

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.

1 Pracovní úkoly

1. DÚ: Odvoďte vztah (1) pro výpočet polohy interferenčních maxim při difrakci na mřížce.

$$(\sin \Theta)_{\max} = m \frac{\lambda}{d}, \quad m = 0, \pm 1, \dots \quad (1)$$

2. 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 U na úhlu pootočení polarizační mřížky θ nejprve pro sondu vertikálně a potom horizontálně.

3. Proměřte rozložení elektromagnetického pole v rovině před zářičem a zobrazte jeho prostorový graf ve vhodném programu (GNUplot, Mathematica, Matlab). Do protokolu zpracujte podélné a příčné rozložení pole (nezávislou veličinou budou souřadnice a závislou velikost napětí).

4. Demonstrujte a proměřte stojaté vlnění. Z rozložení pole určete vlnovou délku λ . V druhé části pokusu vložte dielektrickou desku do pole stojaté vlny a pomocí vztahů odvozených v postupu stanovte index lomu dielektrické desky n .

5. Ověřte kvazioptické chování mikrovln - difrakce na hraně, štěrbině a překážce, zákon lomu a fokusace čočkou. Spočítejte vlnovou délku λ z grafu vlnění na štěrbině a index lomu cukru n pomocí ohniskové vzdálenosti čočky. Sestrojte příslušné grafy.

6. Ověřte šíření mikrovln pomocí Lecherova vedení a vlnovodu. Ověřte, že podél Lecherova vedení se šíří stojatá vlna a určete z ní vlnovou délku λ .

2 Pomůcky

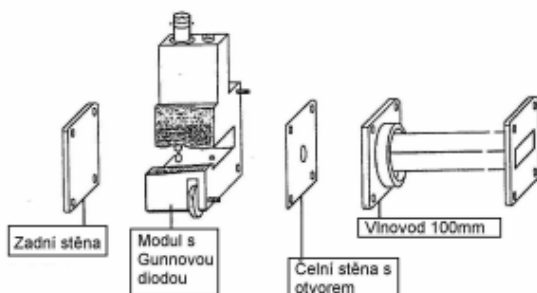
Pomůcky: Gunnův oscilátor 737 01, sonda elektrického pole 737 35, zdroj napětí se zesilovačem 737 020, trychtýřovitý nástavec 737 21, tyč 240 mm 737 15, transformátor 220V/12V 562 791, 2 BNC kabely 737 01, USB link PASCO 2100, osobní počítač, program pro datový sběr Data Studio, kartonová souřadnicová síť, polarizační mřížka, 2 držáky na desky, 2 kovové desky 230×230 mm, dielektrická deska PVC 20 mm, kovová deska 230×60 mm, pravítko, dutý půlválec, dřevěný držák půlválce, "A" podstava, konvexní čočka, Lecherovo vedení + kovová spojka, kovový vlnovod, technický cukr, stojan s držáky.

3 Základní pojmy a vztahy

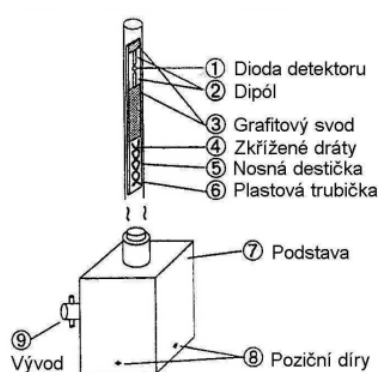
Mikrovlnné záření je elektromagnetické vlnění v rozsahu frekvencí 300 MHz - 300 GHz, což odpovídá vlnovým délkám 1 mm - 1 m. Mikrovlny o nižších frekvencích se používají k televizním a radiovým přenosům. Přestože jejich frekvence je minimálně o tři řády nižší než u viditelného světla, mají oba typy záření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

Zdrojem záření pro nás bude **Gunnův oscilátor** (viz Obr. 1). Jeho frekvence je pevně stanovena na 9,4 GHz a výkon 20 mW, což je hladina bezpečná pro provedení všech experimentů. Takto malý výkon má však za následek velké tlumení postupující vlny dokonce i ve vzduchu, proto je třeba přijímaný signál zesílit sériovým zesilovačem. Gunnův oscilátor produkuje lineárně polarizované vlnění.

Pro detekci záření budeme používat **sondu elektrického pole** (viz Obr. 2).



Obr. 1: Gunnův oscilátor.



Obr. 2: Sonda elektrického pole.

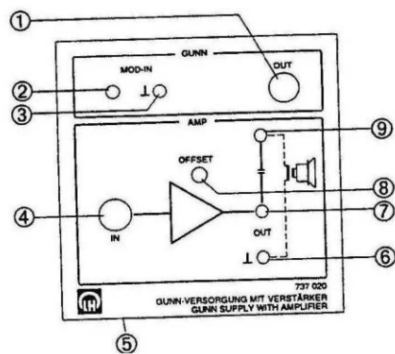
Jedná se o tiskový spoj ve skleněné trubičce. Krátká část na vrcholu sondy slouží jako dipolová anténa. Je umístěna rovnoběžně se sondou a tedy přijímá vlnění převážně v tomto směru. Přijatý signál je předán diodě detektoru. Svod signálu dolů není řešen vodiči, aby nedocházelo k rušení díky proměnné 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.

Tento zdroj je dohromady se zesilovačem (viz Obr. 3). 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 záporné (jen konstrukční detail - nás bude vždy zajímat jen absolutní hodnota napětí). Standardní zapojení je na Obr. 4. Toto nastavení je výchozí pro každý experiment.

4 Postup měření

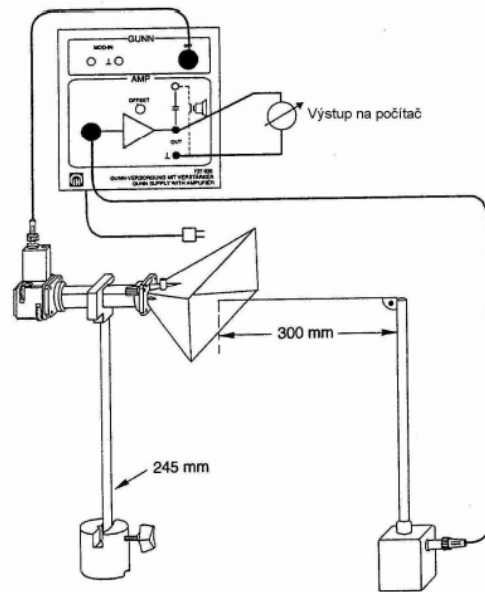
4.1 Polarizace

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 \vec{E} kmitá stále v jednom směru. Vyjdeme z



- 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

Obr. 3: Zdroj napětí se zesilovačem.



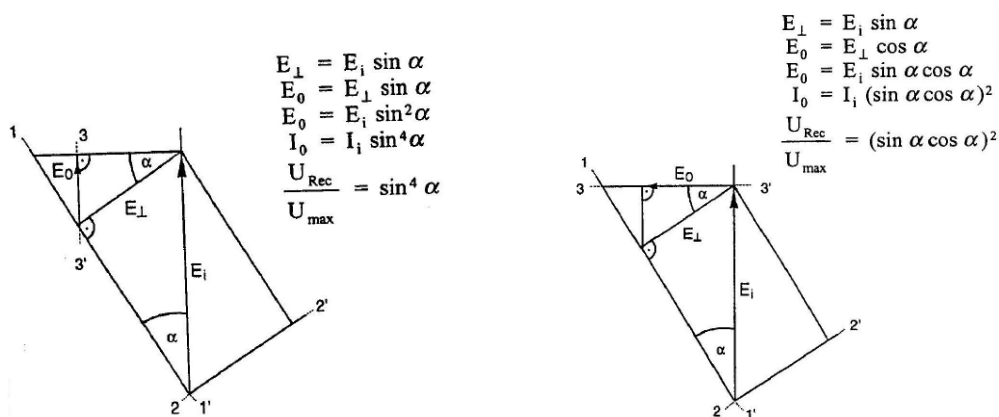
Obr. 4: Výchozí nastavení experimentu.

výchozího nastavení. Vezměte sondu a natáčením v rovině kolmé k postupu vlnění naleznete směr, ve kterém sonda přijímá maximální napětí U . 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: zabráňují průchodu vlny polarizované rovnoběžně s nimi a naopak propouštějí vlnu polarizovanou kolmo na proužky. Vysvětlit to lze tak, že kdyby procházela i vodorovně, poté by se díky velké konduktivitě kovu 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 θ 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 cosinus 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.6 vlevo). Vyjdeme z Obr. 5 vlevo.

Rozložíme vektor \vec{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 \vec{E}_\perp . Ta dopadá na sondu, ale sonda umí zachytit pouze její složku v rovnoběžném směru. Musíme tedy \vec{E}_\perp rozložit do směru rovnoběžně se sondou (\vec{E}_0) a kolmo k sondě. Pak už jen použijeme definici intenzity $I = \langle \vec{E}^2 \rangle_T$



Obr. 5: Modifikace Malusova zákona.

a dostaneme výsledný vztah

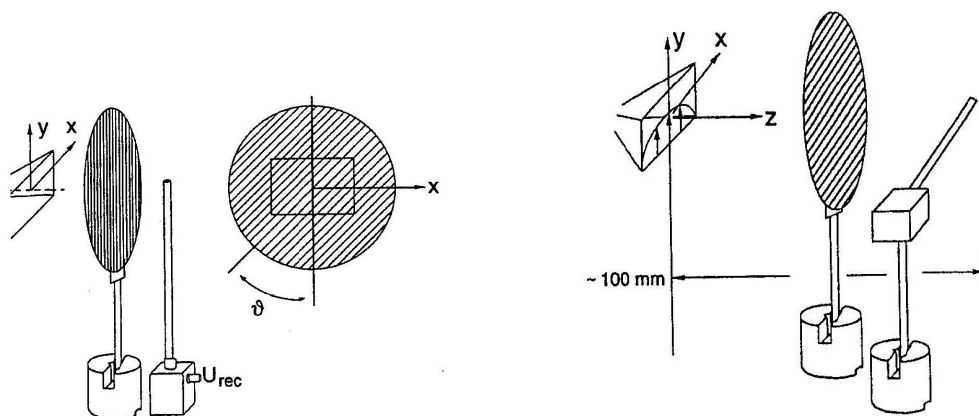
$$I_{(\theta)} = I_0 \sin^4 \theta. \quad (3)$$

Pro sondu kolmo na osu zářiče (viz Obr. 6 vpravo) je odvození podobné, podle obrázku 5 vpravo. Výsledkem je vztah

$$I_{(\theta)} = I_0 (\sin \theta \cos \theta)^2. \quad (4)$$

Ovšem kvůli standardizaci použijeme raději vztah

$$I_{(\theta)} = I_0 4 (\sin \theta \cos \theta)^2. \quad (5)$$



Obr. 6: Ověření Malusova zákona se sondou vertikálně (vlevo) a horizontálně (vpravo).

Sestavte experiment podle Obr. 6 vlevo. Měřte přijaté napětí jako funkci pootočení mřížky pro úhly od 0° do 180° v krocích po 10° . Sestrojte graf závislosti U na θ z vámi naměřených hodnot i z Malusova zákona. Za I_0 berte hodnotu, jenž byla naměřena pro $\theta = 90^\circ$.

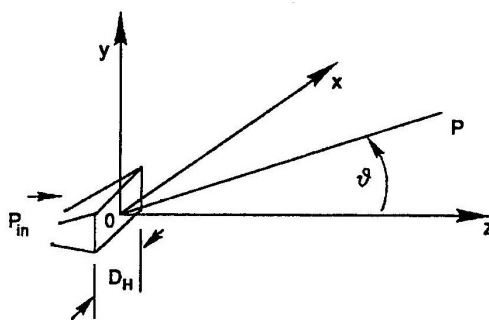
Pokus zopakujte i pro sondu kolmo na zářič podle Obr. 6 vpravo a zpracujte příslušný graf. Je nutné zajistit, aby dipól sondy byl ve stejné výšce jako generátor vlnění.

4.2 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 r_0 je dána rovnicí

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

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



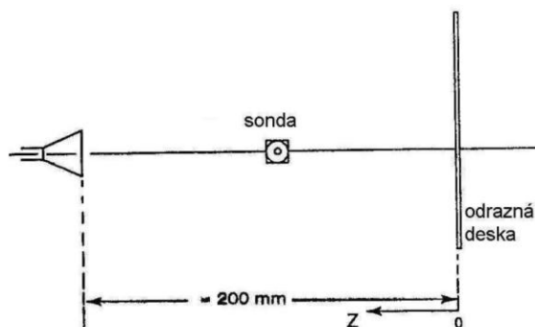
Obr. 7: Soustava souřadnic před zářičem.

V našem případě bereme $r_0 = 100$ mm. Zároveň je třeba si uvědomit, že toto měření je velmi závislé na rušení z okolních odrazů. Před zdroj položte kartonovou souřadnou síť. Nyní proměřte závislost napětí na souřadnicích. Získaná data zpracujte v programu GnuPlot, Mathematica nebo Matlab. Program vám zobrazí rovinný graf rozložení pole. Následně zpracujte příčné a podélné rozložení pole. Nechť jsou dány souřadnice podle Obr. 7. 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 příčná rozložení pro 2 hodnoty z (třeba 100 mm a 200 mm). Z podélného rozložení lze vidět obtíže mikrovlnného přenosu, když si představíte televizní vysílání z družice, které je ve vzdálenosti 36000 km od povrchu, nebo šíření mobilního signálu.

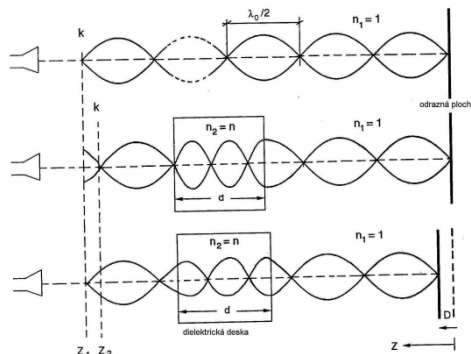
4.3 Stojatá vlna

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, její amplituda se s časem nemění. Jsou tam tedy místa, kde je amplituda nulová (uzly) a kde je maximální (kmitny). 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.

Mezi desku a zdroj umístěte pravítko (osu z) tak, že počátek je u desky a kladný směr je k zářiči (viz Obr. 8). Nejprve proměřte rozložení stojaté vlny, tedy závislost napětí sondy na vzdálenosti od desky pro z od 50 mm do 150 mm tak, aby jste měli alespoň 30 měření.



Obr. 8: Měření stojaté vlny.



Obr. 9: Určení indexu lomu.

Vášim úkolem je najít maxima a minima. Ze znalosti rozložení pole určete vzdálenost dvou sousedních minim (protože minima jsou lépe zjištělná - případně změřte další hodnoty v okolí předpokládaných minim) a stanovte vlnovou délku.

V další části pokusu stanovte 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. Ze vzorce pro rychlost získáte optickou dráhu $l = 2nz$, kde z je dráha uražená v prostředí o indexu n . Faktor 2 je ve vzorci kvůli odrazu. Experimentální zapojení aparatury při tomto měření je shodné s předchozím měřením, pouze mezi sondu a kovovou desku umístíte dielektrickou desku tloušťky $d = 20$ mm.

Jelikož první minimum stojaté vlny je v odrazné desce ($z = 0$), poloha k -tého minima je ve vzdálenosti z_1 od desky (viz. Obr. 9 - první případ). Optická dráha je v tomto případě

$$l_1 = 2n_1z_1. \quad (7)$$

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. 9 - druhý případ). Tedy pro optickou dráhu nyní platí

$$l_2 = 2n_1(z_1 - d) + 2n_2d. \quad (8)$$

a

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

Výsledkem je tedy vztah pro $n_1 = 1$

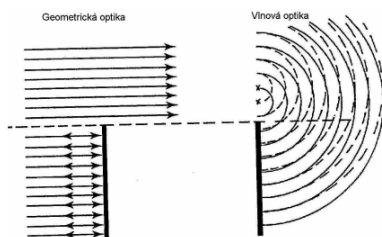
$$n_2 = \frac{z_2 - z_1}{d} + 1 \quad (10)$$

Tedy k určení indexu lomu dielektrické desky (PVC) stačí znát její tloušťku a posunutí minima po vložení desky do stojaté vlny. Na Obr. 9 - 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.

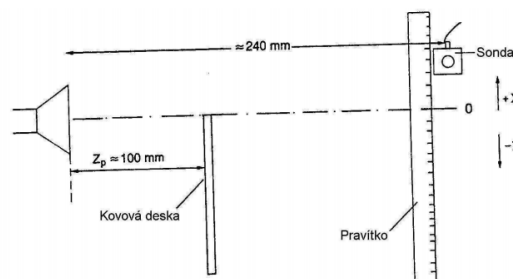
4.4 Difrakce

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

doměnku 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.



Obr. 10: Vysvětlení odrazu na hraně.



Obr. 11: Nastavení experimentu pro ohyb 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. 10. Díky vlastnostem mikrovln můžeme tento jev pozorovat ve velkém měřítku.

Umístěte tedy kovovou desku před zářič podle Obr. 11 a měřte závislost napětí na x v rozsahu od $+50$ mm do -80 mm s krokem 10 mm a zpracujte výsledky do grafu.

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

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

a pro minima:

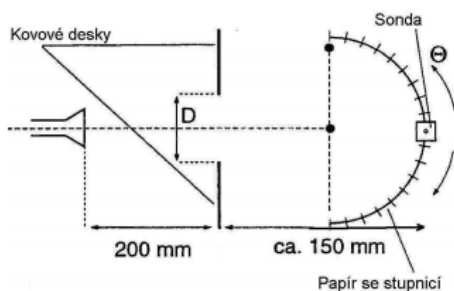
$$(\sin \Theta)_{\min} = m \frac{\lambda}{D}, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (12)$$

Difrakční obrazec je určen poměrem $\frac{\lambda}{D}$, kde D je šířka štěrbině. 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.

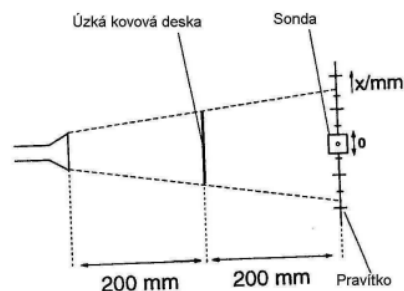
Sestrojte tedy aparaturu podle Obr. 12. Pod sondu umístěte papír s vytištěným úhloměrem, který je součástí úlohy. Štěrbinu vytvořte ze dvou kovových desek. Měřte pro $D = 40$ mm a $D = 60$ mm. V obou případech změřte závislost napětí na úhlu Θ a obě závislosti zpracujte do grafu. Pokuste se z polohy vedlejších maxim stanovit vlnovou délku pomocí výše uvedeného vztahu a porovnejte ji s ostatními hodnotami.

Do tohoto okamžiku se předpokládalo, že překážka se štěrbinou je nekonečná a vlnění za překážkou je tvořeno pouze prošlými vlnami. Nyní bude ověřen ohyb vln na překážce konečných rozměrů.

Sestavte experiment podle Obr. 13. Za překážku zvolte úzkou kovovou desku a proměřte závislost napětí na x -ové souřadnici v rozsahu ± 150 mm po deseti milimetrech a výsledek zpracujte do grafu.



Obr. 12: Nastavení aparatury pro ohyb na štěrbině.

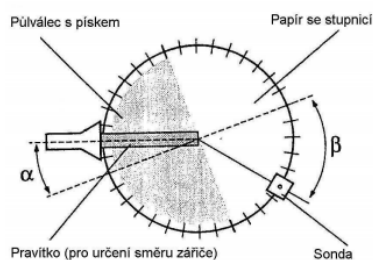


Obr. 13: Nastavení aparatury pro ohyb na překážce.

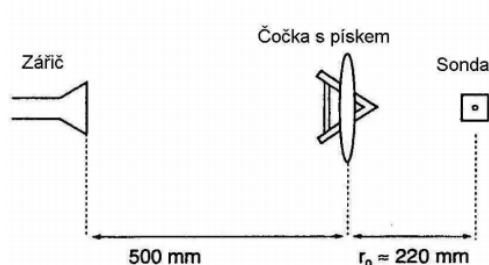
Další úlohou na ohyb paprsků je zákon lomu. Z optiky víme, že paprsek dopadající pod určitým úhlem na rozhraní dvou materiálů s různými indexy lomu se dělí na lomený a odražený paprsek. Paprsek lomený v opticky hustším prostředí je odražen podle normály v bodě dopadu (viz Obr. 14). Úhel dopadu a úhel lomu jsou spolu spojeny následujícím vztahem:

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

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 dřevěnou podložku. Takto připravený půlválec vložíme do výchozího nastavení mezi zářič a sondu.



Obr. 14: Ověření zákona lomu.



Obr. 15: Fokuse vlnění čočkou.

Nastavte vysílač k oblé 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 α 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 β . Výsledné hodnoty dosaďte do zákona lomu a stanovte index lomu n_2 cukru ($n_1 = 1$). Kolem 40° nastává totální odraz a žádný paprsek cukrem neprojde.

Posledním pokusem na ohyb paprsku je zaostřování (fokusace) záření do bodu pomocí čoček.

Sestavte experiment podle Obr. 15 vpravo. Čočkou je pro nás konvexní pouzdro naplněné cukrem. Nejprve změříme napětí na sondě bez čočky. Následně vložte čočku a pohybujte s ní tak, abyste dostali maximální napětí. Vzdálenost čočky od sondy je pak ohniskovou vzdáleností. Z optiky víme, že pro tenkou spojnou čočku platí rovnice

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

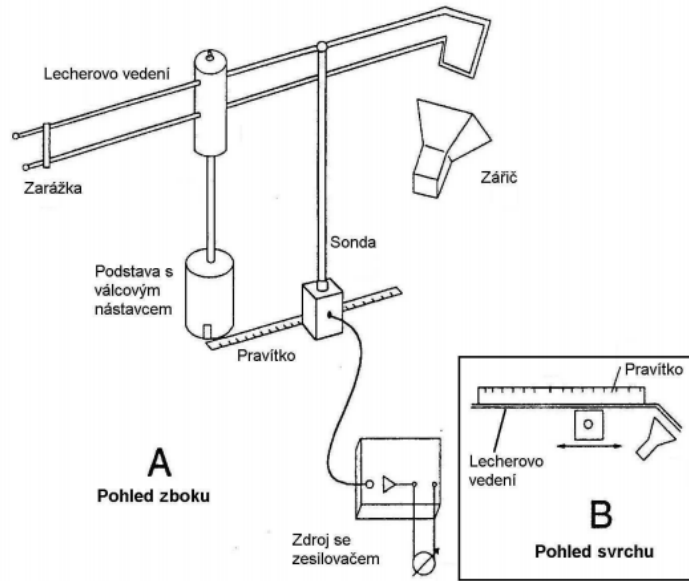
kde f je ohnisková vzdálenost, n_2 je index lomu vnitřního materiálu, $n_1 = 1$ je index lomu vnějšího prostředí (vzduch) a r je poloměr křivosti čočky. Z rovnice vypočítejte index lomu cukru a porovnejte ho s dříve změřenou hodnotou. Pro určení r použijte vztah

$$r = \frac{l^2}{8d} + \frac{d}{2}, \quad (15)$$

kde l je průměr čočky a d je polovina její tloušťky.

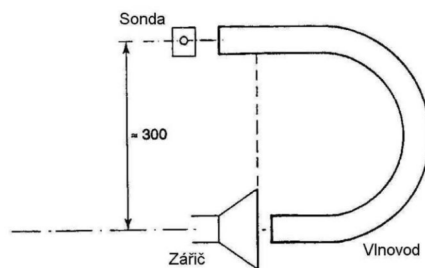
4.5 Vedení

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 mm v průměru, 400 mm dlouhé, vedené rovnoběžně k sobě ve vzdálenosti 10 mm. Na jednom konci jsou svařené do smyčky v úhlu 45° . Tato smyčka dovoluje excitovat vlny ve vedení díky magnetickému poli Gunnova oscilátoru. Vlnění vycházející z Lecherova vedení bude stojaté. Sestavte experiment dle Obr. 16.



Obr. 16: Experiment s Lecherovým vedením.

Je nutné, aby sonda byla vždy stejně orientovaná k vedení a vždy ve stejné vzdálenosti (asi 3 mm) anebo se přímo dotýká vedení. Pravítko umístěte pod vedení asi 6 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).



Obr. 17: Zapojení vlnovodu.

Použijte znalostí z předchozích úloh. Porovnejte tuto vlnovou délku s vlnovou délkou záření v prostoru. Naměřte hodnoty stejně jako v případě měření stojatého vlnění.

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.

Sestavte aparaturu dle Obr. 17 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 zprohýbán.

5 Rozumím tomu?

1. Jak vypadá elektromagnetická vlna? Jaké má složky a rychlost šíření? Co je její frekvence a co vlnová délka?
2. Co je to obecně polarizace EM vlnění? A co lineární polarizace? Jak závisí intenzita měřeného záření na geometrii zdroje polarizovaného záření, polarizačního filtru a přijímače?
3. Co je to interference dvou vln? Co je to stojaté vlnění? Co jsou to kmitny/uzly a jak jsou od sebe vzdáleny?
4. Které pokusy optiky budete s mikrovlnami provádět? Proč je to možné? Jaké očekáváte rozdíly?
5. Jak si představujete šíření vlnění v Lecherově vedení? Jak ve vlnovodu? Napadají vás nějaké analogie?

6 Literatura:

- [1] ŠTOLL I., Elektřina a magnetismus, Vydavatelství ČVUT Praha, 1998
- [2] ŠTOLL I., Tolar J., Teoretická fyzika, Vydavatelství ČVUT Praha, 1984
- [3] TOLAR J., Vlnění, optika a atomová fyzika, skriptum ČVUT v Praze,
Dostupné z: <https://physics.fjfi.cvut.cz/files/predmety/02V0AF/V0AF2014.pdf>, cit. [2017-02-02]