

Bezdrôtové slúchadlá s optickým prenosom

Wireless Headphones Using Optical Signal Transmission

Filip Hrubý

Bakalárska práca
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip HRUBÝ**
Osobní číslo: **A12864**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Bezdrátová sluchátka s optickým přenosem**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte si problematiku bezdrátové optické komunikace a vypracujte literární rešerši.
2. Popište návrh a realizaci modelu bezdrátových sluchátek.
3. Uvedený návrh hardwarově realizujte.
4. Zhodnoťte přínos práce.
5. Uvedte výhled a využití do budoucna.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. SCHOMMERS, Adrian. Elektronika tajemství zbavená: objevovat, experimentovat, porozumět. 4. vyd. Pokusy s optoelektronikou. Ostrava-Plesná: HEL, 2002, 191 s. ISBN 80-861-6704-6.
2. SALEH, Bahaa E. Základy fotoniky: fundamentals of photonics. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, xxii, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
3. VLČEK, Jiří. Modulační a přenos signálu: fundamentals of photonics. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Jiří Vlček, 2001, 70 s. ISBN Modulační a přenos signálu.
4. GHASSEMLOOY, Z, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3.
5. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE návrhový systém pro plošné spoje pro začátečníky: uživatelská a referenční příručka :. 2. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 80-730-0213-2.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Pospíšilík

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání bakalářské práce:

7. března 2014


Termín odevzdání bakalářské práce:

11. června 2014

Ve Zlíně dne 7. března 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

V tejto bakalárskej práci som sa zamerlal na problematiku bezdrôtových optických spojov. Popisuje, aké možnosti a výhody v sebe nesie optická komunikácia a popisuje základné princípy optiky a optoelektroniky. Ďalej sa práca zameriava na návrh a konštrukciu bezdrôtového optického prenosu, fungujúceho ako bezdrôtové slúchadlá. Na záver práce je zmienka o využití v budúcnosti.

Kľúčové slova: Optický bezdrôtový spoj, šírenie svetla, LED dióda, fotodetektory.

ABSTRACT

I devoted the issue of wireless optical connections in this bachelor thesis. The thesis describes the options and benefits of optical communication and describes the basic principles of optics and optoelectronics, too. Furthermore, the work focuses on the design and construction of wireless optical transmission, functioning as a wireless headphone. In conclusion, the work is mention of use in the future.

Keywords: Optical wireless link, spread light, LED, photodetectors.

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Martinovi Pospíšilíkovi, Ph.D. za odborné vedenie, podnetné rady, informácie a trpezlivosť, ktoré mi poskytoval počas spracovávania mojej bakalárskej práce. Ďalej chcem poďakovať pánovi Ing. Milanovi Mikičovi za úsilie a spoluprácu na projekte a jedno špeciálne poďakovanie patri mojej rodine a priateľom, ktorí mi boli počas štúdia vždy veľkou oporou.

Motto:

“Váš čas je obmedzený, tak ho nemárnite žitím života niekoho iného. Nenechajte sa vlákať do dogmy – teda žiť na základe výsledkov myslenia iných ľudí. Nenechajte v hluku názorov iných, utopiť svoj vlastný vnútorný hlas. A to najdôležitejšie, majte odvahu nasledovať svoje srdce a intuíciu. Všetko ostatné je druhoradé.”

Steve Jobs (1955 - 2011)

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČASŤ	10
1 BEZDRÔTOVÝ OPTICKÝ PRENOS	11
1.1 HISTÓRIA	11
1.2 PREČO OPTICKÁ KOMUNIKÁCIA ?	12
2 SVETLO	13
2.1 VLNOVÁ OPTIKA.....	13
2.1.1 Interferencia	13
2.1.2 Difrakcia.....	14
2.1.3 Polarizácia	15
2.2 FOTÓNOVÁ TEÓRIA.....	15
3 ŠÍRENIE SVETLA V ATMOSFÉRE	17
3.1 ABSORPCIA.....	17
3.2 ROZPTYL	18
3.3 TURBULENCIA V ATMOSFÉRE	18
3.4 ATMOSFÉRICKÝ OPTICKÝ SPOJ	18
3.5 VÝHODY A NEVÝHODY ATMOSFÉRICKÉHO OPTICKÉHO SPOJA.....	19
4 OPTICKÉ ZDROJE	21
4.1 LUMINISCENČNÉ DIÓDY.....	22
4.1.1 Princíp činnosti LED.....	22
4.1.2 Vlastnosti LED	23
4.1.3 Typy LED.....	24
4.2 LASEROVÉ DIÓDY	25
4.2.1 Princíp činnosti.....	25
4.2.2 Typy LD	27
5 FOTODETEKTORY	30
5.1 FOTODIÓDY PIN.....	30
5.2 LAVÍNOVÁ FOTODIÓDA APD.....	31
5.3 ŠUMOVÉ PARAMETRE	31
II PRAKTICKÁ ČASŤ	32
6 NÁVRH BEZDRÔTOVÝCH SLÚCHADIEL	33
6.1 POŽIADAVKY.....	33
6.2 POSTUP.....	33
6.3 REALIZÁCIA	33
6.3.1 Informácie – Prieskum – Možnosti	34
6.3.2 Návrh – Konštrukcia – Doladenie.....	34
6.3.3 Princíp	38
6.4 MERANIE A VÝSLEDKY:.....	38
6.4.1 Frekvenčná prenosová charakteristika	38
6.4.2 Odstup signál/šum	39
6.4.3 Skreslenie	40

7	VYUŽITIE V BUDÚCNOSTI.....	42
	ZÁVER	43
	ZÁVER V ANGLIČTINE.....	45
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	46
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV SKRATIEK.....	49
	ZOZNAM OBRÁZKOV	50
	ZOZNAM TABULIEK	51
	ZOZNAM PRÍLOH.....	52

ÚVOD

Už v minulosti bolo pre ľudstvo prenášanie informácií na veľké diaľky rôznymi spôsobmi a v rôznych objemoch vždy veľmi dôležité. Pre túto potrebu a záujem vznikali najrôznejšie spôsoby prenosov, vyvíjali sa nové technológie a vznikali nové možnosti. Do jedného veľkého odvetvia prenosu informácií patrí bezdrôtová komunikácia, ktorá vyradila nutnosť používania metalických alebo optických káblov.

Bezdrôtová komunikácia je v dnešnej dobe natoľko používaná, že niektoré z možností využitia ako je napr. rádiový prenos už sú takpovediac presýtené. To otvára priestor pre optickú bezdrôtovú komunikáciu, ktorá má radu výhod a postupom času bude viac a viac využívaná. Táto technológia je postavená na využití svetla ako nosiča informácie podobne ako je to u optických káblových technológiách s rozdielom prenosového média. Optické káble majú dnes obrovské uplatnenie hlavne pre svoju rýchlosť, ale s narastajúcim počtom zastavaných plôch a problémy s nedostupnosťou medzi niektorými časťami by práve optická bezdrôtová technológia mohla plne nahradiť toto miesto. V rade ďalších výhod, od takmer nulového okolitého rušenia, rýchlosti a bez nutnosti licencií v porovnaní s rádiovým prenosom, bohužiaľ má ako každá technológia aj táto svoje nevýhody v podobe závislosti od počasia alebo na viditeľnosti medzi komunikačnými hlavicami. Aj napriek tomu jej obľuba rastie a vývoj ide dopredu.

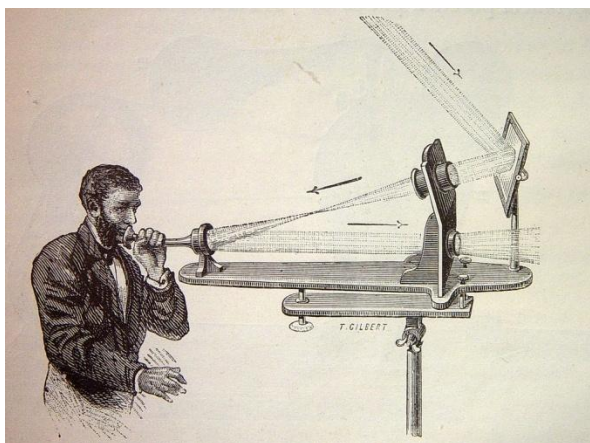
V tejto práci sa budem venovať optickému bezdrôtovému prenosu. Bližšie priblížim históriu optickej komunikácie a väčšiu časť budem venovať popisu jednotlivých sfér týkajúcich sa optiky až po popis bezdrôtových optických spojov. Po zoznámení sa s touto problematikou som pre túto prácu skonštruoval demonštratívne optické bezdrôtové slúchadla určené pre prenos nízkofrekvenčného (audio) monofónneho signálu.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 BEZDRÔTOVÝ OPTICKÝ PRENOS

1.1 História

Komunikácia pomocou svetla nie je žiadna nová veda. Staré rímske záznamy ukazujú, že už vtedy používali pre signalizáciu na dlhé vzdialenosti leštené kovové dosky ako zrkadlá ktoré odrážali slnečné svetlo. Americká armáda v začiatkoch 19. Storočia používala podobné zariadenie, ktoré využívalo slnečné žiarenie na prenos telegrafných informácií z vrcholu hory k hore. Po stáročia tiež v námorníctve komunikovali medzi loďami pomocou blikajúceho svetla. V roku 1880 Graham Bell a jeho asistent Charles Sumner Tainter prišli s vlastným vynálezom "Photophone", ktorý používal slnečné svetlo odrážajúce sa od rozvibrovaného zrkadla a dopadal na selénový fotočlánok. Počas oboch svetových vojen sa vykonávali rôzne komunikačné experimenty, ale rádio a radar mal väčší úspech a vzal na seba všetku pozornosť. Tá trvala až do vynálezu laseru, niektorých nových polovodičových súčiastok a optického vlákna. V roku 1960 sa optickej komunikácii konečne dostalo skutočnej pozornosti. [1]



Obr. 1. Ilustrácia Photofonu ukazuje cestu odrazeného slnečného žiarenia pred a po modulácii.

Počas posledných tridsiatich rokov zaznamenala elektro-optika veľký pokrok. Svetelno-komunikačné zariadenia sa dnes integrujú do mnohých bežných spotrebičov, telefónov alebo počítačových systémov. Rozvoj odštartoval vynález lasera roku 1960 Theodorom Haroldom Maimanom a spočiatku sa zameriaval na komunikáciu medzi satelitmi. V rokoch 1961-1962 sa objavujú prvé laserové diódy (Prochorov, Basové) a fotodiódy. Vojenské obranné výskumné programy sa podieľajú na zásadnom prelome v

dialkovej optickej komunikácii. Dnes sa napríklad s úspechom využíva optická komunikácia medzi orbitálnymi družicami alebo aj medzi satelitmi s veľmi vzdialeným rozsahom. Prvé publikácie o atmosférickom optickom spoji sa objavujú začiatkom 90. rokov 20. storočia. S výrazným poklesom cien hlavných komponentov týchto systémov dochádza k ich rozsiahlemu komerčnému využitiu. [1][2]

1.2 Prečo optická komunikácia?

Armáda, podniky, zábavné stanice, telefóne komunikácie a ďalšie inštitúcie zaberajú obrovskú časť z elektromagnetického spektra. Rovnako ako máme čím ďalej tým viac zaplnené cesty v mestách alebo diaľnice, značne sú preplnené aj televízne a rozhlasové stanice. Firmy, ktoré hľadajú spôsoby ako lepšiť svoje komunikačné systémy, alebo ľudia nadšení pre komunikačné systémy, ktorí chcú experimentovať, sú frustrovaní všetkými obmedzeniami a predpismi, ktorými sa riadi prenos informácií prostredníctvom rádia. Jednoducho je málo miesta v rádiovom frekvenčnom spektre. Z tohto dôvodu mnoho firiem a jednotlivcov hľadajú pri svetle spôsob, ako zabezpečiť potrebný priestor pre komunikačnú expanziu. Pri použití modulovaného svetla, ako nosiča informácie namiesto rádia, máme k dispozícii takmer neobmedzené a doteraz neregulované spektrum.

Príklad toho, koľko informácií by mohol prenášať optický systém.

Predstavme si jeden zdroj laserového svetla. Povedzme, že je to polovodičový laser, ktorý vysiela úzku vlnovú dĺžku svetla. Už boli vyvinuté zariadenia, ktoré môžu byť modulované rýchlosťou prevyšujúcou 60 gigahertz (60 000 MHz). Pri modulácii len na skromných 10GHz, by mohol jeden laserový zdroj prenášať v jednej sekunde:

- 650 000 strán textu,
- 1000 románov,
- 200 minút vysoko kvalitnej hudby,
- alebo 10 000 televíznych obrazov.

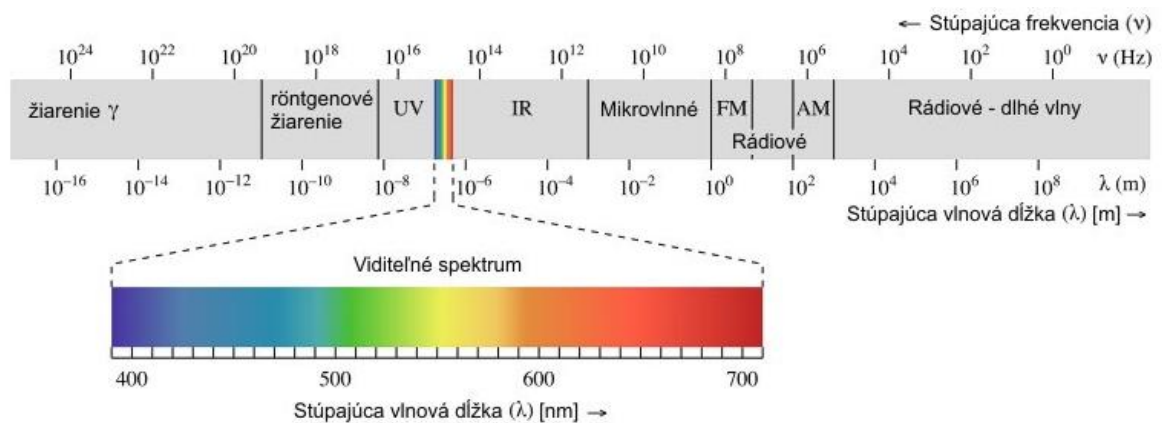
Za menej ako 12 hodín by mohol jediný zdroj svetla preniesť celý obsah veľkej knižnice. Takúto modulačnú rýchlosť je schopný poskytovať prakticky pre všetky odvetvia od rádia, TV až po metropolitné inštitúcie. [1]

2 SVETLO

Spektrum elektromagnetického žiarenia zahŕňa veľmi širokú oblasť vlnových dĺžok od γ -žiarení až po rozhlasové vlny. Je rozdeľované podľa rôznych praktických hľadísk. V oblasti vlnových dĺžok meraných vo vákuu od 100 nm až k 1nm označujeme elektromagnetické žiarenie ako optické žiarenie. [3]

Krátkovlnnú časť tejto oblasti od 100 nm do 380 nm nazývame ultrafialovým žiarením (UV), dlhovlnnú časť od 780 nm do 1 mm nazývame infračerveným žiarením (IR), niekedy tiež ultračerveným. Oko je citlivé len v úzkom intervale od 380 nm do 780 nm. Elektromagnetické žiarenie v tejto oblasti označujeme (viditeľným) svetlom.

Svetelný vnem sprostredkovaný okom závisí na zložení zmesi svetla, tzn. závisí na vlnových dĺžkach jednotlivých zložiek svetla. Monochromatické žiarenie vedie k vnemu sýtej farby (spektrálna farba). Spektrum je postupnosť spektrálnych farieb zoradených podľa rastúcej vlnovej dĺžky. [3]



Obr. 2. Elektromagnetické spektrum

2.1 Vlnová optika

Vlnové vlastnosti svetla sa prejavujú predovšetkým interferenciou, difrakciou a polarizáciou. Neplatí to pre javy súvisiace s vyžarovaním – emisiou svetla alebo s jeho pohltením – absorpciou. [4]

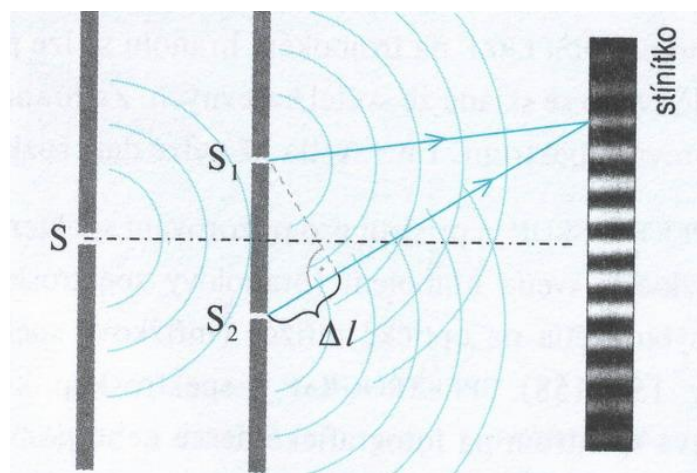
2.1.1 Interferencia

Dúha ukazuje, že slnečné svetlo je zložené z všetkých farieb viditeľného spektra. Farby sa objavujú v dúhe preto, lebo svetlo rôznych vlnových dĺžok prechádza dažďovými

kvapkami. Avšak mydlová bublina alebo olejová škvŕna môžu tiež rovnako vytvárať jasné farby, ktoré tento krát nevznikajú lomom svetla, ale konštruktívnou a deštruktívnou interferenciou svetla. Vzájomným skladaním vln sa zosilňujú alebo potlačujú určité farby v spektre dopadajúceho svetla. Interferencia vln je teda prejavom super pozície vlnenia. Interferencia je asi najpresvedčivejší dôkaz, že svetlo je vlnenie. [5]

Skladanie dvoch vlnení môžeme vysvetliť *interferenciou na dvojštrbine*, ktorú osvetlíme zdrojom monofrekvenčného svetla s vlnovou dĺžkou λ zo štrbiny S . Štrbina S_1 a S_2 (šírka každej z nich je d) sú potom zdrojom dvoch koherentných vln, ktoré sa skladajú na tienidle za dvojštrbinou, kde pozorujeme interferenčné obrazce. Za podmienky $d \ll \lambda$ dochádza na tienidle k medzným situáciám:

- Vlnenia sa stretnú s rovnakou fázou. V mieste vznikne **interferenčné maximum**, na tienidle pozorujeme maximá ako **svetlé miesta**. Dráhový rozdiel vlnenia je $\Delta l = k \cdot \lambda$, kde $k=0,1,2, \dots$
- Vlnenie sa stretáva s opačnou fázou. V mieste vznikne **interferenčné minimum**, na tienidle pozorujeme minimá ako **tmavé miesta**. Dráhový rozdiel vlnenie je $\Delta l = (2k + 1) \cdot \lambda / 2$, kde $k=0,1,2, \dots$ [6]

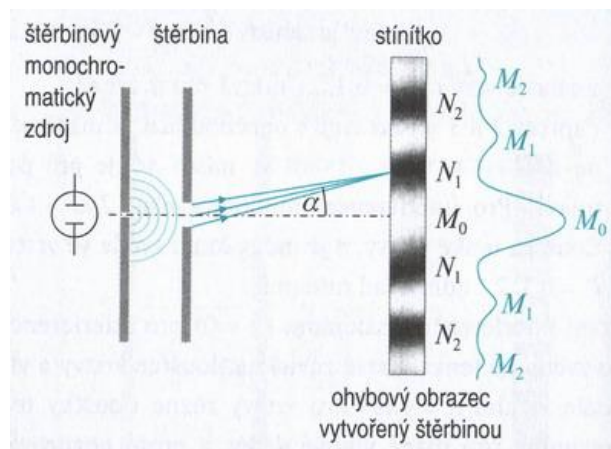


Obr. 3. Interferencia na dvojštrbine

2.1.2 Difrakcia

Difrakcia čiže ohyb vlnenia je jav, pri ktorom sa vlnenie dostáva aj do oblasti geometrického tieňa (za prekážkou sa lúče svetla ohýbajú). Ohyb možno napríklad pozorovať, keď prechádza svetlo štrbinou, ktorej šírka je porovnateľná s vlnovou dĺžkou

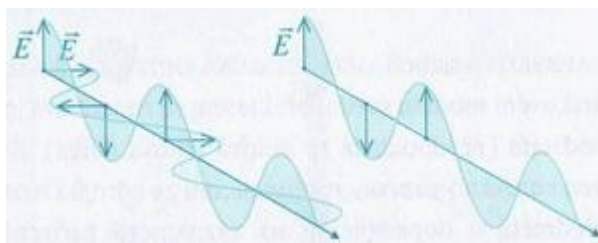
svetla. Za štrbinou sa na tienidle objavia difrakčné čiže ohybové obrazce, tzn. svetlé a tmavé pružky rôznej šírky. [6]



Obr. 4. Ohyb svetla v štrbine

2.1.3 Polarizácia

Svetlo je postupné priečne elektromagnetické žiarenie. Vektor intenzity elektrického poľa \vec{E} je vždy kolmý na smer šírenia svetla, ale v prípade nepolarizovaného svetla mení úplne náhodne svoj smer. V prípade lineárne polarizovaného svetla kmitá vektor \vec{E} neustále v jednej rovine, tzv. rovine kmitov. [7]



Obr. 5. Nepolarizované a lineárne polarizované svetlo

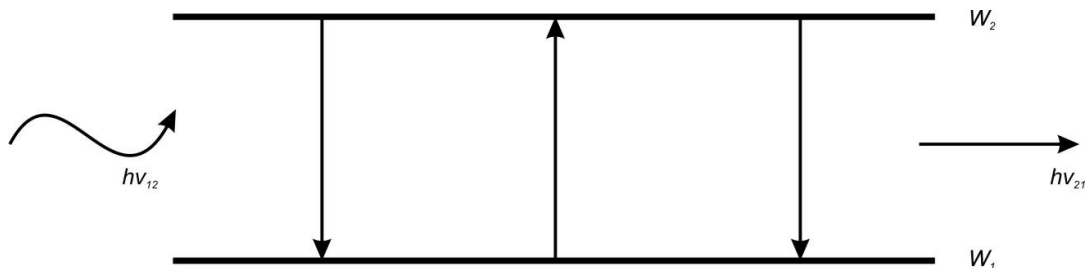
2.2 Fotónová teória

Veľké problémy v tejto oblasti, najmä pri štúdiu fotoelektrického javu, spôsobili, že Einstein použil Plackov matematický model kvantovania svetelnej energie. Kvantá energie v r. 1926 nazval G.N. Lewis (amer. fyz. chemik, 1875-1946) fotónmi. Fotónová optika zachováva vlnový charakter svetla, ale s tým, že energia je kvantovaná, pričom dve najbližšie hodnoty energie sa líšia o energiu fotónu. Okrem energie má každý fotón aj impulz.

Fotónová teória úzko súvisí s výsledkami kvantovej mechaniky, najmä s existenciou stacionárnych stavov atómu, v ktorých atóm nikdy nevyžaruje. Hladiny energie, ktoré takýmto stavom prislúchajú, sú oddelené (obr. 6.). Vyžiarenie alebo absorpcia fotónu nastane len vtedy, keď atóm prechádza z jednej hladiny energie na druhú. Ak ide o prechod z hladiny s energiou W_2 na hladinu s energiou W_1 , atóm vyžiari fotón s energiou $h\nu_{21}$, pričom:

$$h\nu_{21} = W_2 - W_1 \quad (1)$$

Tento prechod – emisia môže byť samovoľná (spontánna), alebo vynútená (stimulovaná). Pri stimulovanej emisii má fotón, ktorý sa emituje rovnaké vlastnosti (smer šírenia, frekvenciu, fázu i polarizáciu) ako fotón, ktorý jeho vznik stimuluje. Pri prechode opačným smerom, atóm energiu absorbuje. [4]



Obr. 6. Hladiny energie

Fotónová teória, ktorá umožnila exaktný opis vyžarovania svetla, pripomína korpuskulárnu teóriu svetla. Okrem predchádzajúcich vzťahov, ktoré dokazujú principiálny rozdiel oboch týchto teórií, je významným rozdielom to, že fotón existuje len v pohybe. Ak teda fotón odovzdá svoju energiu atómu a ten prejde na vyššiu hladinu energie – do vzbuđeného stavu, fotón zanikne. [4]

Veľkou prednosťou fotónovej teórie je to, že základné optické javy, pri ktorých sa prejavuje korpuskulárny charakter svetla, umožňuje vysvetliť jednoducho a názorne. Najčastejšie na to využíva zákony zachovania – zákon zachovania energie, zákon zachovania hybnosti a zákon zachovania počtu častíc. [4]

3 ŠÍRENIE SVETLA V ATMOSFÉRE

Atmosférické prenosové prostredie je prostredie nehomogénne a nestacionárne a významne ovplyvňuje kvalitu prenosu. Spôsob ovplyvňovania má náhodný charakter. Atmosférické javy spôsobujú útlm, fluktuáciu a dokonca až prerušovania výkonu optického zväzku. Pri vysokom jase pozadia sa znižuje rozsah dynamiky prijímača alebo spôsobuje jeho saturáciu. V atmosfére sa tiež uplatňuje refrakcia, ktorú zapríčiňuje rôzne veľkosť indexu lomu atmosféry. V prípade, kedy sa vlnenie dostane na rozhranie dvoch indexov lomu, zmení sa jeho fázová rýchlosť a dochádza tak k zmene smeru šírenia zväzku. Prostredie pre prenos svetelného lúča sa nachádza v troposfére, kde dochádza ku kondenzácii vodných pár, k sneženiu, dažďu, vytvárajú sa hmly, búrky a prejavuje sa vietor i s jeho turbulenciami. Teplota a tlak atmosféry sa mení v priestore aj čase čo má za následok nestálosť jej indexu lomu. Ako náhle prenášaný lúč prechádza takýmto prostredím, mení svoj tvar i energiu. Rozšírenie alebo odklon môžu spôsobiť zmeny úrovne prijímaného optického výkonu. [7][8]

Pri šírení zväzku dochádza k týmto hlavným javom: [1]

- Extinkcie optickej intenzity vplyvom absorpcie alebo rozptylu na molekulách alebo aerosóloch.
- Extinkcie a fluktuácia optickej intenzity vplyvom turbulencie troposféry.
- Fluktuácia optickej intenzity vplyvom dažďa alebo snehu alebo vplyvom deformácie tvaru zväzku.
- Krátkodobé prerušovania zväzku.

3.1 Absorpcia

Svetlo vo zväzku klesá vďaka absorpcii a rozptylu. K absorpcii svetla dochádza na elektrónoch viazaných v atómoch alebo v molekulách, alebo na voľných elektrónoch v kovoch. Ak prechádza biele svetlo plynom, ktorý obsahuje atómy jedného prvku a keď je priechodné svetlo pozorovateľné mriežkovým spektrometrom, potom možno v spektre pozorovať čierne čiary. Čiary označujú individuálne úzky rozsah vlnových dĺžok, ktoré sú pri atómovej štruktúre prvku charakteristické. Atómy môžu ihneď znovu emitovať žiarenie, alebo emitovať žiarenie na dlhších vlnových dĺžkach. Toto žiarenie na dlhších

vlnových dĺžkach je známe ako fluorescencia a žiarenie emitované na rovnakej vlnovej dĺžke je nazývané rezonančná fluorescencia. [9]

Veľkosť absorpcie je daná absorpčným koeficientom, ktorý udáva schopnosť materiálu absorbovať fotóny v závislosti na dĺžke vlny dopadajúceho žiarenia. [10]

3.2 Rozptyl

Rozptyl alebo difúzia je prejav interakcie žiarenia (svetlo, pohybujúce sa častice) s optickými nehomogenitami prostredia, ktoré spôsobujú odklon žiarenia z pôvodného smeru. [11]

Všeobecne rozlišujeme dva typy rozptylu - elastický a kvázielastický. Elastický rozptyl je rozptyl, pri ktorom sa energia žiarenia nemení (alebo len veľmi málo) a kvázielastický rozptyl mení energiu žiarenia. Tieto termíny sú odvodené z kinetickej štúdie zrážok tuhých telies. Hlavné formy elastického elektromagnetického rozptylu sú Rayleighov rozptyl a Mieov rozptyl. Hlavné formy kvázielastického elektromagnetického rozptylu sú Ramanov rozptyl, Brillouinov rozptyl, rozptyl röntgenového žiarenia a Comptonov rozptyl. [11]

3.3 Turbulencia v atmosfére

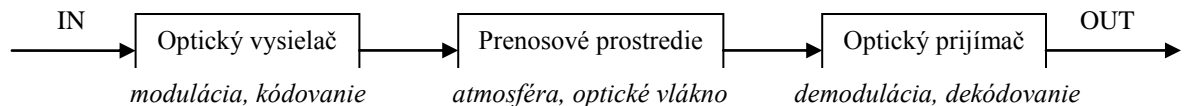
Turbulencia atmosféry je jav spôsobujúci kolísanie prijímaného signálu. Na vzniku turbulencií sa podieľajú dva činitele. Žiarenie Slnka, ktoré vyvoláva náhodné časopriestorové zmeny indexu lomu a ďalej je to pohyb atmosféry, ktorý môže byť buď laminárny alebo turbulentný. Masy vzduchu s odlišnými teplotami majú rôzne indexy lomu. Index lomu je funkciou tlaku a teploty. Vo vzduchu sa vytvárajú oblasti teplotných nehomogenít, ktoré sú miestom konštantného indexu lomu. Tieto lokálne nehomogenity (vzdušné víry) sú charakterizované ako rozmermi tak aj časovou stálosťou. Vzdušné víry majú tvar "gulí" s priemerom $l \in \langle l_0, L_0 \rangle$. Vlastnosti atmosféry dovoľujú len určité rozmery týchto vírov, ktoré sa pohybujú rádovo od niekoľkých mm do km. Rozmerovo väčšie víry sa rozpadajú za kratšiu dobu a majú charakter mechanického pohybu. Malé víry sa rozpadajú za dlhšiu dobu a sú teplotného charakteru. [12]

3.4 Atmosférický optický spoj

Atmosférický optický spoj (AOS) je komunikačná technológia, ktorá pomocou prenosu optických zväzkov zaisťuje prenos signálu atmosférou. AOS spracováva

informácie prostredníctvom optickej nosnej vlny, ktorá sa môže energeticky alebo vlnovými dĺžkami deliť do viacerých kanálov. Tvorí ho tri základné prvky: [8]

- optický vysielateľ,
- optický prijímač,
- prenosové prostredie.



Obr. 7. Schéma optického komunikačného systému

Vo vysielateľi sa prijatý vstupný elektrický signál moduluje, prípadne kóduje a takto upravený sa posiela na prevodník elektrického signálu na optický (žiarovka, LED, laser). Ďalej je optický signál naviazaný do prenosového prostredia, z ktorého je privedený do bloku prijímača. Tam sa vykoná opäť inverzná premena signálu optického na elektrický. Najprv je nutné prenesený signál zosilniť a ďalej sa tento signál demoduluje, prípadne dekóduje. [8]

V optických vysielateľoch sú najčastejšie používané zdroje svetla s vlnovými dĺžkami 850 nm a 1550 nm. Je to dané atmosférickými podmienkami pri prenose, dostupnosťou týchto zdrojov a zaistenie bezpečnosti pre oči. Väčšinou sa prenáša signál s digitálnou intenzitnou moduláciou, nie je to ale pravidlom. Pre aplikácie nevyžadujúce vysoké prenosové rýchlosti a nízku chybovosť stačí využiť len napr. AM, FM alebo PM. AOS nie je obmedzený len na využitie v atmosfére, ale môže byť využívaný aj v uzavretých miestnostiach, veľkých halách alebo kozmickom priestore. [8]

3.5 Výhody a nevýhody Atmosférického optického spoja

Výhody: [7]

- Vysoká odolnosť proti odpočúvaniu a rušeniu. Narušiteľ by musel priamo vstúpiť do zväzku, čo je ľahko zistiteľné.
- Vysoká prenosová rýchlosť.
- Nedochoádza k zahlcovaniu atmosféry elektromagnetickými vlnami na rádiových frekvenciách.

- Vysielače sú konštruované podľa hygienických noriem, ani pri pohľade do vysielača nedôjde k poškodeniu zraku.
- Z hľadiska šírky pásma, veľký potenciál optických vláknových spojov.
- Možnosť použitia režimu jednofotónového prenosu s technikou distribúcie kvantových stavov fotónov. Tento prenos umožňuje využitie kryptografie s vysokým zabezpečením utajovaných správ.
- Užívanie zariadení na prenos signálu cez atmosféru nie je obmedzené žiadnymi licenciami.

Nevýhody: [7]

- Závislosť funkčnosti a kvality spoja na podmienkach prenosového prostredia (počasie).
- Potreba zabezpečiť priamu viditeľnosť medzi vysielačom a prijímačom.
- Zamedzenie dopadu silnejšieho sústredeného slnečného žiarenia na fotodetektor. Mohlo by dôjsť až k poškodeniu.

4 OPTICKÉ ZDROJE

Svetelné zdroje transformujú istý diel privádzanej energie na energiu žiarivú. Tepelné zdroje (napr. žiarovky) sú charakteristické tým, že privádzajúcu energiu menia predovšetkým na teplo. Tepelný pohyb (kmitanie atómov) má za následok svetelnú emisiu. V luminiscenčných zdrojoch sa privádzanou energiou budia luminiscenčné centrá na vyššiu energiu, ktorú potom odovzdávajú vo forme luminiscenčného žiarenia (žiarivky, plynové výbojky s luminoforom, luminiscenčné diódy). Tento typ zdrojov umožňuje veľkú emisiu žiarenia pri relatívne nízkej teplote. Tepelné zdroje môžu pracovať buď v kontinuálnom režime (napr. žiarovky), alebo impulznom režime (bleskové plynové výbojky pre fotografické účely apod.). [3]

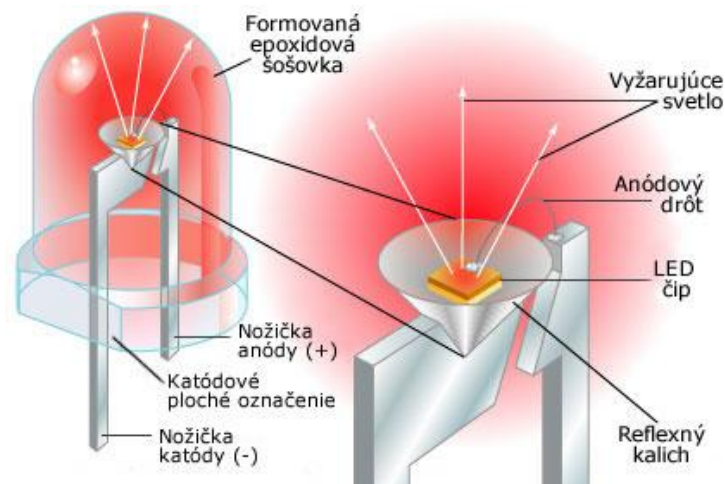
V súčasnej optoelektronike sa často využívajú vlastnosti izomorfných polovodičových monokryštálov, ktoré sú schopné vytvárať spojitý rad tuhých roztokov, niekedy aj v celom rozsahu zloženia. Mnohé zo zmesí polovodičov možno dokonale pripraviť kryštalograficky aj chemicky, teda ich medzipásmové žiarenie umožňuje nielen porovnateľné, ale aj lepšie výsledky ako tie, ktoré sa dosiahli v binárnych polovodičových zlúčeninách, napr. GaAs a InP. [3]

Podstatnou charakteristikou svetelného zdroja je spektrálne rozloženie $\phi_{e\lambda}(\lambda)$ jeho žiarenia. Ak je žiarenie rozložené v spektre spojitá a rovnomerne, rozprávame o zdroji so spojitým spektrom (spojitý zdroj), naproti tomu je čiarový zdroj charakterizovaný spektrálnym rozložením energie v určitých úzko obmedzených oblastiach spektra. Ak emituje zdroj svetlo jednej spektrálnej čiary, rozprávame o monochromatickom zdroji. [3]

Zdroje, ktoré sa používajú v optoelektronike, musia mať dostatočný výkon na to, aby bolo možné signál po prechode vláknom registrovať. Zdroj musí umožniť odpovedajúcu moduláciu, aby sa dosiahla požadovaná prenosová rýchlosť a nesmie vykazovať náhodné fluktuácie. Na minimalizáciu disperzie je potrebná čo najužšia spektrálna čiara. Zdroje musia byť navyše mechanicky odolné, teplotne a časovo stále, ako aj cenovo prístupné. Týmto nárokom vyhovujú luminiscenčné diódy LED a laserové diódy LD (polovodičové lasery). V oboch týchto zdrojoch žiarenia je zdrojom energie elektrický prúd, prechádzajúci p-n priedchodom. V LED dióde sa žiarenie emituje spontánne, zatiaľ čo v LD vzniká stimulovanou emisiou. [4]

4.1 Luminiscenčné diódy

Luminiscenčná dióda alebo svetelná dióda je polovodičová elektronická súčiastka, ktorá vyžaruje úzko spektrálne svetlo, keď ňou prechádza elektrický prúd v priepustnom smere. Svietiaci efekt je následkom žiarivej rekombinácie elektrón-dierového páru a je formou elektroluminiscencie. Farba vyžarovaného svetla závisí od štruktúry PN prechodu aj od použitého materiálu. [13]



Obr. 8. Luminiscenčná dióda

Vytvorenie LED a laserových diód sa stalo možné vďaka výskumu polovodičových heteroštruktúr na ktorom pracoval ruský vedec Žores Ivanovič Alfiorov. Prvú prakticky použiteľnú LED diódu vyvinul v roku 1962 kanadský vedec Nick Holonyak. [13]

Najlacnejšie sa vyrábajú infračervené diódy, po nich najlacnejšie svietivé sú červené. Zelené sú cca o 20 % drahšie ako červené. Modré sú podľa výrobcu aj niekoľkonásobne drahšie ako červené ale ich cena v poslednom čase prudko klesá. Samostatnou konštrukčnou kategóriou sú OLED (Organické LED). [13]

4.1.1 Princíp činnosti LED

Princíp luminiscenčné diódy je založený na rekombinácii, tzn. ak rekombinuje elektrón s dierou, odovzdáva energiu zhruba rovnú šírke zakázaného pásu. Injekcií majoritných nosičov do polovodiča opačnej vodivosti pri priložení napätia na PN prechod v priepustnom smere sa zvýši pravdepodobnosť rekombinácie a často k nej tiež dochádza. Pri rekombinácii každého páru elektrón-diera sa uvoľní určité kvantum energie, ktoré sa môže buď vyžiarit' mimo kryštál, alebo byť absorbované v mriežke. To sa prejaví

zvýšenou teplotou kryštálu. Vhodnými materiálmi sú polovodiče s tzv. priamym prechodom (nevzniká fonón) a väčšou šírkou zakázaného pásu. Používané kombinácie materiálov sú GaAsP GaP, GaAlAs (červená), InGaP, SiC (zelená a modrá). [14]

4.1.2 Vlastnosti LED

Medzi základné parametre LED patrí: [2]

- vlnová dĺžka vyžiareného svetla,
- kapacita prechodu,
- svietivosť,
- uhol vyžarovania,
- maximálny jednosmerný prúd,
- druh materiálu.

Svetelné žiarenie emitujúce z LED je nekoherentné. Žiarenie vystupujúce z diódy má veľkú divergenciu. Na LED sa preto umiestňujú šošovky z epoxidovej živice, ktorá ju znižuje a chráni diódu pred mechanickým poškodením. Ďalej sa vyznačujú menšou účinnosťou premeny elektrickej energie na optickú z dôvodov reabsorpcie žiarenia v súčiastke a vnútorných odrazoch na rozhraniach. [2]

- **Životnosť** je u farebnej LED 100 000 hodín, biela LED zvyčajne dosahuje životnosti 50 000 hodín, pričom v priebehu tejto doby intenzita svetla trochu klesá. [15]
- **Odolnosť** proti otrasom je veľká a rovnaká ako u iných elektronických súčiastok. Záleží teda predovšetkým na spôsobe a kvalite montáže vzhľadom k aplikácii. Perspektívne je použitie vo všetkých typoch mobilných prostriedkov a v dopravnej technike. [15]
- **Prevádzková teplota** je relatívne nízka. LED nevyvíja významné množstvo tepla, aj keď konštruktéri pri intenzívne svietiacich LED už riešili problémy s chladením čipov. [15]
- **Vyžarované teplo** je v podstate nulové. To je výhoda pri osvetľovaní predmetov citlivých na teplo alebo teplom rýchlejšie degradujúcich (potraviny). [15]

- **UV žiarenie** nie je vďaka použitým princípom vyžarované farebnými ani bielymi diódami LED, pretože svetlo je vyžarované v úzkom intervale vlnových dĺžok. Výnimkou sú ultrafialové LED, kde je toto žiarenie naopak žiaduce. [15]
- **Uhlová šírka** vyžarovaného svetelného zväzku je u bežne dostupných LED od 10 do 100 stupňov. Malých uhlov zväzku možno dosiahnuť bez použitia vonkajších reflektorov už samotnou optikou puzdra. [15]

4.1.3 Typy LED

GaAlAs IR LED

Tieto infračervené svetelné zdroje sú medzi LED najpoužívanejšie. Majú rozumnú optickú účinnosť (pri malých prúdoch 4%) a produkujú žiarenie s vlnovou dĺžkou okolo 900 nm, ktoré vyhovuje citlivosti krivke bežného kremíkového PIN fotodetektoru. Väčšina týchto diód môže byť modulovaná pulzmi o vysokých úrovniach prúdu, ak priemerný výkon nepresiahne maximálny dovolený stratový výkon, typicky 250 mW. Veľkosť prúdu týchto krátkych impulzov môže dosiahnuť až veľkosti 10A, ak parameter obdĺžnikového signálu *duty cycle* je menší ako 0,2 %. Niektoré rýchlejšie diódy majú tak malú dobu odozvy, že zvládnu vyžarovať signál s impulzmi menšími ako 100 ns. Väčšina je ale schopná spracovať len impulzy presahujúce 900 ns. Pri veľkosti prúdu pulzov 2A sú schopné kvalitné diódy vyžiariť svetelný tok o výkone 150mW. Pri týchto vyšších prúdoch je všeobecne ich efektívnosť malá (<0.5 %). [1]

GaAs IR LED

Táto dióda je staršia a menej efektívna než predchádzajúci typ. Jej vyžarovací povrch je menší ako u GaAlAs a tak dosahuje úzku divergenciu. Pre túto vlastnosť môže byť užitočná aj pre aplikácie využívajúce optické vlákna. Niektoré diódy majú miniatúrnu šošovku umiestnenú priamo na polovodičovom čipe. V kombinácii s ešte malou šošovkou (typicky 0,5 ") možno doceliť vyžarovací uhol 0,5 °. Najdôležitejšia vlastnosť GaAs diód je ich rýchla odozva. Sú všeobecne 10x rýchlejšie ako GaAlAs LED. Nevýhodou ale je, že produkujú len šestinový svetelný výkon. Používajú sa pre stredné rýchlosti prenosu na krátke vzdialenosti. [1]

GaAsP vysoko svietivá červená LED

Hoci tieto svetelné diódy nie sú tak účinné ako predchádzajúce spomínané IR diódy, sú aj niektoré červené LED použiteľné v aplikáciách bezdrôtovej komunikácie na kratšie

vzdialenosti. Sú označované aj ako vysoko svietivé diódy vyznačujúce sa vysokým svetelným výkonom. Avšak aj tieto najjasnejšie súčiastky produkujú iba tretinový svetelný výkon. Ich veľkou nevýhodou je tiež to, že ich výkon bude mať na klasickom PIN detektore polovičnú účinnosť z dôvodu jeho nižšej citlivosti na červené svetlo (okolo 25 %). Červené LED sú všeobecne rýchlejšie než IR LED, pracujú tak zhruba do 2 MHz, a ich použitie je možné nájsť pre stredne rýchlostné aplikácie. Vzhľadom k tomu, že vyžarujú viditeľné svetlo, poskytujú veľkú výhodu pri zameriavaní, obzvlášť ak sú opatrené šošovkou. [1]

4.2 Laserové diódy

Len niektoré druhy laserov sú vhodné pre použitie v prenosovej technike. V praxi sa používajú prevažne laserové diódy. Optické žiarenie generované laserom je sústredené do veľmi úzkeho intervalu vlnových dĺžok. Zväzok svetla vychádzajúce z tohto zdroja je do značnej miery koherentné, vyznačuje sa vysokou hodnotou žiarivosti a malou rozbiehavosťou. Polovodičové lasery sa vyznačujú radom výhod oproti ostatným laserom. Majú malé rozmery, vysokú účinnosť, integrovateľnosť s elektronickými súčiastkami a ľahké čerpanie aj moduláciou injekčným elektrickým prúdom. Ich nevýhodou oproti iným laserom je, že majú typicky mierne väčšiu spektrálnu šírku čiary. [2]



Obr. 9. Laserová dióda

4.2.1 Princíp činnosti

Základom funkcie všetkých laserov je proces stimulovanej emisie. U polovodičových laserov - laserových diód je však tento proces špecifický v tom, že v polovodičových kryštáloch sú aktívne atómy husto vedľa seba a žiarivé prechody sa neuskutočňujú medzi diskretnými energetickými hladinami, ale medzi energetickými pásmi. Elektróny obsadzujú najnižšie energetické hladiny vo vodivom páse až po Fermiho

kvázi-hladinu pre elektróny E_{FN} . Stavby vo valenčnom páse sú bez elektrónov až po Fermiho kvázi-hladinu pre diery E_{FP} (plynie z princípu zachovania neutrality náboja). Pri dopade fotónov na polovodič s energiou väčšou ako E_g (šírka zakázaného pásu [eV]), ale menšie ako $E_{FN} - E_{FP}$, nemôže dôjsť k ich absorpcii, pretože hladiny, na ktoré by sa mohol uskutočniť prechod spojený s pohltitím fotónu, sú už obsadené. Dopadajúce fotóny teda môžu stimulovať prechody elektrónov z vodivého do valenčného pásu s následnou emisiou nerozlišiteľných fotónov od budiacich. [16]

Aktívne prostredie v " injekčných " polovodičových laseroch vzniká pri injekcii elektrónov a dier z prechodu PN alebo z heteroprechodu. Ku generovaniu optického žiarenia potom dochádza, ako je tomu aj vo všetkých generátoroch, v dôsledku zavedenia kladnej spätnej väzby, ktorá časť zosilneného signálu z výstupu privádza na vstup. K tomuto účelu sa používajú rôzne typy rezonátorov, selektívnych reflektorov alebo rozloženie spätnej väzby. V súčasnosti je najpoužívanejším rezonátorom v polovodičových laseroch Fabry - Perotov rezonátor. Vzhľadom k tomu, že pomerný index lomu rozhrania - polovodičový kryštál - vzduch má pomerne vysokú hodnotu (pre GaAs je $n_r = 3,34$) nemusíme u injekčných polovodičových laserov používať špeciálne zrkadlá, stačí využiť odrazy elektromagnetickej vlny od rozhrania. Podmienkou realizácie takého rezonátora je potom vzájomná rovnobežnosť dvoch protiľahlých stien polovodičového lasera a ich kolmosť k rovine prechodu PN. V kubických kryštáloch sa zrkadlá rezonátora získavajú štiepaním orientovaných polovodičových doštičiek s prechodom PN pozdĺž kryštalografických rovín. [3] [16]

Pri nízkych prúdoch tečúcich cez prechod PN v priamom smere dochádza ku generovaniu spontánneho žiarenia šíriaceho sa vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Rast prúdu zvyšuje rýchlosť žiarivej rekombinácie, čo vedie k rastu hustoty fotónového toku. Generované fotóny stimulujú ďalšie rekombinácie. Vzhľadom k tomu, že najväčší počet generovaných fotónov má energiu rovnú energii maxima spektrálneho rozdelenia spontánnej emisie, nastáva pre túto energiu najviac vynútených prechodov v porovnaní s inými oblasťami spektrálneho rozdelenia. Táto okolnosť potom vedie k postupnému zužovaniu spektra spontánnej emisie a výraznému rastu intenzity vyžarovania v oblasti maxima spektrálneho rozdelenia emisie. Ak rastie intenzita vyžarovania nelineárne s rastom budenia, nazývame tento proces superluminescencie. Fotóny generované v procese superluminescencie sa šíria rovnako ako vo spontánnom režime vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Prechod k laserovému režimu nastáva, keď sa stimulované zosilnenie

rovná stratám a žiarenie sa stáva koherentným. Koherencie dosahujeme použitím optického rezonátora, ktorý zaistí selektívne zosilnenie elektromagnetické vlny s určitou frekvenciou a definovanou fázou, čím vzniká stojaté vlnenie. Stupeň koherencie je daný kvalitou rezonátora. [3] [16]

4.2.2 Typy LD

Podľa vnútornej štruktúry sa polovodičové lasery delia na: [17]

- homoštruktúrne lasery, Homostructure Laser - Hol,
- heteroštruktúrne lasery, Heterostructure Laser - HL,
- lasery s rozloženou spätnou väzbou, Distributed Feed Back Laser - DBFL,
- lasery s kvantovými jamami, Quantum Wells Laser - QWL,

Podľa konštrukcie - miesta vyžarovania sa polovodičové lasery delia na: [17]

- hranovo vyžarujúce lasery, Edge Emitting Laser - EEL,
- plošne vyžarujúce lasery, Vertical Cavity Surface Emitting Laser - VCSEL.

Homoštruktúrne lasery

Na tomto type lasera bolo prvý krát dosiahnuté v roku 1962 emisio koherentné žiarenie (GaAs). Uvedený laser je v podstate tvorený prechodom PN. Neexistuje tu výrazná skoková zmena indexu lomu, ktorá by podmieňovala optické sústredenie, ani vysoká potenciálová bariéra, zaisťujúca sústredenie nosičov náboja. Šírka rekombinačnej oblasti (aktívnej vrstvy) je v podstate určená difúznou dĺžkou menšinových nosičov (pre silne dopovaný GaAs 1 až 3 mm). Žiarenie sa sústreďuje vplyvom gradientu indexu lomu a vplyvom rozdielov koncentrácie nosičov náboja. [17]

Heteroštruktúrne lasery

V týchto typoch laserov s heteroprechodmi je vymedzenie vlnovodu dané skokovou zmenou indexu lomu v oblasti heteroprechodu, ktorá je funkciou rozdielu šírky zakázaného pásu susedných vrstiev heteroštruktúry. Súčasne s účinným vedením svetla zabezpečuje heteroštruktúra aj podmienky na účinné sústredenie menšinových nosičov. Pôsobením heteroprechodu sa sústreďuje žiarenie a injektované nosiče do zvolených oblastí, pričom oblasť sústredenia žiarenia (optický vlnovod) môže byť totožná s oblasťou sústredenia

nosičov (aktívnou oblasťou) alebo sa od nej môže líšiť. Podľa počtu heteroprechodov sa HL delia na lasery s jednou heteroštruktúrou a s dvojitou heteroštruktúrou.

V jednoduchej heteroštruktúre SHL vytvára heteroprechod jednu zo stien vlnovodu a súčasne aj potenciálovú bariéru, ktorá sústreďuje nosiče vnútri aktívnej vrstvy typu P. Skoková zmena indexu lomu je tu oveľa väčšia ako u homogénneho prechodu. Prechodom PN a heteroprechodom je vymedzený asymetrický vlnovod. Hodnoty prúdových hustôt klesajú asi na pätinu hodnoty dosahovaných pri homoštruktúrných laserov.

Aktívna vrstva laserov s dvojitou heteroštruktúrou DHL je z oboch strán obklopená vrstvami s väčšou šírkou zakázaného pásu, nosiča náboja a aj optické žiarenie je sústreďované do aktívnej oblasti z oboch strán, teda aj s väčšou účinnosťou. Oblasť rekombinácie je u DHL presne stanovená. Nosiče náboja sa tu "neroztekajú" do okolitých vrstiev, ale v aktívnej vrstve sa vzhľadom k jej malému prierezu (až 100 nm) nahromadia v tak veľkej miere, že režimu laserovania je dosiahnutý už pri prahových prúdoch niekoľkých desiatok miliampérov. Účinnosť je veľmi vysoká, okolo 75 %. [17]

Lasery s rozloženou spätnou väzbou

Rezonátor tohto typu lasera je realizovaný bez zrkadiel pomocou priestorových periodických štruktúr (difrakčných mriežok). Funkcia je založená na periodickej zmene indexu lomu v smere šírenia. Spätná väzba vzniká trvalým naviazaním šíriace sa vlny do opačného smeru Braggovým rozptylom. Mriežka sa vytvára leptaním priamo na povrchu aktívnej vrstvy. Tieto lasery sú označované DFB (Distributed Feed Back).

Do tejto kategórie patria aj lasery s rozloženým Braggovým zrkadlom, označované DBR (Distributed Bragg Reflector). Pri tomto type sa generácia optického žiarenia a spätná väzba (opäť pomocou optickej mriežky) uskutočňujú v samostatných častiach štruktúry. Používajú sa dva typy konštrukcie, s jedným alebo s dvoma Braggovými zrkadlami. V bežnej praxi sa možno častejšie stretnúť s typom s dvoma Braggovými zrkadlami na koncoch vlnovodu. [17]

Lasery DFB

Sú vhodné zdroje pre systémy integrovanej optiky pre pásmo 1 300 až 1 550 nm. Čo je spôsobené tým, že nahradením Fabryho-Perotova rezonátora optickou mriežkou umožňujú jednomódovú prevádzku pri kvalitnom napojení na optický vlnovod. Ďalšou výhodou je ich zlúčiteľnosť s planárnymi vlnovodmi pripravenými na jedinej podložke,

teda ich ľahká výroba. DFB lasery dosahujú veľmi úzkej spektrálnej šírky (menej ako 1 nm) a poskytujú modulačnú šírku pásma v radách jednotiek až desiatok gigahertzov. Hlavné uplatnenie tohto typu laserových diód sa nachádza predovšetkým v komunikáciách optickými vláknami pre vlnové dĺžky 1 300 a 1 550 nm. [17]

Lasery s kvantovými jamami

Tento typ označovaný Quantum Wells Laser - QWL má dvojité heteroštruktúru. Jej aktívna vrstva (označovaná ako kvantová jama), líšiaca sa zložením, je tak tenká, že sa pri generácii optického žiarenia uplatňujú kvantové javy podmienené jej hrúbkou. Tu predstavuje DH pravouhlú potenciálovú jamu vo vodivostnom aj valenčnom páse polovodiča. Ak sú rozmery vrstvy porovnateľné s de Broglieho vlnovou dĺžkou (v tepelnej rovnováhe elektrónov) môže elektrón nadobúdať len určitým energiám, zodpovedajúcim vlnovým dĺžkam, ktoré sú násobkom týchto miniatúrnych rozmerov aktívnej vrstvy. [17]

Epitaxné technológie umožňujú realizovať lasery s hrúbkami kvantovej jamy menšími než 20 nm. Súčasnými technológiami možno uskutočňovať vrstvy tvorenej iba jedinou atómovou rovinou. Takto je možné získať PL s veľmi úzkou spektrálnou charakteristikou. Teplotná závislosť prahového prúdu IP pritom je miernejšia ako u predchádzajúcich typov PL. Bežná hrúbka aktívnej vrstvy je 10 nm. Prahové prúdy pre SQWL sú približne v rozmedzí od desiatín miliampérov po niekoľko málo desiatok miliampérov. Účinnosť týchto typov laserov môže prekročiť až 80 %. Výstupný optický výkon bežne dosahuje desiatok miliwattov v kontinuálnom režime (MQWL). [17]

V súvislosti s rôznymi typmi LD nemožno opomenúť tzv. POLE LD (plošné usporiadanie niekoľkých desiatok až stoviek LD), ktoré majú veľký význam predovšetkým v oblasti veľkých optických výkonov. Bežne sa dnes vyrábajú polia LD (arrays, bars) s celkovými výkonmi až niekoľko stoviek wattov, pričom bolo prezentované pole LD s výkonom aj niekoľko málo kilowattov. Využívajú sa napr. pre optické čerpanie pevnolátkových laserov. [17]

5 FOTODETEKTORY

Fotodetektory menia modulované aj nedomulované optické žiarenie na elektrický signál vo forme elektrického prúdu. Vo fotodetektoroch sa využívajú aj priame fotoelektrické javy, pri ktorých sa dopadajúcim žiarením vytvárajú nosiče nábojov a termojavy, pri ktorých ohrevom absorbovaným žiarením vznikajú nepriame elektrické javy. Tepelné detektory však majú pri rýchlych zmenách intenzity žiarenia takú zotrvačnosť, že sú schopné demodulovať len nízkofrekvenčné signály. Preto sa na rýchly prenos informácie takmer nepoužívajú. Z priamych fotoelektrických javov možno využiť vonkajší aj vnútorný fotoefekt. [3].

Pri vonkajšom fotoelektrickom jave vzniká pri pôsobení svetla fotoemisía, t.j. vo vákuových fotódkach emisía elektrónov z fotokatód. Pri vnútornom fotoefekte sa v oblasti priechodu PN v polovodiči vytvára pohyb žiarením vybudených nosičov náboja, čím vzniká fotoprúd, ktorý možno rozdeliť na difúzny a driftový. Uvedený typ fotoefektu sa využíva vo fotodiódach. [3]

Na demoduláciu optického žiarenia sa využívajú fotoštruktúry s elektrónovou emisíou (fotokatódy) aj fototranzistory a fotodiódy z polovodičov. Vlastná vodivosť môže vzniknúť vo vlastnom polovodiči vtedy, ak dopadajúci kvant žiarenia dodá elektrónu vo valenčnom pásme energiu dostatočnú na prekonanie zakázaného pásma [3].

5.1 Fotodiódy PIN

Polovodičové fotodiódy sa najčastejšie realizujú ako diódy PIN z kremíka, ale aj z iných polovodičových zlúčenín. V prípade kremíkových fotodiód sa na podložke s veľkou vodivosťou typu N vypestuje epitaxná málo vodivá vrstva N , alebo intrinzičná vrstva označená v . Potom sa pokryje tenkou, ale dobre vodivou vrstvou P^+ . Okrem tejto vrstvy sa spojí s kontaktom a voľná časť sa pokryje antireflexnou vrstvou, aby žiarenie potrebného spektrálneho žiarenia prenikalo do diódy podľa možnosti bez odrazu [3].

Princíp všeobecnej fotodiódy je založený na vnútornom fotoelektrickom jave. Fotón dopadajúci na prechod PN, narazí do elektrónu vo valenčnej vrstve atómu a odovzdá mu svoju energiu. Elektrón tak absorbuje energiu fotónu, vďaka čomu získa dostatok energie k prechodu z pásu valenčného do vodivostného. Elektrón sa tak odpúta od vlastného atómu a pohybuje sa priestorom kryštálovej mriežky. Na jeho mieste vznikne diera (kladne nabitá

částica). Tieto uvoľnené elektróny sú nosiče náboja, ktoré znižujú elektrický odpor polovodiča. [2]

5.2 Lavínová fotodióda APD

Každý dopadajúci fotón na lavínovú fotodiódu spustí kaskádu pohybujúcich sa párov nosičov. Slabá intenzita dopadajúceho žiarenia tak vytvorí dostatočne veľký prúd, ktorý možno už ďalej ľahko spracovať. Dióda sa zapája v závernom smere a prikladá sa na nej vysoké záverné napätie v rádoch desiatok až stoviek voltov, ktoré vytvorí na prechode veľmi silné elektrické pole. Nosiče náboja sú tak urýchľované, čím získavajú energiu, ktorá je dostatočná pre excitáciu nových nosičov. Nárazovou ionizáciou nastáva lavínový jav. Pri lavínovom násobení sa fotoprúd I_{ϕ} veľmi zosilní a tým narastá citlivosť fotodiódy. [2][3]

5.3 Šumové parametre

Okrem užitočného signálu je na výstupe fotodetektora aj chaotický signál s náhodnými amplitúdami a frekvenciami – šumy fotodetektora. [3]

Šumový prúd (šumové napätie) vzniká vo fotodetektore v dôsledku vnútorných a vonkajších príčin ako sú vplyv teploty, prúdu fotodetektora, kvantovaný charakter ožiarenia a pod. Pretože šumy sú náhodnými procesmi, opisujú sa takými charakteristikami ako matematické očakávanie (stredná úroveň šumu), stredná kvadratická hodnota alebo disperzia šumu. Spektrálne rozloženie šumu sa určuje hustotou šumu (disperziou) na jednotke frekvencie. [3]

V detektoroch rozlišujeme aj kvantový šum vznikajúci v dôsledku fluktuácií dopadajúcich kvánt a fluktuácií vyžiarených fotónov fotodetektorom do priestoru, pretože teplota fotodetektora sa líši od absolútnej nuly. [3]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

6 NÁVRH BEZDRÔTOVÝCH SLÚCHADIEL

Hardwarová realizácia bezdrôtových slúchadiel pomocou optického prenosu.

6.1 Požiadavky

Navrhnutý prístroj by mal zabezpečiť prenos audio signálu. Prenosovým médiom môže byť ľubovoľný svetelný lúč, ktorý prechádza voľným prenosovým prostredím - atmosférou (vzduchom).

6.2 Postup

Pri návrhoch podobných prístrojov, založených na optickom bezdrôtovom prenose, je jedným z dôležitých faktorov druh optického zdroja. Najvhodnejšie riešenie, hlavne z pohľadu prenosovej vzdialenosti, je použiť laserový modul. V realizácii som použil ako zdroj modrú LED diódu, ktorá bude pre demonštráciu stačiť aj napriek veľkému rozptylu a veľkej strate výkonu s narastajúcou vzdialenosťou. LED dióda dosahuje výkon do 0.1W a vlnovú dĺžku 460 nm - 465 nm. Nosný signál je realizovaný pomocou amplitúdovej modulácie. Amplitúdová modulácia patrí medzi jednoduché spojité modulácie. Pre zatriktívnenie projektu som ako napájanie vysielača použil USB konektor, ktorý disponuje 5V, čo bude dostačujúce a pre napájanie prijímača som použil klasickú 9V batériu. Keďže ide podľa názvu o bezdrôtové slúchadlá, vysielač obsahuje 3,5mm jack, ktorý budeme pripájať k notebooku alebo inému zdroju dát (v mojom prípade k zdroju hudby). 3,5 mm jack je bežne používaný a pravdepodobne najrozšírenejší konektor pre pripojenie prenosných slúchadiel a domácich reproduktorov. Hotový produkt som umiestnil pre vizuálnu stránku, ale hlavne pre ochranu pred poškodením do plastového obalu.

6.3 Realizácia

Celú realizáciu som si rozdelil do troch častí:

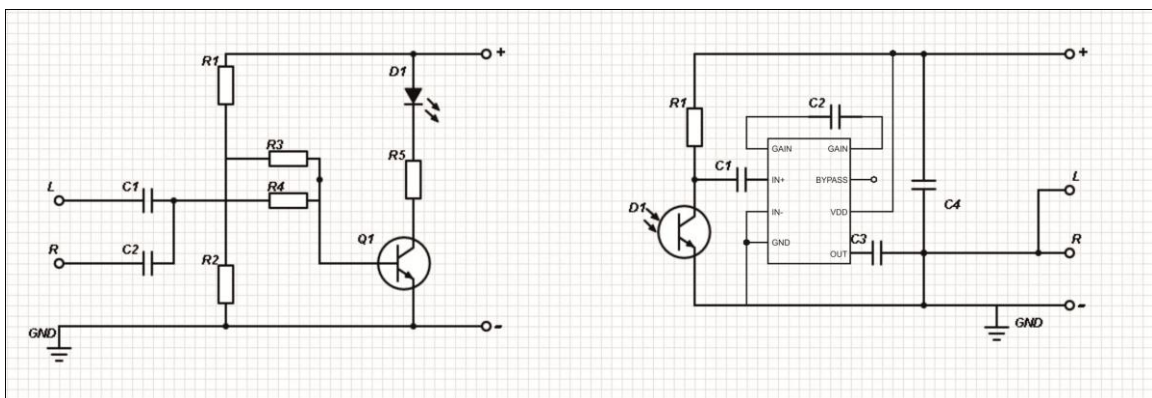
- Informácie – Prieskum – Možnosti.
- Návrh – Konštrukcia – Doladenie.
- Princíp – Meranie.

6.3.1 Informácie – Prieskum – Možnosti

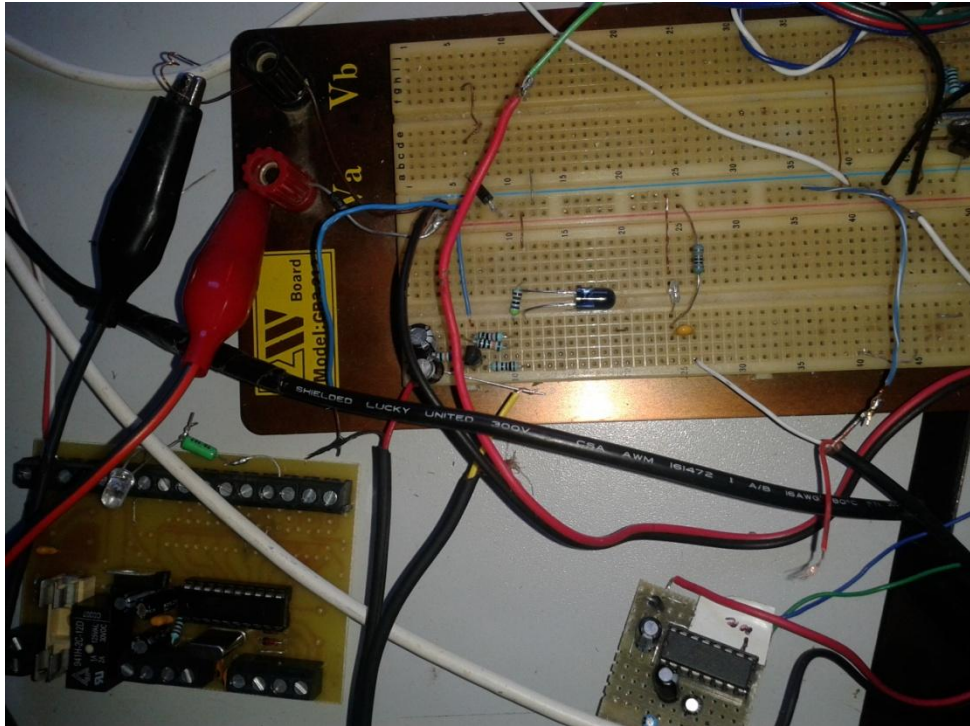
Nemám skúsenosti s realizáciou podobného prístroja, preto som sa spočiatku zameril na získanie potrebných odborných teoretických znalostí. Návšteva knižníc, zbierka tematicky príbuzných publikácií, hľadanie pomoci u odborne zdatnejších. Po nazbieraní dostatočných informácií a priblížení si, čo vlastne budem potrebovať som postúpil do druhého kroku tejto fázy. Bolo potrebné uskutočniť prieskum trhu. Hľadal som či, a kde všade sa vyskytujú rovnaké, alebo podobné realizácie bezdrôtového optického prenosu, z ktorých by som mohol čerpať informácie pre vlastný projekt. V dnešnej dobe moderných technológií však nie je núdza o odborné internetové publikácie z ktorých som sa neskôr inšpiroval pri realizácii môjho projektu.

6.3.2 Návrh – Konštrukcia – Doladenie

Pred samotnou konštrukciou som si skúsil zostaviť a overiť funkčnosť na nespájkovacom kontaktnom poli. [21]



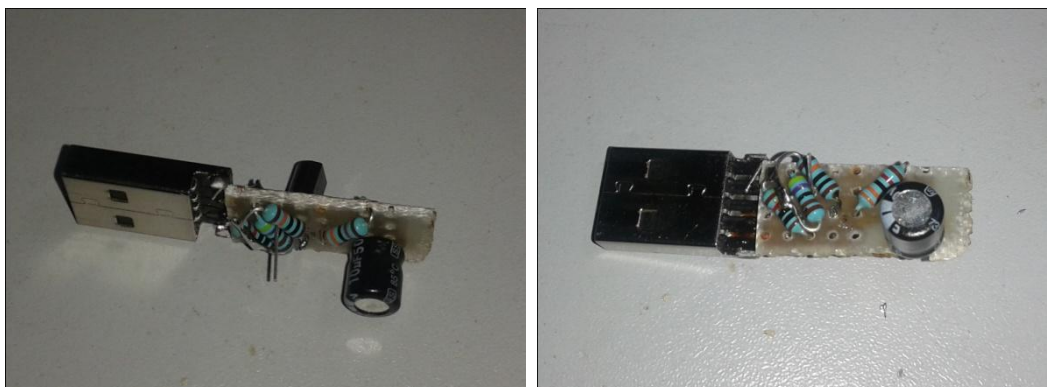
Obr. 10. Schéma zapojenia



Obr. 11 Test funkčnosti

Po zostavení som sa presvedčil o funkčnosti zapojenia a pristúpil ku konštrukcii.

Prvým krokom samotnej realizácie bola konštrukcia vysielača. Kúpil som si univerzálnu dosku pre plošné spoje a postupne začal spájkovať všetky potrebné prvky podľa schémy. Prvky obvodu predstavujú diskkrétne súčiastky. Súpis všetkých použitých súčiastok je uvedený v prílohe P1. Prívod napájania dosky je realizovaný pomocou USB konektora.



Obr. 12. Rozpracovaný vysielač

Audio vstup je realizovaný pomocou 3,5mm jack konektora, ktorý je aj s LED diódou napevno prispájkovaný k doske. Hotová doska vysielača aj s USB konektorom má rozmery približne 40 x 20 mm .

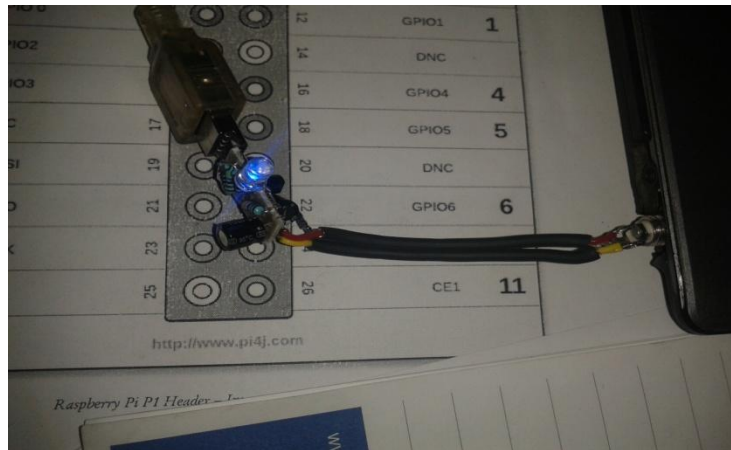


Obr. 13. Test funkčnosti napájania vysielača

Základ prijímača je tvorený konektorom pre 9V napájanie. Ako u vysielača tak aj u prijímača sú audio výstup a fototranzistor napevno prispájkované k základu. Podstatnú časť prijímača pri bezdrôtových slúchadlách tvorí zosilňovač, ktorý som na základe nižšie realizovaných meraní, nastavil podľa technického listu na zosilnenie $G=20$.



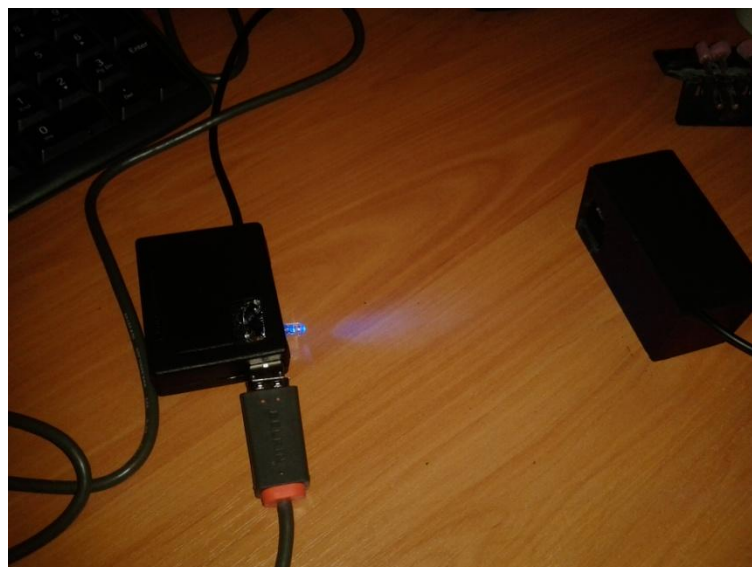
Obr. 14. Rozpracovaný prijímač



Obr. 15. Test optického prenosu



Obr. 16. Umiestnenie vysielača a prijímača do ochranných krabičiek



Obr. 17. Hotová realizácia

6.3.3 Princíp

Pri vysielaní sa v podstate jedná o zosilňovač pracujúci v triede A, ktorý na svojom výstupe budí ľubovoľnú diódu LED. Vstupný signál (ľavý a pravý kanál) sa zmiešajú pomocou dvoch kondenzátorov C1 a C2 do jedného signálu. Ten je ďalej vedený na báze zosilňovacieho tranzistora T1. Tranzistor má pomocou rezistorov R1 a R2 (počítajme samozrejme aj pomocou R3) nastavené vhodné predpätie do bázy a pracuje v triede A. Tranzistor potom budí vo svojom kolektorovom obvode svietivú LED D1. Dióda je pripojená cez rezistor R1 s hodnotou 100Ω. Táto hodnota je vhodná pre LED diódu a to pre napájacie napätie približne 4,5 V.

V prijímači je signál prijímaný fototranzistorom D1 a oddelený kondenzátorom C1. Potom je vedený na vstup zosilňovača tvoreného obvodom LM386. Obvod je v zapojení o zosilnení 20. Výstupný signál o výkone až 0,5 W je potom vedený na výstup. [21]

6.4 Meranie a výsledky:

K meraniu parametrov som použil digitálny osciloskop ETC M621. Meranie parametrov samotného prenosu nízko-frekvenčného signálu som realizoval v interiérovom priestore na vzdialenosť 10 cm.

6.4.1 Frekvenčná prenosová charakteristika

Pri meraní frekvenčnej prenosovej charakteristiky som na vstup vysieláča pripojil harmonický signál o efektívnej hodnote 2,5 V. Kmitočet tohto signálu som zvyšoval v rozsahu 10 Hz - 50 kHz a vyhodnocoval ho na prijímači. Hodnotu prenosu v dB vypočítame ako:

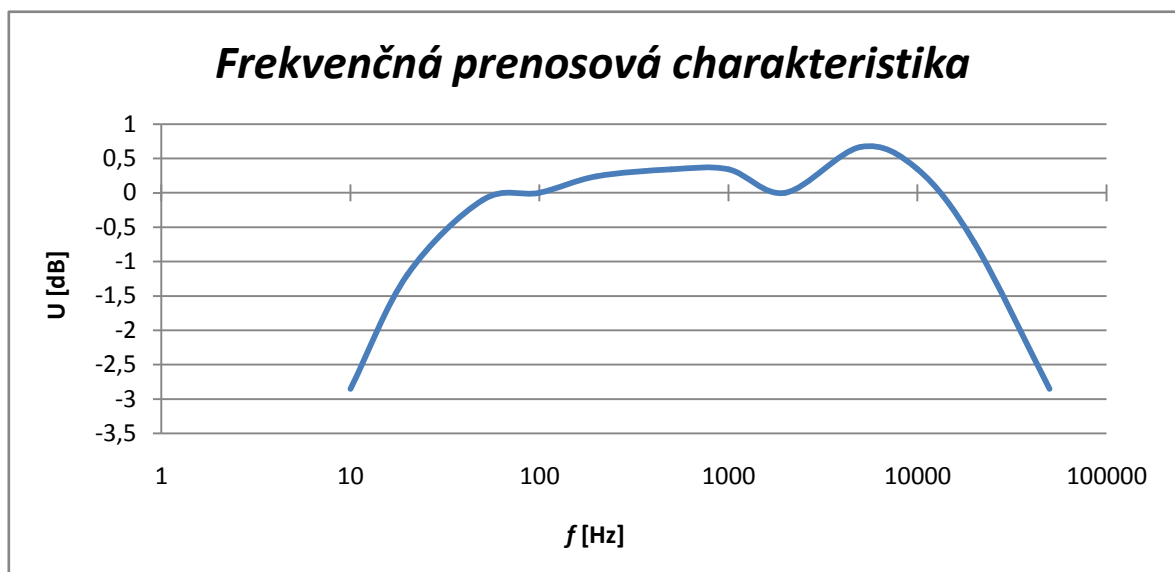
$$U_{RMS} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \quad (2)$$

Meranie ukázalo najvyšší prenos na **5 kHz**, potom sa začne zase znižovať.

Tab. 1. Namerané hodnoty frekvenční charakteristiky

$$U_1 = 2,50 \text{ V} ; f = 1 \text{ kHz} ; \text{vzdialenosť} = 10 \text{ cm}$$

F	[Hz]	10	20	50	100	200	500
U₂	[V]	1,80	2,18	2,47	2,50	2,57	2,60
U_{RMS}	[dB]	-2,853	-1,190	-0,105	0,000	0,240	0,341
F	[kHz]	1	2	5	10	20	50
U₂	[V]	2,60	2,50	2,70	2,60	2,30	1,80
U_{RMS}	[dB]	0,341	0,000	0,668	0,341	-0,724	-2,853



Obr. 18. Graf frekvenčnej prenosovej charakteristiky

6.4.2 Odstup signál/šum

Je určujúci parameter pre dynamický rozsah reprodukovateľného signálu. Horná hranica výstupného signálu je daná prebudením zosilňovača - limitácia, prudký nárast skreslenia. Dolná hranica úrovne výstupného signálu je daná hladinou šumu. Ak teda chceme, aby zosilňovač prenášal aj najjemnejšie detaily o malej úrovni, je nutné zaistiť minimálnu hladinu šumu.

Pre zistenie šumu som nastavil harmonický signál na efektívnu hodnotu $U=2,5\text{V}$ a následne odpojil generátor. Z osciloskopu som vyčítal hodnotu šumu: $U_{\xi}=0,12\text{V}$

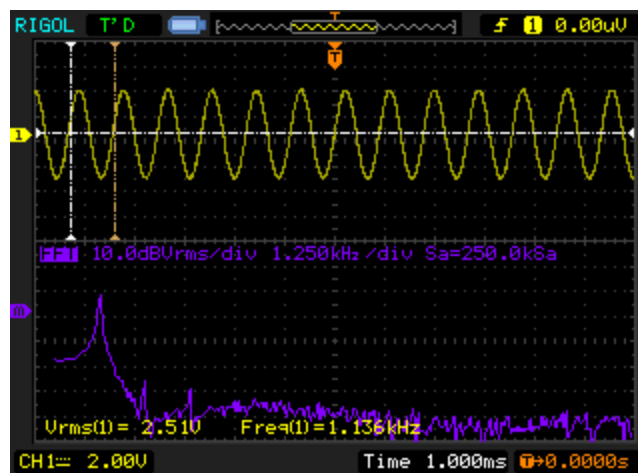
Pre výpočet odstup signál/šum použijeme vzorec:

$$\frac{S}{\xi} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{U_{\xi}}{U} \right) = -26,375 \quad (3)$$

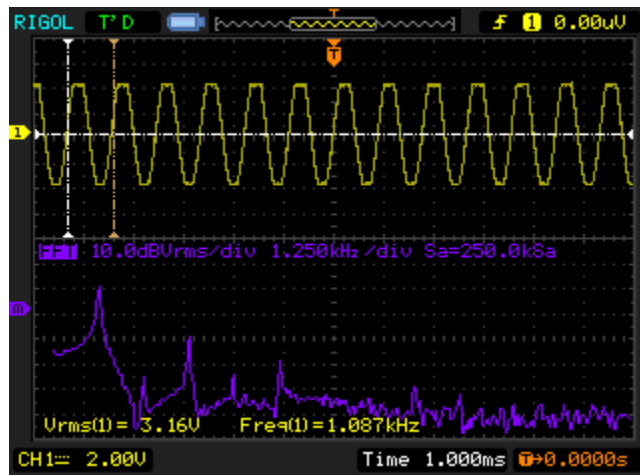
6.4.3 Skreslenie

Medzi všeobecnými technickými vlastnosťami, ktoré sú dôležité pre posúdenie kvality zosilňovača bez ohľadu na oblasť jeho použitia určite zaujmú významné miesto "skreslenia" v zosilňovači. Skreslenia, ktoré vznikajú v zosilňovači ovplyvňujú zosilňovaný striedavý signál či už tvarovo, frekvenčne alebo fázovo. Jednoznačne môžeme povedať, že skreslenia v zosilňovači ovplyvňujú vernosť prenosu striedavého signálu zosilňovačom tzn. že výstupný signál sa vstupnému signálu podobá v tvare, fáze aj šírke prenášaných frekvencií. [18]

Pri postupnom prebudení sme pozorovali na modrom grafe vznik vyšších harmonických. Z merania sme mohli odpozorovať, že až do napätia 2,5V sa vyššie harmonické neobjavujú, tzn. skreslenie je malé. Pri väčšom prebudení sa začínajú objavovať.



Obr. 19. Pozorovanie vzniku vyšších harmonických do 2,5V



Obr. 20. Pozorovanie vzniku vyšších harmonických nad 2,5V

7 VYUŽITIE V BUDÚCNOSTI

Jednou z technológií, ktorá sa na začína postupne dostávať do povedomia, je LiFi. Nie je to síce nová technológia, no stále sa pracuje na jej vývoji. Ide o svetelné WiFi, teda Light Fidelity.

LiFi umožňuje vysokorýchlostný prenos dát cez pulzujúce svetelné zdroje. I keď nášmu nedokonalému oku sa javí ako statický zdroj. Žiarovka teda bliká obrovským počtom bliknutí za sekundu a prijímač na strane prijímacieho zariadenia tieto blikania dekóduje. LED žiarovka s 1 Wattom by takto napríklad mohla zásobiť a spojiť s internetom až 4 zariadenia (tiež ale musia byť vybavené spomínaným prijímačom, 2-smerným optickým adaptérom). Rýchlosť dátového toku je 150 Mb/s, čiže niekoľkokrát rýchlejšie ako bežné WiFi. Výhodou svetelného prenosu dát môže byť to, že je to lacnejšia i energeticky úspornejšia metóda a zároveň bezpečnejšia ako iné typy prenosu dát. Tiež sa dá využívať i tam, kde WiFi zatiaľ nie je najvítanejšia z dôvodu rušeniu iných signálov (nemocnice, čiastočne i aerolinky) a aj vo vode. Je však limitovaná tým, že medzi prijímačom a zdrojom nesmie byť žiadna prekážka. LiFi je však vo vývoji, a tak je možné, že nevýhody sa odstránia časom. [20]

Dnes už len ťažko môžeme poprieť, že technológie ovplyvňujú náš každodenný život – občas už bez toho, aby sme sa nad tým vôbec zamysleli. Stretávajú nás doma, v pracovnom kolobehu či vo voľnom čase. Nadčasovosť pripojenia a používanie optických technológií prispieva k tomu, že optika priamo doma už nie je len vzdialenou budúcnosťou, ale spojením technológie budúcnosti s dneškom. Nie je to však len módna vlna, alebo hit, ktorý časom stratí na hodnote. O optickej technológii priamo doma sa dnes hovorí aj ako o investícii do nehnuteľnosti, keďže tento spôsob extrémne rýchleho a spoľahlivého prenosu dát a k množstvu ďalších doplnkových služieb zabezpečí komunikačné potreby minimálne na nasledujúcich 20 rokov. [19]

ZÁVER

Rýchlosť a možnosti prenosu dát sú v dnešnej dobe jedným z hlavných a rozhodujúcich faktorov v najrôznejších odvetviach. S narastajúcim počtom dátového objemového zaťaženia je nutné časom počítať s nedostatočnými možnosťami spojenia. Od pohltenia radiofrekvenčného pásma až po obmedzenie využitia káblových spojov v dôsledku zastavaných plôch je vhodné rátať s alternatívou, ktorú ponúka bezdrôtová optická komunikácia. Aj z pohľadu ochrany zdravia, kde sa pri mikrovlnnom žiarení a všeobecne pri elektromagnetickom vlnení stretávame s kritickými názormi zo strany hygienikov, je optická technológia vhodným riešením. Pri dodržaní noriem vysielaného výkonu, totiž úzky svetelný kužeľ nepredstavuje pre ľudský organizmus žiadne nebezpečenstvo.

V pravej časti práce som sa zamerlal na základné vlastnosti optiky pre lepšie zoznámenie sa s problematikou optických bezdrôtových spojov. Tiež som opísal fyzikálnu podstatu samotného svetelného lúča a prenosové prostredie najmä z pohľadu pôsobenia atmosférických vplyvov na samotnú kvalitu prenosu. Ďalej som priblížil jednotlivé prenosové médiá a zhodnotil som ich výhody a nevýhody pri prenose.

Pri praktickej časti som vychádzal z teórie optických spojov, elektrických obvodov a inšpiroval som sa zo schém zapojenia uvedených v zozname použitých zdrojov. Samotný návrh a realizáciu som si rozdelil na niekoľko častí, od získania potrebných informácií až po spustenie a meranie výsledných hodnôt. Počas práce som sa stretol s viacerými problémami. Najmä s nedostatočnými skúsenosťami v oblasti riešenia podobných úloh.

Prínos môjho projektu vidím v lepšom pochopení oblastí elektroniky a optoelektroniky, do ktorých som mal možnosť nahliadnuť aj počas môjho štúdia. Optické bezdrôtové slúchadla, ktoré som skonštruoval sú jednoduchá a dobrá pomôcka pre demonštráciu optickej bezdrôtovej komunikácie na krátku vzdialenosť. Počas práce som zaznamenal viacero faktorov, ktoré uberajú využiteľnosti, ale na druhej strane mi to dalo predstavu čo všetko by sa dalo vylepšiť. Technológie idú v dnešnej dobe rýchlo dopredu a najviac ma z pohľadu mojej práce zaujala technológia FIFI, v ktorej vidím v budúcnosti veľký potenciál.

ZÁVER V ANGLIČTINE

Speed and possibility of data transmission are one of the main and decisive factors in a variety of industries nowadays. It is necessary to consider the lack of connection options, depending on the growing volume of data. From absorption of radio frequency band, till restriction of use of cable joints because of built-up area, it is appropriate to have an alternative for example wireless optical communication. Even from the perspective of human health, the view on the microwave radiation and electromagnetic waves generally differ among various studies. On the contrary, a narrow light beam in compliance with maximal power densities, do not represent any danger to human health whatsoever.

I focused on the basic characteristics of optics in the first part, for a better understanding of wireless optics links. I also described the physical properties of the optic beam and transmission space, especially in terms of climate effects on the actual transmission quality. Next, I approached various transmission media, and I described their advantages and disadvantages of transmission.

In the practical part, I relied on the theory of optical telecommunications, electrical circuits and I was inspired by internet publications. I have divided the work into several parts, from obtaining the necessary information to run and measure the resulting values. I met with several problems, during my work, especially with the lack of experience in handling similar tasks.

I see some benefits of my bachelor thesis for example better understanding of electronics and optoelectronics, which I had the possibility to study. Optical wireless headphones which I constructed are simple and good tool for demonstration of optical wireless communication over a short distance. I saw several factors during my thesis, which reduce of usefulness, but on the other hand I could see lot of things what I should be improved. Nowadays technology are going fast forward and from my point of view FIFI technology is one of the most interesting optic technology with big potential in future.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] JOHNSON, D. A. Handbook of Optical Through the Air Communication [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.imagineeringezine.com/ttaoc-pdf/OTTAC-Handbook.PDF>
- [2] SALEH, Bahaa E. Základy fotoniky: fundamentals of photonics [online]. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, xxii, 778 s. [cit. 2014-05-28]. ISBN 80-858-6305-7. Dostupné z: <http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/FLA/fotonika/Fotonika-3-text.pdf>
- [3] SCHRÖDER, Gottfried. Technická optika. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 158 s.
- [4] ŠTRBA, Anton, Vladimír MESÁROŠ a Dagmar SENDERÁKOVÁ. Svetlo: vlny, lúče, fotony. Nitra: Enigma, 2011, 461 s. ISBN 978-80-89132-83-6.
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 4. Překlad Jana Musilová, Jan Obdržálek, Petr Dub. Brno: VUTIUM, 2003, xvi, 328, [28] s. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] Optika jednoduše: Interference. In: Optika kuratkoo [online]. 2012. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://optika.kuratkoo.net/interference.htm>
- [7] Optika jednoduše: Polarizace. In: Optika kuratkoo [online]. 2012. Dostupné z: <http://optika.kuratkoo.net/polarizace.htm>
- [8] WILFERT, Otakar. Modelování atmosférických optických spojů: současný stav, trendy vývoje a výuka = The modeling of atmospheric optical links : state of the art, trends and education : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru elektronika a sdělovací technika. Brno: VUTIUM, 2007, 39 s. ISBN 978-80-214-3395-3.
- [9] WILFERT, Otakar. Fotonika a optické komunikace: přednášky. Vyd. 1. Brno: VUT FEKT, ústav radioelektroniky, 2007, 128 s. ISBN 978-80-214-3537-7.
- [10] Absorpce, rozptyl, disperze světla. The Light Fantastic, kap. 11 [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z:

<https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Absorpce,%20rozptyl,%20disperze%20svetla.pdf>

- [11] Rozptyl (žiarenie). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: [http://sk.wikipedia.org/wiki/Rozptyl_\(žiarenie\)](http://sk.wikipedia.org/wiki/Rozptyl_(žiarenie))
- [12] Elektrevue: Modelování turbulentní atmosféry a snižování fluktuací přijímaného signálu vícesvazkovým provozem. In: Elektrevue [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/02067/index.html>
- [13] Luminiscenčná dióda. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://sk.wikipedia.org/wiki/Luminiscenčná_dióda
- [14] Laserové diody: část 1. Základní principy. In: Světlo: Časopis pro světlo a osvětlení [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/laserove-diody---cast-1-zakladni-principy-35057.html>
- [15] Vlastnosti a možnosti použití luminiscenčních diod. In: Světlo: Časopis pro světlo a osvětlení [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23093
- [16] Elektrevue: Princip funkce laserových diod. In: Elektrevue [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01034/index.html#princip>
- [17] Laserové diody: Část 3. Typy LD. In: Světlo: Časopis pro světlo a osvětlení [online]. 2012 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35006

- [18] Zosilňovače - Skreslenia. In: Alzat.spseke [online]. 2012 [cit. 2014-05-28].
Dostupné z: http://alzat.spseke.sk/zosil/zakl_vl/skreslenie.htm
- [19] Investícia do optiky. In: Trend.sk [online]. 2008 [cit. 2014-05-28]. Dostupné
z: <http://technologie.etrend.sk/technologie/investicia-do-optiky-inzercia.html>
- [20] CES 2014: Premôže raz technológia LiFi známe WiFi? In: Techpedia
[online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.techpedia.sk/veda-a-vyvoj/novinky/opticke-technologie/309/ces-2014-premoze-raz-technologie-lifi-zname-wifi>
- [21] Optický přenos zvuku In: Pandatron [online]. 2008 [cit. 2014-05-28].
Dostupné z: http://pandatron.cz/?534&opticky_prenos_zvuku

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV SKRATIEK

UV	Ultrafialové žiarenie
IR	Infračervené žiarenie
AOS	Atmosférický optický spoj.
LED	Svetelná dióda (Light Emitting Diode)
AM	Amplitúdová modulácia
FM	Frekvenčná modulácia
PM	Fázová modulácia
GaAsP	Chemická zlúčenina: Gárium - Arzenid - Fosfid
InP	Chemická zlúčenina: Indium - Fosfid
LD	Laserová dióda
OLED	Organické svetelné diódy
GaAlAs	Chemická zlúčenina: Gárium - Hliník - Arzenid
InGaP	Chemická zlúčenina: Indium – Gárium – Fosfid
Hol	Homoštruktúrne lasery
HL	Heteroštruktúrne lasery
DBFL	Lasery s rozloženou spätnou väzbou
QWL	Lasery s kvantovými jamami
EEL	Hranovo vyžarujúce lasery
VCSEL	Plošne vyžarujúce lasery
SHL	Jednoduché heteroštruktúrne lasery
DHL	Dvojité heteroštruktúrne lasery
DFB	Lasery s rozloženou spätnou väzbou
DBR	Lasery s rozloženým Braggovým zrkadlom
LiFi	Light Fidelity

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1. Ilustrácia Photopfonu	11
Obr. 2. Elektromagnetické spektrum	13
Obr. 3. Interferencia na dvojštrbine	14
Obr. 4. Ohyb svetla štrbine	15
Obr. 5. Nepolarizované a lineárne polarizované svetlo	15
Obr. 6. Hladiny energie	16
Obr. 7. Schéma optického komunikačného systému	19
Obr. 8. Luminiscenčná dióda	22
Obr. 9. Laserová dióda	25
Obr. 10. Schéma zapojenia	34
Obr. 11. Test funkčnosti	35
Obr. 12. Rozpracovaný vysielač	35
Obr. 13. Test funkčnosti napájania vysielača	36
Obr. 14. Rozpracovaný prijímač	36
Obr. 15. Test optického prenosu	37
Obr. 16. Umiestnenie vysielača a prijímača do ochranných krabičiek	37
Obr. 17. Hotová realizácia	37
Obr. 18. Graf frekvenčnej prenosovej charakteristiky	39
Obr. 19. Pozorovanie vzniku vyšších harmonických do 2,5V	40
Obr. 20. Pozorovanie vzniku vyšších harmonických nad 2,5V	41

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1. Namerané hodnoty frekvenčnej charakteristiky

39

ZOZNAM PRÍLOH

P I ZOZNAM SÚČIASTOK

P I.A Súčiastky vysielajúča

P I.B Súčiastky prijímača

P II SCHÉMY ZAPOJENIA

P II.A Schéma vysielajúča

P II.B Schéma prijímača

P III FOTODOKUMENTÁCIA

PŘÍLOHA P I: ZOZNAM SÚČIASTOK

P I.A Súčiastky vysielača:

Odpor	
Označenie	Hodnota
R1	4k7
R2	10k
R3	100k
R4	32k
R5	100R

Kondenzátor	
Označenie	Hodnota
C1	10u/16v
C2	10u/16v

Tranzistor	
Označenie	Hodnota
T1	BC337

Ostatné	
Označenie	Typ
DIODA D1	modrá
USB konektor	
Jack	3,5 mm

P I.B Súčiastky prijímača:

Odpor	
Označenie	Hodnota
R1	1k

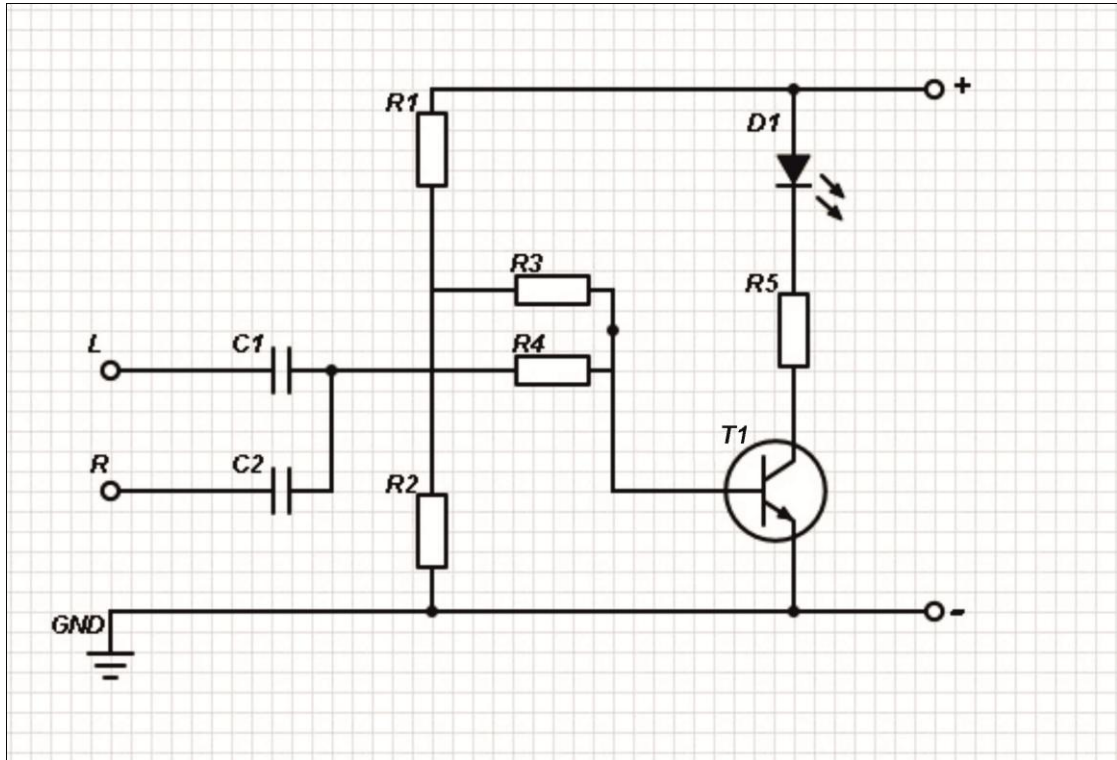
Kondenzátor	
Označenie	Hodnota
C1	100n
C2	10u/16v
C3	100u/16v
C4	100u/16v

Fototranzistor	
Označenie	Hodnota
D1	L-53P3C

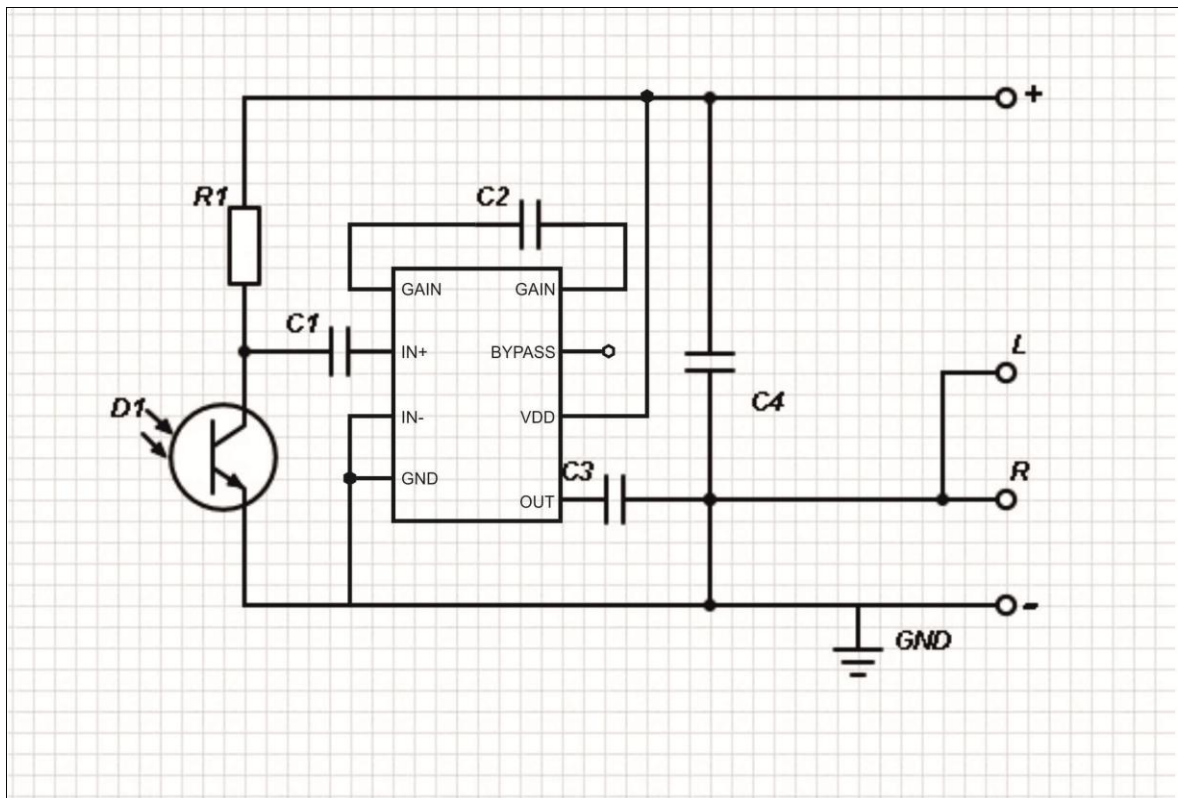
Ostatné	
Označenie	Typ
IO1	LM386
Jack zásuvka	KK 35

PŘÍLOHA P II: SCHÉMY ZAPOJENIA

P II.A Schéma vysielča:



P II.B Schéma prijímača:



PŘÍLOHA P III: FOTODOKUMENTÁCIA

