojení do původního výchozího nastavení. Před zdroj položte kartonovou souřadnou síť. Zkusíme proměřit závislost napětí na souřadnicích. Získaná data můžete zadat do rutiny programu Mathematica, který je k dispozici ve složce tmp na počítači. Tento program vám zobrazí rovinný graf rozložení pole. Následně zpracujeme příčné a podélné rozložení pole. Zavedeme si před zdrojem souřadnice podle obr. 10. Podélné rozložení pole znamená závislost detekovaného napětí na  $z$ -ové souřadnici pro  $x = 0$ . Příčné rozložení pole znamená závislost detekovaného napětí na  $x$ -ové souřadnici (v kladném i záporném směru) pro zvolené pevné  $z$ . Do jednoho grafu zpracujte podélné rozložení a do dalšího příčné rozložení pro 2 hodnoty  $z$  (třeba  $100\text{mm}$  a  $200\text{mm}$ ). Z podélného rozložení vidíme i obtíže mikrovlnného přenosu, když si představíme televizní vysílání z družice, která je ve vzdálenosti  $36000\text{km}$  od povrchu, nebo šíření mobilního signálu.

- 3. Stojatá vlna** V minulém experimentu jsme zjistili rozložení pole před zářičem - pole postupné vlny. Pokud dojde k superpozici (interferenci) dvou postupných vln o stejné amplitudě opačného směru, dostaneme stojatou vlnu, jejíž amplituda se s časem nemění. Jsou tam tedy místa, kde je amplituda nulová (uzly) a kde je maximální (kmity).

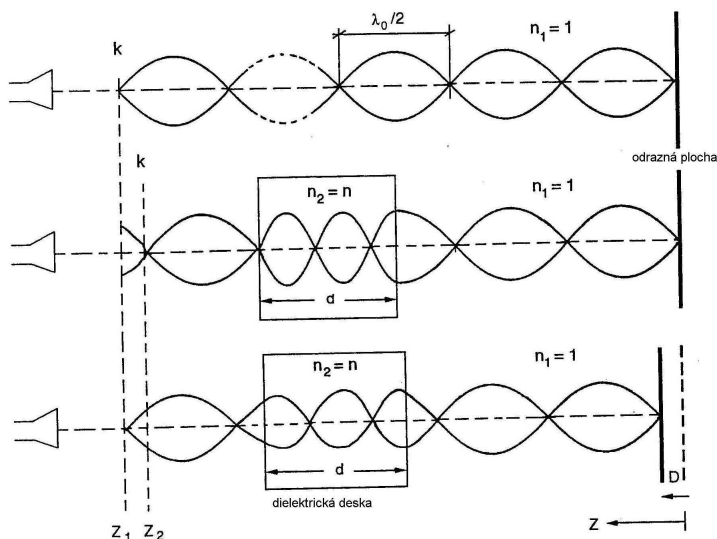
Tato maxima resp. minima jsou od sebe vzdálena právě  $\frac{\lambda}{2}$ . Abychom sestrojili stojatou vlnu, vyjdeme z výchozího nastavení a za sondu umístíme do vhodné vzdálenosti kovovou desku.



Obrázek 11: Experiment pro stojatou vlnu

Mezi desku a zdroj umístíme pravítko (osu  $z$ ) tak, že počátek je u desky a kladný směr je k zářiči (viz. obr. 11). Nejprve proměřte rozložení stojaté vlny, tedy závislost napětí sondy na vzdálenosti od desky pro  $z$  od  $50\text{mm}$  do  $150\text{mm}$  s krokem  $3\text{mm}$ . Ze znalosti rozložení pole snadno určíme vzdálenost dvou sousedních minim (protože minima jsou lépe zjistitelná - případně změřte další hodnoty v okolí předpokládaných minim) a stanovíme vlnovou délku.

V další části pokusu stanovíme index lomu dielektrické desky. K odvození použitelného vztahu využijeme teoretický model optické dráhy. Optická dráha je vzdálenost, kterou by vlna urazila ve vakuu za daný čas. Takže ze vztahu pro rychlost získáme optickou dráhu  $l = 2nz$ , kde  $z$  je dráha uražená v prostředí o indexu  $n$ . Faktor 2 je ve vzorci kvůli odrazu. Přejdeme ke konkrétní realizaci pokusu. Zapojení je shodné s předchozím, jen mezi sondu a kovovou desku umístíme dielektrickou desku tloušťky  $d = 20\text{mm}$ .



Obrázek 12: Určení indexu lomu

Jelikož první minimum stojaté vlny je v odrazné desce ( $z = 0$ ), poloha  $k$ -tého minima je ve vzdálenosti  $z_1$  od desky (viz. obr. 12 - první případ). Optická dráha je v tomto případě

$$l_1 = 2n_1 z_1. \quad (7)$$

Po vsunutí dielektrické desky se toto  $k$ -té minimum mezi zdrojem a dielektrickou deskou posune směrem k odrazné desce a je nyní na souřadnici  $z_2$  (viz. obr. 12 - druhý případ). Tedy pro optickou dráhu nyní platí

$$l_2 = 2n_1(z_1 - d) + 2n_2 d. \quad (8)$$

a

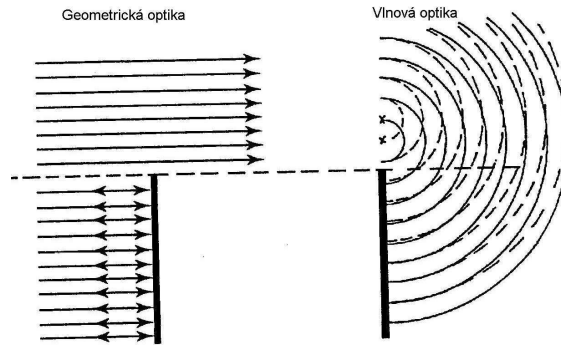
$$2(z_2 - z_1) = l_2 - l_1 = 2(n_2 - n_1)d \quad (9)$$

Výsledkem je tedy vztah pro  $n_1 = 1$

$$n_2 = \frac{z_2 - z_1}{d} + 1. \quad (10)$$

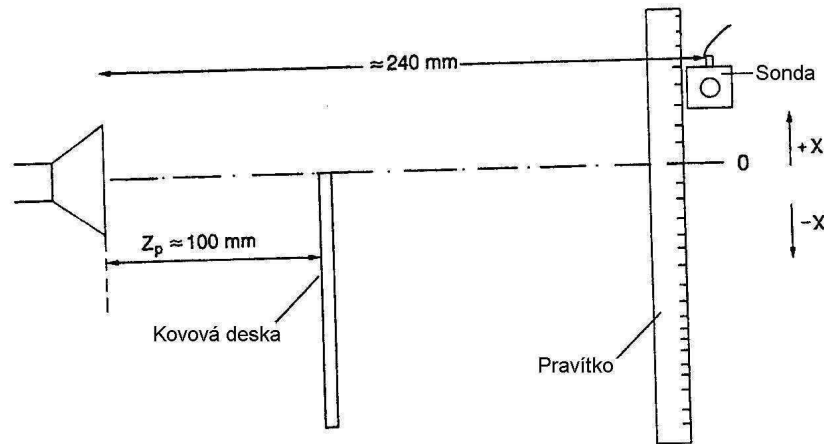
Tedy k určení indexu lomu dielektrické desky (PVC) stačí znát její tloušťku a posunutí minima po vložení desky do stojaté vlny. Na obr. 12 - třetí případ je ještě další možnost a to, že místo sondy budeme pohybovat odrazovou deskou, ale výsledný efekt je stejný. Dejte velice dobrý pozor, jelikož posunutí minima -směrem k diel. desce- je dost blízké vzdálenosti dvou sousedních minim.

4. **Difrakce** Tato část experimentu má za úkol demonstrovat jevy, při kterých dochází k ohybům paprsků resp. vlnění jako jsou difrakce, zákon lomu apod. Nejzákladnějším pokusem, který podporoval domněnku o vlnové podstatě světla, byl ohyb na hraně. Princip spočíval v tom, že pokud světlo dopadalo na nějakou hranu, jejíž rozměry byly srovnatelné s vlnovou délkou světla, pak se paprsky ohýbaly a byly pozorovatelné i v místech, kam podle přímočarého šíření paprsku nemohou dosáhnout.



Obrázek 13: Vysvětlení odrazu na hraně

Tento jev vysvětlil Christian Huygens pomocí vlnové podstaty světla. Můžeme si představit, že každý bod čela vlny je zdrojem druhotného vlnění, které se šíří v kulových vlnoplochách. Intenzita v daném bodě je pak superpozicí příspěvků od všech druhotných vln (konstruktivních či destruktivních) - viz. obr. 13. Díky vlastnostem mikrovlm můžeme tento jev pozorovat ve velkém měřítku.



Obrázek 14: Nastavení experimentu pro ohyb na hraně

Umístěte tedy kovovou desku před zářič podle obr. 14 a měřte závislost napětí na  $x$  v rozsahu od  $+50\text{mm}$  do  $-80\text{mm}$  s krokem  $10\text{mm}$  a zpracujte výsledky do grafu. Velmi dobře si tento jev můžete představit, pokud použijete zapojení s reproduktory (viz. úkol 2) a zkusíte si projet sondou oblast za deskou.

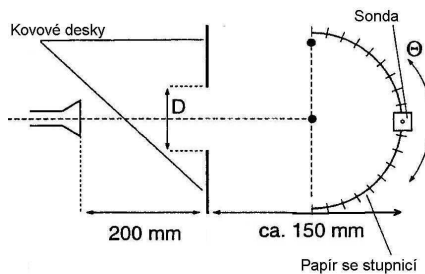
Dalším známým jevem je difrakce na šterbinu. Pokud světlo dopadá na šterbinu, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla, výsledný difrakční obrazec se nedá vysvětlit pomocí geometrické optiky. Nulté maximum odpovídá přesně prostředku šterbinu a dále se střídají minima a maxima. Můžeme to popsat vztahy pro maxima:

$$\sin \Theta_m = m \frac{\lambda}{2D}, \quad m = 0, 3, 5 \dots \quad (11)$$

a pro minima:

$$\sin \Theta_m = m \frac{\lambda}{D}, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

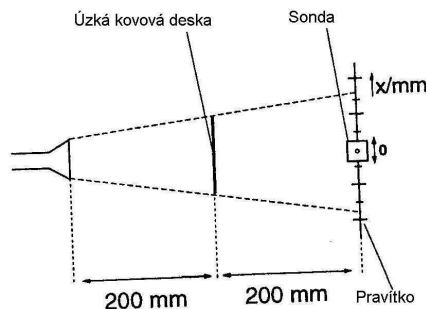
Difrakční obrazec je určen poměrem  $\frac{\lambda}{D}$ , kde  $D$  je šířka štěrbiny. Pokud je tento poměr menší než 1, pak jsou pozorovatelná maxima i minima. Pokud je tento poměr roven jedné, projeví se jen nulté maximum a minima již nelze dosáhnout.



Obrázek 15: Nastavení aparatury pro ohyb na štěrbině

Sestrojte tedy aparaturu podle obr. 15. Pod sondu umístěte papír s vytištěným úhloměrem, který je součástí úlohy. Štěrbinu vytvořte ze dvou kovových desek. Měřit budeme pro  $D = 40\text{mm}$  a  $D = 60\text{mm}$ . V obou případech změřte závislost napětí na úhlu  $\Theta$  a obě závislosti zpracujte do grafu. Pokuste se z polohy vedlejších maxim stanovit vlnovou délku pomocí výše uvedeného vztahu a porovnejte ji s ostatními hodnotami.

Až dotud jsme předpokládali, že překážka se štěrbinou je nekonečná a vlnění za překážkou je tvořeno pouze tím, co projde. Teď vyzkoušíme ohyb na překážce konečných rozměrů.



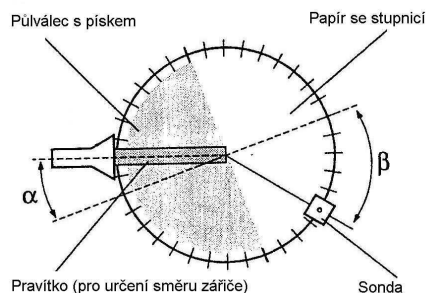
Obrázek 16: Nastavení aparatury pro ohyb na překážce

Sestavte experiment podle obr. 16. Za překážku zvolte úzkou kovovou desku a proměřte závislost napětí na  $x$ -ové souřadnici v rozsahu  $\pm 150\text{mm}$  po deseti milimetrech a výsledek zpracujte do grafu.

Další úlohou na ohyb paprsků je zákon lomu. Z optiky víme, že paprsek dopadající pod určitým úhlem na rozhraní dvou materiálů s různými indexy lomu se dělí na lomený a odražený paprsek. Paprsek lomený v opticky hustším prostředí je odražen podle normály v bodě dopadu. Úhel dopadu a úhel lomu jsou spolu spojeny vztahem

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (13)$$

V následujícím pokusu zjistíme změnu směru postupu paprsku lomem na půlválci. Půlválec je dutý a může být naplněn různými látkami (zde jen cukr). Umístíme ho na tyč pomocí nástavce. Takto připravený půlválec vložíme do výchozího nastavení mezi zářič a sondu. Dovnitř opatrně nasypeme cukr.

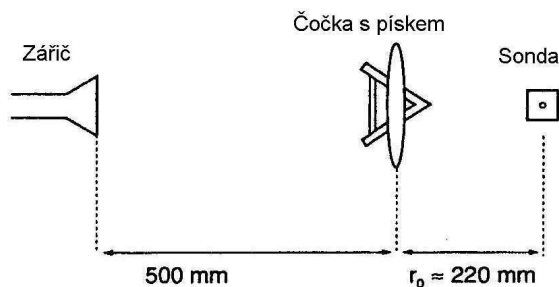


Obrázek 17: Ověření zákona lomu

Nastavte vysílač k oblí straně půlválce tak, aby mířil do středu. Úhel dopadu je dán na stupnici půlválce, papírovou stupnici pro úhel lomu položte na stůl tak, aby obě stupnice dohromady vytvářely kružnici. Pro testování platnosti



zákona lomu nastavte vždy vysílač na určitý úhel  $\alpha$  a pohybujte sondou po druhé stupnici tak, abyste našli nejvyšší možné napětí. S půlválcem v žádném případě nepohybujte, nastavujte úhel vždy pomocí natočení zdroje. Poloha maxima odpovídá úhlu lomu  $\beta$ . Výsledné hodnoty dosadíte do zákona lomu a stanovíte index lomu  $n_2$  cukru ( $n_1 = 1$ ). Kolem  $40^\circ$  nastává totální odraz a žádný paprsek cukrem neprojde. Posledním pokusem na ohyb paprsku je zaostřování(fokusace) záření do bodu pomocí čoček.



Obrázek 18: Fokusace vlnění čočkou

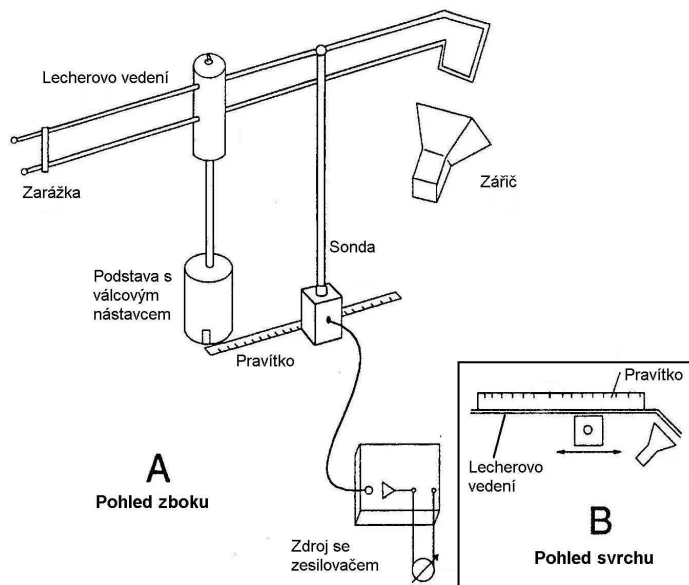
Sestavíme experiment podle obr. 18. Čočkou je pro nás konvexní pouzdro naplněné cukrem. Nejprve změříme napětí na sondě bez čočky. Následně vložíme čočku a pohybujeme s ní tak, abychom dostali maximální napětí. Vzdálenost čočky od sondy je pak ohniskovou vzdáleností. Můžeme si zde pomoci zapojením s reproduktory podle předchozích úkolů. Z optiky víme, že pro tenkou spojnou čočku platí rovnice

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{2}{r}\right), \quad (14)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $n_2$  je index lomu vnitřního materiálu,  $n_1 = 1$  je index lomu vnějšího prostředí(vzduch) a  $r$  je poloměr křivosti čočky. K určení  $r$  použijte znalostí z minulého semestru. Z této rovnice vypočítejte index lomu cukru a porovnejte ho s dříve změřenou hodnotou.

#### 5. Vedení:

V tomto pokusu si ukážeme, jak lze mikrovlnné záření vést i jinou cestou než přímým šířením v prostoru. Nejprve vyzkoušíme Lecherovo vedení, pomocí něhož lze vést elektromagnetickou vlnu do libovolného místa. V našem případě se jedná o dva kulaté dráty  $3\text{ mm}$  v průměru,  $400\text{ mm}$  dlouhé, vedené rovnoběžně k sobě ve vzdálenosti  $10\text{ mm}$ . Na jednom konci jsou svařené do smyčky v úhlu  $45^\circ$ . Tato smyčka dovoluje excitovat vlny ve vedení díky magnetickému poli Gunnova oscilátoru. Sestavte experiment podle obrázku 19.

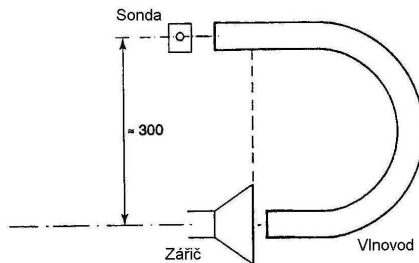


Obrázek 19: Experiment s Lecherovým vedením

Je nutné, aby sonda byla vždy stejně orientovaná k vedení a vždy ve stejné vzdálenosti (asi  $3\text{ mm}$ ). Na konec vedení upevněte vodivou svorku, která bude vytvářet pevný konec pro dopadající vlnu. Výsledkem bude stojatá vlna jdoucí podél vedení. Držák vedení posuňte co nejvíce ke svorce, ale vedení musí zůstat vodorovné. Pravítko umístěte pod vedení asi  $6\text{ cm}$  od držáku směrem ke smyčce. Zářič namířte na smyčku v takové vzdálenosti, aby napětí registrované

sondou bylo co největší. Potom postupně posouvajte sondou a ověřte, že vlnění je skutečně stojaté. Dále určete vlnovou délku vlnění vybuzeného v Lecherově vedení (pokud je třeba, změřte další hodnoty). Použijte znalostí z předchozích úloh. Porovnejte tuto vlnovou délku s vlnovou délkou záření v prostoru.

Další možností vedení je vlnovod. V optice obecně je velmi jednoduché vytvořit rovnoběžné paprsky pomocí konkávních odrazných ploch a šířit je na dlouhou vzdálenost, pak je zaměřit do bodu pomocí čoček a vytvořit tak nový bodový zdroj. Avšak dochází ke ztrátám a vlnění je tlumeno se zvětšující se vzdáleností. Tento nedostatek odstraníme, pokud použijeme vlnovod (stejnou vlastnost má i Lecherovo vedení). Ve vlnovodu se vytvoří speciální typ vlny, která je však schopna postupovat jen při dosažení minimální frekvence (tzv. Cut-off frekvence). Proto není možné takto přenášet třeba vlnění střídavého napětí, ačkoliv by to bylo výhodné.



Obrázek 20: Zapojení vlnovodu

Sestavte aparaturu podle obrázku 20 nejprve bez vlnovodu a nastavte sondu někam, kde bude nulový příjem vlnění. Potom spojte sondu se zářičem pomocí vlnovodu a změřte napětí. Vlnovod stačí držet v ruce a může být i libovolně prohýbán.

## 4 Literatura

### Reference

- [1] doc. Ing. Ivan Štoll, CSc., Elektřina a magnetismus, Vydavatelství ČVUT Praha, 1998
- [2] doc. Ing. Ivan Štoll, CSc., doc. Ing. Jiří Tolar, CSc., Teoretická fyzika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1984
- [3] <http://fyzika.fjfi.cvut.cz>
- [4] <http://www.fjfi.cvut.cz>