

Vlastnosti optronu a jejich aplikace v bezpečnostních technologiích

Optocouplers in Safety
Technologies – Properties and Applications

Vlastimil Roháček



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vlastimil ROHÁČEK**

Osobní číslo: **A10238**

Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vlastnosti optronu a jejich aplikace v bezpečnostních technologiích**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte obecný rozbor statických a dynamických vlastností optronu.
2. Navrhněte experimentální úlohu pro výukové účely zaměřenou na vybrané vlastnosti optronu.
3. Realizujte a ověřte funkčnost experimentální úlohy.
4. Navrhněte vhodné zadání měření s vytvořenou úlohou.
5. Vypracujte vzorový protokol z měření.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. FISCHER, Jan. Optoelektronické senzory a videometrie: cvičení. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 143 s. ISBN 80-010-2525-X.
2. MAŤÁTKO, Jan. Elektronika. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008, 362 s. ISBN 978-80-85970-64-7.
3. VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
4. DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
5. BMR vývoj a výroba regulační techniky [online]. 2013 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://bmr.cz/>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Skočík
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou optoelektronických vazebních členů. V teoretické části je mimo jiné popsána historie a fyzikální principy týkající se optického záření, fotoelektrického jevu, či polovodičů. Dále jsou zmíněny prvky, které se nejčastěji v rámci optoelektronických vazebních členů používají jako vysílače a přijímače optického záření. Praktická část se zabývá návrhem experimentální měřicí úlohy pro ověření vlastností optronů k výukovým účelům v rámci předmětu Senzory na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Je popsán výběr optronů a praktická realizace navržené úlohy, ověření její funkčnosti a zpracování výsledků do zprávy ve formě protokolu tvořeného dle požadavků kladených daným předmětem. Součástí práce je i vlastní návrh na zadání zrealizované úlohy.

Klíčová slova: Optoelektronický vazební člen, optron, optočlen, senzor, záření

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the optocouplers. In the theoretical part, among other things, is described the history and physical principles applicable to optical radiation, photoelectric effect, and semiconductors. There are mentioned elements, which are most often used as transmitters and receivers of optical radiation. The practical part deals with designing of an experimental measurement system for verifying properties of optocouplers for educational purposes within the subject of sensors at the Faculty of Applied Informatics at Tomas Bata's University in Zlin. There is described the selection of optocouplers and practical implementation of the proposed system, to verify its functionality and processing the results in a report in the form of a protocol consisting of requirements according to the subject matter. The work also includes my own design of realized system.

Keywords: Optocoupler, optoisolator, sensor, radiation

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Skočíkovi za jeho odborné vedení, rady a připomínky.

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 ČÁST.....	10
1 HISTORIE	11
2 VLASTNOSTI OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	13
2.1 VLNOVÁ PODSTATA OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	13
2.1.1 Elektromagnetické spektrum záření	14
2.2 KVANTOVÁ PODSTATA OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	19
3 FOTOELEKTRICKÝ JEV	20
4 POLOVODIČE.....	22
4.1 VLASTNÍ POLOVODIČE.....	22
4.2 NEVLASTNÍ POLOVODIČE	24
4.2.1 Polovodič typu N.....	24
4.2.2 Polovodič typu P	25
4.3 PN PŘECHOD	26
5 OPTOELEKTRONICKÝ VAZEBNÍ ČLEN	28
5.1 ZDROJE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	28
5.1.1 Diody LED	29
5.1.2 Laserové diody	30
5.1.3 Termické zdroje optického záření	32
5.1.4 Luminiscenční zdroje optického záření	32
5.2 DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	33
5.2.1 Fotorezistor	33
5.2.2 Fotodioda.....	34
5.2.3 Fototranzistor	35
5.2.4 Fototyristor a fototriak	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
6 VÝBĚR VHODNÝCH OPTOELEKTRONICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ.....	39
6.1 DŮLEŽITÉ PARAMETRY OPTOELEKTRONICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ	39
6.1.1 Obecné parametry	39
6.1.2 Parametry udávané pro vstupní část optočlenu	40
6.1.3 Parametry udávané pro výstupní část optočlenu	41
6.1.4 Statické vlastnosti optoelektronických vazebních členů	41
6.1.5 Dynamické vlastnosti optoelektronických vazebních členů	43
6.2 VYBRANÉ OPTOELEKTRONICKÉ VAZEBNÍ ČLENY	44
6.2.1 HCPL-181	44
6.2.2 VTL5C9	45
6.2.3 6N135-300E	46
6.2.4 MOCD233M	47
7 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY.....	49
8 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY	52
9 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY.....	56

9.1	MĚŘENÍ STATICKÝCH VLASTNOSTÍ OPTOELEKTRONICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ	56
9.1.1	Vstupní charakteristika.....	56
9.1.2	Výstupní charakteristika.....	58
9.1.3	Převodová charakteristika	59
9.2	MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ OPTOELEKTRONICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ	60
ZÁVĚR		62
CONCLUSION		64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		69
SEZNAM OBRÁZKŮ		70
SEZNAM TABULEK.....		72
SEZNAM PŘÍLOH.....		73

ÚVOD

Optrony (také optočleny, optoelektronické vazební prvky, optoizolátory) jsou elektronické součástky využívající interakce optického záření s různými materiály, převážně polovodičovými. Stejně jako v ostatních odvětvích elektroniky došlo i v optoelektronice k výraznému pokroku v posledních letech. Dochází k miniaturizaci a integraci těchto součástek.

Optoelektronické vazební členy se skládají ze dvou částí, vysílače optického záření a jeho přijímače. Vysílače emitují optické záření a to při dopadu na přijímač mění jeho elektrické vlastnosti - vodivost a s tím související odpor (vodivost je obrácená hodnota odporu). Změna vodivosti světlo citlivých materiálů je způsobena přechodem elektronů do vodivostního pásu (který je za normálních okolností prázdný) při jejich osvětlení. Tímto způsobem dokáže detektor optického záření rozlišit, jestli je zdroj světla aktivní nebo nikoliv. Tento jev se nazývá fotoelektrický a je základem funkce optoelektronických vazebních členů.

Za vznikem optoelektroniky stojí slavní fyzici jako Maxwell, Faraday, Planck, nebo Einstein. První zmínky o pokusech se světlem jsou z 19. Století. K největšímu rozvoji však došlo v druhé polovině 20. století, stejně jako u většiny elektronických oborů.

Optočleny se používají v různých aplikacích a jsou součástí mnoha zařízení. Nejčastěji se používají pro galvanické oddělení dvou elektronických obvodů nebo zařízení. To znamená, že nejsou propojeny vodivě, ale pouze pomocí optického záření. Tím je umožněno nepřenášet rušivé signály z jedné části obvodu do druhé a také slouží jako ochrana proti přepětí. Pomocí galvanického oddělení je možné ochránit drahou techniku a zařízení v případě nečekaného elektrického výboje. Dalším příkladem použití je přenášení optického signálu na velké vzdálenosti. V tomto případě se mezi zdroj a detektor optického záření umístí optický kabel jako přenosové médium. Tento typ přenosu signálu se vyznačuje vysokou rychlostí a nízkým rušením. V bezpečnostním průmyslu se optoelektronické prvky používají jako infračervené brány používané zejména k perimetrické ochraně. Při přerušení neviditelného paprsku (pro lidské oko) mezi vysílací a přijímací částí dojde k vyhodnocení informace a vyhlášení narušení střežené oblasti.

Problematikou zaměřenou na vlastnosti optoelektronických vazebních členů se zabývá následující práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE

Optoelektronika je oblast elektroniky, která se zabývá interakcí světla s elektronickými prvky. Teoretický základ této disciplíny vytvořili v 19. a 20. století slavní fyzici jako James Clerk Maxwell, Michael Faraday, nebo Roy Kerr. [8]

V druhé polovině 19. století zjistil irský fyzik John Tyndall, že světlo může být vedeno a směřováno dielektrickým prostředím. Dokázal to pomocí lampy a proudu vody z nádoby, což byl první uměle vytvořený vlnovod. Těchto poznatků využil J. C. Maxwell při tvoření základních rovnic elektrodynamiky a řekl, že světlo obsahuje jak elektrickou, tak magnetickou složku. Díky této teorii se začal používat termín elektromagnetické záření. První selenový článek, který slouží k přeměně sluneční energie na elektrickou, vytvořil v roce 1973 anglický fyzik W. Smith. [8], [9]

Rozvoj kvantové elektroniky přišel s německým fyzikem Albertem Einsteinem, který roku 1917 zkoumal interakci záření a hmoty a objevil možnosti indukované emise světla. V roce 1954 sestrojili američtí a sovětské vědci (nezávisle na sobě) první mikrovlnný kvantový zesilovač a později i generátor označený MASER (z anglického Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tím potvrdili Einsteinovu teorii o záření a stimulované emisi a také vzniklo odvětví, kvantová elektronika. [8], [9]

V roce 1960 vytvořil T. H. Maiman první impulsně pracující pevnolátkový LASER (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Využil přitom poznatků Arthura Leonarda Schawlowa a Charlese Harda Townese o možnostech kvantových generátorů v optické oblasti z roku 1958. Roku 1961 byl spuštěn první kontinuální plynový laser a tím položeny základy tzv. laserové optoelektroniky. Rok na to byl vytvořen první injekční laser. Sestrojili ho američtí a sovětské vědci a využili přitom degenerovaného přechodu roztočku GaAs (galium arsenid). V následujících letech se začaly používat i jiné materiály jako CdS (sulfid kadmennatý) nebo AlGaAs (galium arsenid s příměsí hliníku). [8], [9]

Vývoj se také zabýval nekoherentními polovodičovými luminiscenčními diodami, což je další typ optických zdrojů. V roce 1921 se objevuje první zmínka o elektroluminiscenci, roku 1956 došlo k objevu injekční elektroluminiscence. [8]

První infračervená dioda (GaAs) vznikla roku 1962, dva roky na to také červená a zelená (GaP – fosfid gallitý) elektroluminiscenční dioda. V devadesátých letech přišli na trh také modré diody (GaN – nitrid gallitý). [8]

V roce 1917 byla zahájena průmyslová výroba fotodetektorů. Fotodiody, fototranzistory a další fotoelektrické přijímače na bázi PN přechodu vznikly v 50. letech. V této době se také rozvíjel vývoj optických vlnodů a vláknové optiky. Optoelektronické prvky využívané v dnešní době přesto vznikly mnoho let poté. [8]

Hodnota optického spojení světelného vysílače a polovodičového přijímače k účelům elektrické izolace byla objevena Ivarsem G. Akmenkalnsem v roce 1963 (zařídil si US patent). Optočleny založené na fotorezistorech byly představeny v roce 1968. Jsou to nejpomalejší, ale také nejvíce lineární optrony, kvůli tomu se také dodnes využívají v hudebním a zvukovém průmyslu. Komercializace LED technologie v letech 1968-1970 způsobila rozmach v optoelektronice a do konce osmdesátých let průmysl vyvinul všechny hlavní typy optooddělovačů. Většina optočlenů na trhu používá bipolární křemíkové fototranzistory. Dosahují střední rychlosti přenosu dat, dostatečné pro aplikace, jako je elektroencefalografie. Nejrychlejší optrony využívají PIN diody ve fotovodivém režimu. [8], [9]

V roce 1965 byla zahájena průmyslová výroba optronů, i když byly známy a zkoumány již deset let předtím. Počátek 70. let byl ve znamení výzkumu optických vláknových spojů a planární integrované optiky, v 90. letech pak přišly na trh různé nové typy součástek od modrých LED (z anglického Light-Emitting Diode) diod, přes kaskádové lasery, až po např. sluneční články s reálnou účinností až 40%. V současné době můžeme samozřejmě nalézt ohromné množství optoelektronických součástek pro různé aplikace. [8], [9]

2 VLASTNOSTI OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Na optické záření se můžeme dívat ze dvou úhlů pohledu. Světlo bereme jako vlny a zároveň částice. Vlnová teorie říká, že se optické záření šíří stejným stylem jako rádiové vlny. Částicová (kvantová) teorie potom vysvětluje vzájemné působení optického záření a hmoty. [4]

2.1 Vlnová podstata optického záření

Elektromagnetická podstata optického záření byla dokázána pomocí teoretických prací a také porovnáním vlastností šíření optického záření s elektromagnetickým zářením centimetrových délek. Optické záření spadá do oblasti vlnových délek od 10 nm do 1 mm. Toto záření způsobují přeskoky valenčních elektronů. Ty se podílejí na chemických vazbách molekul a na vazbách v krystalické mřížce. V krátkovlnné oblasti na optické záření navazuje rentgenové záření. To vzniká při přeskocích elektronů z vnitřních slupek elektronového obalu atomu. V dlouhovlnné oblasti navazují na optické záření milimetrové vlny, které lze vytvářet pomocí elektronických oscilátorů. Tato rozhraní, jak v krátkovlnné, tak v dlouhovlnné oblasti optického záření nejsou ostrá. To znamená, že tyto typy záření svými okraji mohou částečně zasahovat do oboru vlnových délek optického záření. Optické záření se šíří v různých prostředích různou rychlostí. [4], [6]

Rychlost šíření závisí na permeabilitě μ a permitivitě ε prostředí dle vztahu:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad [\text{m.s}^{-1}; \text{F.m}^{-1}; \text{H.m}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ [-; -; -] kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita prostředí;

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ [-; -; -] kde μ_0 permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita prostředí;

v je rychlost optického záření v daném prostředí.

Ve vakuu je rychlost optického záření vždy větší, než v reálném prostředí. Po výpočtu výše uvedeného vztahu dostaneme rychlost optického záření ve vakuu $c = 299\,796 \text{ km.s}^{-1}$. Podílem rychlosti optického záření ve vakuu a rychlosti optického záření v reálném prostředí dostaneme index lomu prostředí. [4], [6]

Vyjádřené vztahem:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r} \quad [-; \text{m.s}^{-1}; \text{m.s}^{-1}] \quad (2.2)$$

kde n je index lomu prostředí;

c je rychlost optického záření ve vakuu;

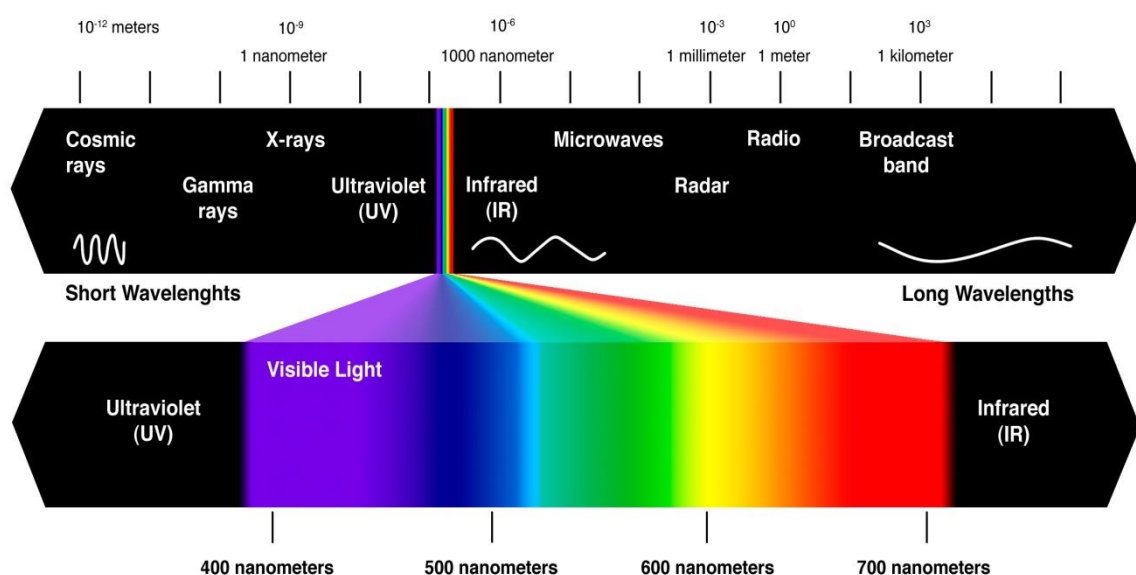
v je rychlost optického záření v reálném prostředí.

Prostředí s vyšší rychlostí optického záření nazýváme opticky řidší, prostředí s nižší rychlostí optického záření je opticky hustší. [4], [6]

2.1.1 Elektromagnetické spektrum záření

Elektromagnetické spektrum je rozsah všech možných frekvencí elektromagnetického záření. Teoreticky je toto spektrum nekonečné a kontinuální. Reálně je limit pro délku vln Planckova délka ($1,62 \cdot 10^{-35}$ m) ze spodu spektra a velikost vesmíru jako hranice na druhé straně spektra. [10]

Grafické znázornění elektromagnetického spektra:



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [19]

Obrázek ukazuje, že čím je určitý typ záření více vpravo, tím mají vlny větší vlnovou délku, menší frekvenci a menší energii. Opačně, typ záření umístěný více vlevo má větší energii a frekvenci, ale menší vlnovou délku.

Vlastnosti jednotlivých typů záření:

- Kosmické záření

Kosmické záření (Cosmic rays) jsou částice s velmi vysokou energií. Pocházejí z vesmíru a dopadají do zemské atmosféry, občas i na povrch. Toto záření vzniká explozemi a zanikáním obrovských hvězd. Tyto výbuchy mohou vyprodukovat energii $3 \cdot 10^{42}$ až $3 \cdot 10^{43}$ J vyzářenou jako kosmické záření. Skládají se především z protonů (cca 90 %), alpha částic (cca 9 %) a zbytek tvoří jádra těžších prvků. Velmi malý zlomek jsou stabilní částice antihmoty, jako pozitrony, nebo antiprotony. Přesná povaha této zbývající části je předmětem aktivního výzkumu. [11]

- Gamma záření

Gamma záření (Gamma rays), nebo gamma paprsky, je elektromagnetické záření s vysokou frekvencí a tudíž vysokou energií. Gamma paprsky jsou ionizující záření a jsou tedy biologicky nebezpečné. Většinou vznikají rozpadem z vysoce energeticky stavů atomových jader (gamma rozpad), ale mohou být také tvořeny jinými procesy. Francouzský chemik a fyzik Paul Villard objevil gamma záření roku 1900, když studoval záření vydávané radiem v průběhu jeho gamma rozpadu. Přírodní zdroje gamma záření na Zemi zahrnují gamma rozklad přírodně se vyskytujících radioizotopů a vzájemné působení mezi kosmickým zářením a zemskou atmosférou. Tento typ záření má frekvenci nad 10^{19} Hz, energii nad 100 keV a vlnovou délku menší než 10 pm. [12]

- Rentgenové záření

Rentgenové záření (X-rays) je dalším typem elektromagnetického záření. Rentgenové paprsky mají vlnovou délku v rozmezí 0,01 až 10 nm, tomu odpovídající frekvence $3 \cdot 10^{16}$ až $3 \cdot 10^{19}$ Hz a energie od 100 eV do 100 keV. Objevitelem tohoto záření byl německý fyzik Wilhelm Conrad Röntgen. Rentgenové záření s energií fotonu nad 5 až 10 keV se nazývá tvrdé záření. Paprskům s menší energií říkáme měkké záření. Díky svým pronikavým účinkům se tvrdé záření využívá k zobrazení vnitřku různých objektů. Proto se s nimi můžeme setkat např. v lékařství, nebo při letištních kontrolách. Rentgenové záření se od gamma záření liší také svým původem. Rentgenové paprsky jsou emitovány elektrony, zatímco gamma paprsky jsou emitovány atomovými jádry. [13]

- Ultrafialové záření

Ultrafialové záření (UV) odpovídá oblasti vlnových délek 10 až 400 nm a energiím 3 až 124 eV. Jmenuje se tak, protože vlnění obsahuje frekvence o něco vyšší, než co lidské oko identifikuje jako fialovou barvu. UV záření je pro lidi neviditelné, ale různé druhy hmyzu a ptáků ho mohou vidět. Přirozeným zdrojem tohoto záření je slunce – denní světlo. Umělé UV záření produkují obloukové svářečky a speciální světelné zdroje jako rtuťové lampy nebo “černé” zářivky. Mnohé materiály při vystavení ultrafialovému světlu svítí, září ve tmě. Oproti předchozím typům záření není UV světlo přímo nebezpečné pro člověka, při delším vystavení jeho účinkům však vznikají spáleniny od slunce, případně až rakovina kůže. Objevil ho německý chemik a fyzik Johann Wilhelm Ritter, který dělal pokusy se stříbrnými solemi a všiml si, že reagují ztmavnutím na určitý typ záření. Nazval je tehdy oxidujícími paprsky. [14]

- Viditelné spektrum

Viditelné spektrum (Visible light) je část elektromagnetického spektra, které je viditelné lidským okem. Běžně oko reaguje na vlnové délky zhruba 390 až 700 nm. To odpovídá pásmu frekvencí 430 až 790 THz. Oko adaptované na světlo je nejvíce citlivé na oblast okolo 555 nm (540 THz) v zelené části optického spektra. Světelné spektrum nicméně neobsahuje všechny odstíny barev, které dokáží lidské oči a mozek rozlišit. Chybí barvy, jako jsou např. růžová, nebo purpurová. Ty mohou být vytvořeny pouze pomocí kombinace více vlnových délek. Barvy obsahující pouze jednu vlnovou délku jsou nazývány čisté barvy. Viditelné světlo využívá „optického okna“. To je část elektromagnetického spektra, která prochází neoslabená až k zemskému povrchu. Příkladem tohoto jevu je třeba že vzduch rozptyluje modré světlo více než červené a tak se nám prázdná obloha jeví modrá. [15]

Následující tabulka ukazuje frekvenční rozsah a vlnové délky jednotlivých barev ve viditelném spektru světla:

Barva	Frekvence [THz]	Vlnová délka [nm]
Fialová	668 - 789	380 - 450
Modrá	606 - 668	450 - 495
Zelená	526 - 606	495 - 570
Žlutá	508 - 526	570 - 590
Oranžová	484 - 508	590 - 620
Červená	400 - 484	620 - 750

Tabulka 1: Frekvence a vlnové délky viditelných barev [15]

- Infračervené záření

Infračervené záření (IR) je elektromagnetické záření s vlnovými délkami vyššími, než jsou u viditelného světla. V číslech to znamená rozsah 0,75 μm až 0,3 mm. Frekvenční pásmo infračervených paprsků zhruba sahá od 1 do 430 THz. Existence tohoto záření byla poprvé objevena roku 1800 německým astronomem Frederickem Williamem Herschelem. Většina energie ze Slunce přicházející na Zem je ve formě infračerveného záření. Slunce v poledních hodinách poskytuje intenzitu záření něco přes 1 kilowatt na metr čtvereční na úrovni hladiny moře. Z této energie je 527 wattů infračervené záření, 445 wattů připadá viditelnému spektru a zbylých 32 wattů je ultrafialové záření. Rovnováha mezi absorbovanými a vyzářenými infračervenými paprsky má zásadní vliv na pozemské klima. Infračervené světlo se používá v průmyslu, vědě nebo třeba lékařství. Noční vidění využívající infračervené osvětlení umožňuje pozorovat lidi, či zvířata aniž by byl pozorovatel odhalen. V astronomii pozorování na infračervených vlnových délkách umožňuje vidět i objekty skryté do mezihvězdného prachu. Infračervené kamery jsou používány k detekci tepelných ztrát v izolaci, ke sledování měnícího se průtoku krve v kůži, nebo třeba k odhalení přehřívání elektrických přístrojů. Armádní využití zahrnuje, kromě nočního vidění, např. zaměření cíle, navádění, či sledování. [16]

- Mikrovlnné záření

Mikrovlny (Microwaves) jsou elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami řádově od 1 mm do 1 m a frekvencemi 300 MHz až 300 GHz. Zdrojem mikrovlnného záření mohou být speciální elektronky, které pracují jiným způsobem než nízkofrekvenční. To zahrnuje magnetron (používaný v mikrovlnných troubách), klystron a gyrotron. Dalšími zdroji jsou tunelové diody, Gunn diody, IMPATT diody, nebo FET tranzistory. Také Slunce vyzařuje mikrovlny, většina z nich je však zachycena atmosférou. Mikrovlnné záření se před rozmachem optických vláken používalo na telefonní spojení na dlouhou vzdálenost. Mikrovlny využívají také bezdrátové sítě na určitých frekvencích (např. WLAN 2,4 GHz) a dále se s nimi můžeme setkat např. v radaru (kontrola letového provozu, předpovědi počasí, navigace lodí atd.), globálních navigačních systémech (čínské Beidou, americké GPS, ruské GLONASS), při ohřívání potravin, nebo třeba ve spektroskopii. Mikrovlny nejsou pro lidi smrtelně nebezpečné, i když některé studie říkají, že dlouhodobé vystavování může vést k rakovině. Existence mikrovln byla předpovězena Jamesem Clerkem Maxwellem roku 1864 pomocí jeho rovnic. V roce 1888 dokázal jejich existenci Heinrich Hertz. [17]

- Rádiové vlny

Rádiové vlny (Radio waves) zabírají pásmo frekvencí od 3 kHz do 300 GHz, což odpovídá vlnovým délkám od 1 mm do 100 km. Jako všechny ostatní typy elektromagnetického záření se pohybují rychlostí světla (ve vakuu). V přírodě rádiové vlny vznikají od blesků a astronomických objektů. Uměle vytvořené vlny jsou používány v mobilní rádiové komunikaci, vysílání audia/video, radarech a navigačních systémech, počítačových sítích a dalších aplikacích. V medicíně se využívají u magnetické rezonance, k léčbě spánkových poruch, nebo třeba k neinvazivním chirurgickým zákrokům. Různé délky rádiových vln mají různé vlastnosti, co se týká pokrytí, odrazů od atmosféry a ohýbání. Tyto vlny byly předpovězeny a objeveny stejným způsobem jako mikrovlny. Důvodem jsou překrývající se pásma frekvencí jednotlivých záření. [18]

Dále v práci se budu zabývat především infračerveným a viditelným pásmem světla, protože tyto 2 typy se nejčastěji využívají ve vysílacích částech optonů.

2.2 Kvantová podstata optického záření

Německý fyzik Max Planck (celým jménem Max Karl Ernst Ludwig Planck) dokázal, že světelné záření může být vyzařováno nebo pohlcováno v určitých celistvých energetických kvantech o velikosti vyplývající z následující rovnice:

$$E = h \cdot c \cdot \lambda^{-1} \quad [\text{J}; \text{J.s}; \text{m.s}^{-1}; \text{m}] \quad (2.3)$$

kde h je Planckova konstanta – $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s.}$;

c je rychlost optického záření ve vakuu;

λ je vlnová délka optického záření;

E je energie optického záření.

Energie optického záření je soustředěna v částicích, které Albert Einstein pojmenoval fotony. Frekvence elektromagnetického záření u rozhlasových stanic je poměrně nízká a proto i jejich energetické kvantum je zanedbatelné. Výměna energie mezi hmotným prostředím a elektromagnetickým polem se u těchto kmitočtů jeví jako spojitá. Rentgenové záření má naopak vysokou frekvenci, kvantum má vysokou energii a při vzájemném působení hmoty a záření se tato kvanta významně projevují. Ani jedna z uvedených teorií nepopisuje úplně vlastnosti optického záření, proto se, při popisu optických jevů, používají obě. Foton má energii, která je závislá na frekvenci optického záření. Energie vzrůstá se vzrůstajícím kmitočtem. [4], [6]

Platí vztah mezi frekvencí f , rychlostí optického záření c a vlnovou délkou optického záření λ :

$$f = c \cdot \lambda^{-1} \quad [\text{Hz}; \text{m.s}^{-1}; \text{m}] \quad (2.4)$$

kde f je frekvence optického záření;

c je rychlost optického záření ve vakuu;

λ je vlnová délka optického záření.

3 FOTOELEKTRICKÝ JEV

Při vzájemném působení záření s látkou dochází k pohlcení fotonů, jejichž energie je předána částicím v látce. U optického záření jde hlavně o elektrony, které když absorbují kvanta energie, přejdou na vyšší energetickou hladinu. Pohlcování fotonů je selektivní (jen fotony o určité energii mohou být pohlcovány). [6]

Pokud mají dopadající fotony dostatečně velkou energii, může v izolátorech nebo polovodičích dojít k vybuzení elektronů do vodivostního pásu. Ten je za normálních okolností prázdný a látka vybuzením elektronů výrazně mění svou elektrickou vodivost. Vnitřní fotoelektrický jev nastane, když záření způsobí změnu vodivosti materiálu. Nazývá se vnitřní, protože při něm elektrony zůstávají vázány v objemu látky. Tohoto jevu se využívá u polovodičových detektorů optického záření. [6]

Když je energie dopadajících fotonů tak velká, že vybuzené elektrony se dostanou na tzv. hladinu vakua (už nejsou vázány k atomům látky a mohou ji opustit), nastává vnější fotoelektrický jev. Energie elektronu potřebná k překonání energetické bariéry na povrchu kovu a uvolnění z látky se nazývá výstupní práce. Energie, kterou má elektron vystupující z látky, se rovná energii absorbovaného fotonu minus výstupní práce. Pro vnější fotoelektrický jev existuje určitá mezní frekvence. Záření s menší frekvencí, než je mezní, fotoelektrický jev nevyvolá, záření s větší frekvencí to dokáže. Množství uvolněných elektronů je úměrné počtu dopadajících fotonů (intenzitě záření) a energie elektronů je úměrná frekvenci záření. Vnější fotoelektrický jev má využití u vakuových detektorů (fotonky, fotonásobiče). [4], [6]

Elektron při fotoelektrickém jevu přijme energii hf (z Planckovy rovnice $E = hf$). Ta se částečně spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu (výstupní práce A) a zbytek se přemění na kinetickou energii. Ve vztahu:

$$hf = A + E_k \quad [\text{J.s; Hz; J; J}] \quad (3.1)$$

kde A je výstupní práce elektronu

E_k je kinetická energie

Existenci mezní frekvence f_0 dopadajícího záření odpovídá uvolnění elektronu z kovu právě s nulovou kinetickou energií. Z rovnice (3.1) dostáváme (pro $E_k = 0$):

$$f_0 = \frac{A}{h} \quad [\text{Hz; J; J.s}] \quad (3.2)$$

kde f_0 je mezní frekvence dopadajícího elektromagnetického záření;

A je výstupní práce elektronu;

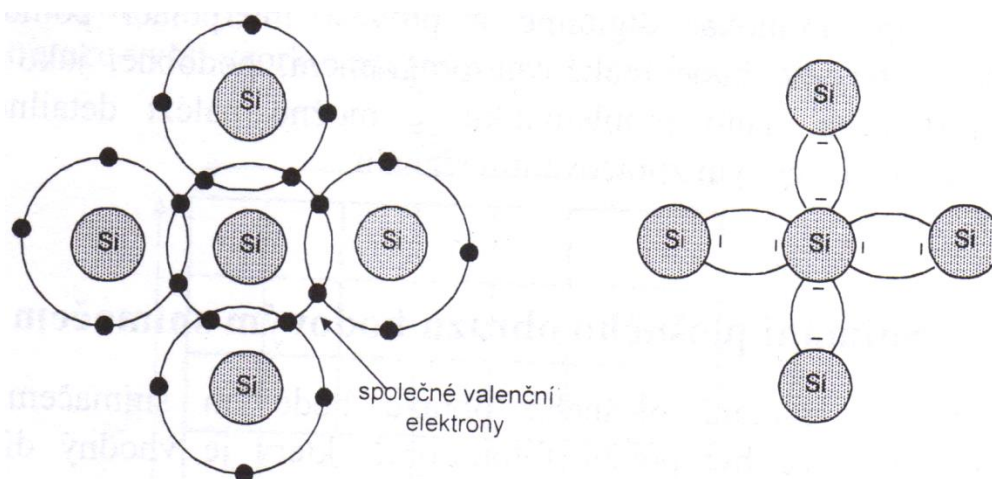
h je Planckova konstanta – $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s.}$

Kvantum záření (foton) s frekvencí menší než je f_0 nemá dostatečnou energii k uvolnění elektronu z kovu. [22]

4 POLOVODIČE

Polovodiče jsou látky s hodnotou měrného odporu někde mezi kovovými vodiči a izolanty. Vodivost polovodičů je závislá na teplotě a osvětlení. Při absolutní nule ($T = 0 \text{ K}$) jsou všechny elektrony polovodiče v nižším energetickém stavu (tzv. valenčním pásu) a žádný nemá vyšší energii. Polovodič se v tomto stavu chová jako izolant, nemá vodivost. Mezi nejvýznamnější polovodiče spadají křemík, germanium, fosfor a arsen. Mohou se z nich vyrábět polovodičové součástky, nebo mohou sloužit jako příměsi u nevlastních polovodičů. [1], [20]

Následující obrázek ukazuje vazby atomů křemíku v krystalické mřížce:



Obrázek 2: Vazby atomů křemíku [1]

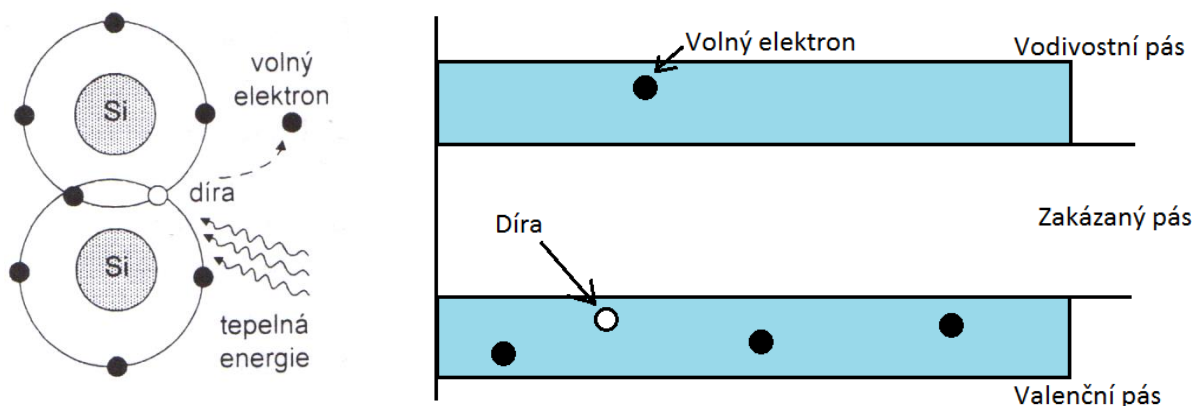
4.1 Vlastní polovodiče

Dodáním tepelné energie polovodiči může dojít k uvolnění elektronu z elektronového obalu. Ten pak přejde na vyšší energetickou hladinu a dostane se do tzv. vodivostního pásu (Obrázek 3). Valenční a vodivostní pás rozděljuje tzv. zakázaný pás. Ve struktuře materiálu neexistuje elektron, který by měl energii odpovídající této prázdné oblasti – zakázaného pásu. Při dodání energie elektronu a jeho přechodu do vodivostního pásu dojde k uvolnění elektronu z atomu. Tím dochází k ionizaci daného atomu křemíku. Na místě uvolněného elektronu z elektronového obalu zůstane prázdné místo (vakance). To zůstává ve valenčním pásu a nazývá se díra. Ionizovaný atom křemíku mající ve svém elektronovém obalu díru představuje místo elementárního kladného náboje. [1], [20]

Volné elektrony (ve vodivostním pásu) se mohou v objemu polovodiče volně pohybovat. Podobně se pohybují i kladné díry (ve valenčním pásu). Ionizovaný atom přebírá do svého

elektronového obalu chybějící elektron z vedlejšího (původně elektricky neutrálního) atomu křemíku. Ten se ztrátou elektronu ionizuje a kvůli díře v elektronovém obalu je nositelem kladného náboje. Tepelný pohyb elektronů a děr v materiálu je náhodný a neuspořádaný, energie pro tento pohyb je získávána z tepelných kmitů krystalické mřížky. [1], [3]

Generace páru elektron – díra, princip a pásový model:



Obrázek 3: Znázornění vlastní vodivosti u polovodiče [1]

Když se přivede na polovodičový materiál vnější napětí, začne elektrické pole působit silou na volné elektrony a díry, to způsobí jejich unášení. Výsledný pohyb nosičů se skládá z tohoto unášení a neuspořádaného pohybu. Pokud se v polovodiči vyskytují pouze tepelně generované volné nosiče náboje a elektrický proud je tvořen jejich uspořádaným pohybem (působením vnějšího elektrického pole), nazýváme tento stav vlastní (intrinsická) vodivost. Vodivost vlastního polovodiče je při běžné pokojové teplotě poměrně nízká. [1], [3]

Generovaný pár elektron–díra mohou opět rekombinovat, pokud se setkají. Volný elektron je pak zachycen do elektronového obalu ionizovaného atomu, který původně elektron ztratil. Tím přejde do stavu s nižší energií a nyní je tedy v energetickém pásovém modelu ve valenčním pásu. Rozdíl energie elektronu (ve vodivostním a valenčním pásu) se uvolní ve formě zářivé energie (fotonu), nebo nezářivé energie (fononu). [1], [3]

U zcela čistého polovodičového materiálu bez příměsí je koncentrace volných elektronů i kladných děr stejná. Nejmenší vodivost má čistý křemík s ideální krystalickou strukturou bez poruch. To je však jen teoretický stav, protože v praxi se vždy do určité míry objevují poruchy krystalické mřížky a příměsové nečistoty, které způsobují generaci volných nosičů a tím pádem snížení měrného odporu. [1], [3]

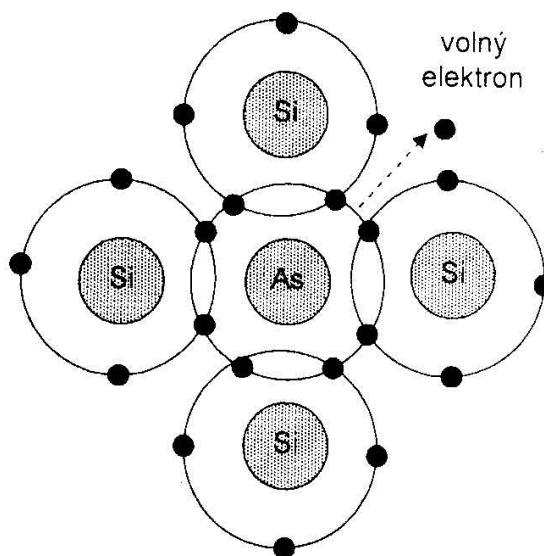
4.2 Nevlastní polovodiče

Vodivost polovodiče se dá zvýšit přidáním atomů příměsí. Tento typ vodivosti se nazývá nevlastní (extrinsická). [1]

4.2.1 Polovodič typu N

Pokud křemíku dodáme prvek z pátého sloupce periodické tabulky prvků (např. arzén, fosfor, nebo antimon), který má 5 valenčních elektronů, vytvoříme nevlastní polovodič. Čtyři valenční elektrony pětimocného prvku tvoří pevnou kovalentní vazbu se čtyřmi okolními atomy křemíku. Pátý elektron není pevně vázán kovalentní vazbou na žádný okolní atom. Proto k jeho uvolnění stačí relativně nízká ionizační energie. Po dodání této energie se příměsový atom ionizuje a ztratí elektron. Ten se uvolní a přejde do vodivostního pásu. Při působení vnějšího elektrického pole se volné elektrony pohybují a představují tak elektrický proud. [1], [20]

Znázornění vzniku volného elektronu:



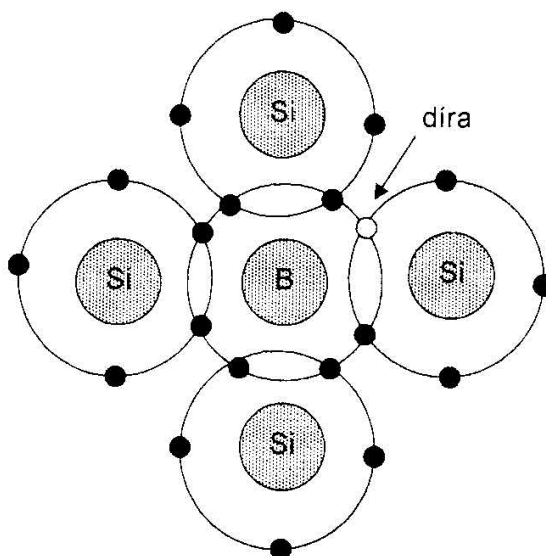
Obrázek 4: Vznik volného elektronu [1]

Atom příměsí se nazývá donor, protože daroval elektron. Donory jsou při pokojové teplotě plně ionizované a každá z nich přispívá k celkové koncentraci volných vodičů jedním elektronem. U takto dotovaného křemíku jsou majoritními nosiči elektrického náboje elektrony, které představují negativní náboj. Proto je označován jako polovodič typu N. Minoritními nosiči elektrického náboje jsou zde tepelně generované díry, které se podílí na celkové vodivosti. [1], [3]

4.2.2 Polovodič typu P

Při umístění příměsi ze třetího sloupce periodické tabulky prvků (např. bór, hliník, nebo gallium) do krystalové struktury křemíku je příměsový atom vázán pouze třemi elektrony. Jedna z kovalentních vazeb mezi atomy křemíku a příměsí je prázdná – kladná díra. Po dodání malé ionizační energie se na toto místo může přesunout valenční elektron, který do té doby tvořil kovalentní vazbu v mřížce mezi jinými atomy křemíku. Po tomto přesunutém elektronu zůstane opět prázdné místo – kladná díra. Díra se tímto způsobem může pohybovat krystalem polovodiče. [1], [20]

Znázornění vzniku díry:



Obrázek 5: Vznik kladné díry [1]

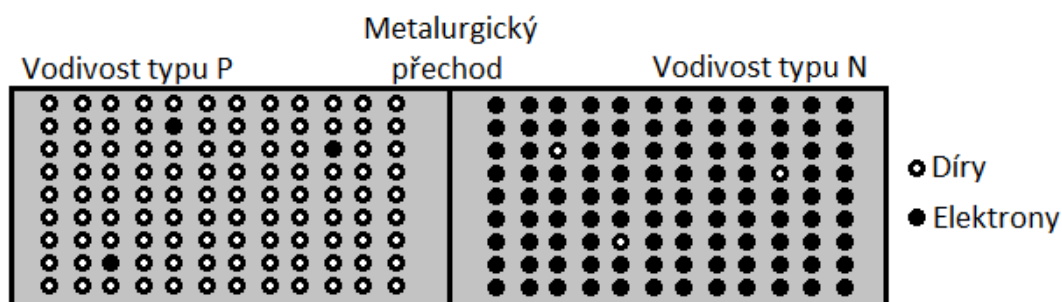
Atomy těchto příměsí se nazývají akceptory, protože přijímají elektron. Polovodič typu P je takový, kde koncentrace akceptorů převažuje nad koncentrací donorů. Majoritními nosiči elektrického proudu jsou díry, minoritními pak elektrony. Polovodiče typu P a N jsou sami o sobě elektricky neutrální, protože volné kladné i záporné náboje jsou v rovnováze. Označení P, nebo N pouze označuje, jaké částice způsobují přenos elektrického proudu. Nevlastní (extrinsická) vodivost je vždy vyšší než vlastní (intrinsická) vodivost materiálu. [1], [3]

Při velmi vysoké koncentraci donorů, nebo akceptorů se zvyšuje měrná vodivost materiálu. Ta se pak blíží měrné vodivosti vodičů. N⁺ označuje polovodič s vysokou koncentrací donorů, P⁺ pak vysokou koncentrací akceptorů. Využívají se tam, kde je potřeba zajistit vysokou vodivost. [1], [3]

4.3 PN přechod

PN přechod může tvořit křemíková destička, která je na jedné straně tvořena polovodičem typu N a na druhé straně polovodičem typu P. Rozhraní, kde se kvůli různým příměsím mění typ vodivosti z N na P, se nazývá metalurgický PN přechod. Vrstva P obsahuje jako majoritní nosiče elektrického náboje díry, vyskytuje se zde však také malé množství tepelně generovaných elektronů jako minoritních nosičů. V oblasti N s elektrony jako majoritními nosiči elektrického náboje podobně existují v malé koncentraci tepelně generované díry jako minoritní nosiče. PN přechod se dá také vytvořit tím, že na základní materiál (substrát) např. s vodivostí N se vytvoří další vrstva křemíku s opačným typem vodivosti, zde P. [1], [3]

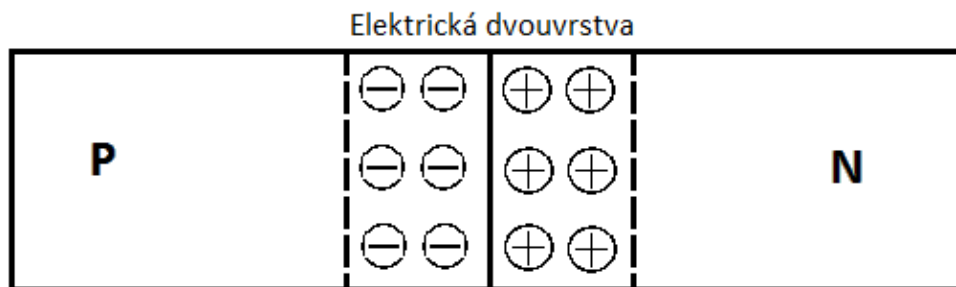
Grafické znázornění PN přechodu:



Obrázek 6: Přechod mezi polovodičovými materiály s různým typem vodivosti [1]

Dva odlišné typy majoritních nosičů na obou stranách PN přechodu mají snahu dosáhnout termodynamické rovnováhy, to znamená vyrovnání koncentrací elektronů a děr na obou stranách přechodu. Tím dochází k difuzi elektronů z oblasti N do P a naopak difuzi děr z oblasti P do N. Tyto elektrony postupující z oblasti N do P za sebou zanechávají ionizované kladně nabitě donory. Obdobně difundující díry z oblasti P do N za sebou zanechávají ionizované záporně nabitě akceptory. Takto vznikne oblast PN přechodu, kde není dominantní elektronová, ani děrová vodivost. Difuze elektronů a děr má za následek vznik elektrické dvouvrstvy (ionizovaných nepohyblivých donorů a akceptorů na obou stranách PN přechodu). Elektrické pole dvouvrstvy odsaje z oblasti PN přechodu volné minoritní nosiče elektrického náboje (díry do oblasti P, elektrony do oblasti N). [1], [3]

Znázornění ochuzené vrstvy:



Obrázek 7: Oblast prostorového náboje [1]

Dle obrázku 7 je vznikne ochuzená vrstva (oblast prostorového náboje), kde se v rovnovážném stavu nenachází žádné volné nosiče. Při ustálení rovnováhy na PN přechodu je difuzní proud přes PN přechod kompenzován stejně velkým driftovým proudem v opačném směru. Elektrické pole v oblasti PN přechodu, vyvolané elektrickou dvouvrstvou, způsobuje potenciálový rozdíl, který se vyjadřuje jako tzv. difuzní napětí. [1]

5 OPTOELEKTRONICKÝ VAZEBNÍ ČLEN

Optoelektrický vazební člen je označení pro elektronické součástky, kde je vnitřní vazba mezi elektrickým vstupním a výstupním signálem obstarána pomocí světelného záření (nejčastěji v oblasti infračerveného spektra). [4]

Schématická značka optočlenu (s tranzistorem na výstupu):



Obrázek 8: Schématická značka optočlenu [21]

Na Obrázku 8 je vidět, že se optočlen skládá z optronové dvojice. Tu tvoří zdroj a detektor optického záření v jednom pouzdře. Ze zdroje optického záření se generuje světelný signál, který je závislý na velikosti vstupního elektrického signálu. Ten je přijímán detektorem optického záření, převáděn zpět na elektrický signál a případně předán na vstup navazujícího elektronického obvodu, nebo součástky. Mezi zdrojem a detektorem se nenachází vodivé propojení, jsou galvanicky oddělené. [4]

Proto se využívají pro galvanické oddělení dvou různých elektronických obvodů, nebo k oddělení elektronického zařízení od vnějšího prostředí. Optrony se také používají pro přenosy analogových (střídavých i stejnosměrných) nebo datových signálů. Nabízí vysoký izolační odpor mezi vstupem a výstupem. Pro přenos signálu na velkou vzdálenost se využívá optických vláken, které nabízí malý útlum a vysokou šumovou odolnost. Spojení jednoho či více těchto vláken s povrchovou a mechanickou ochranou vytvoří optický kabel. Přenos se uskutečňuje v přenosových oknech 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Útlum vlákna klesá s rostoucí hodnotou vlnové délky, cena potřebných optoprvků k provedení přenosu však roste. [3], [4]

5.1 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření využívají elektroluminiscenci. To je emise záření látkami, kdy elektricky vybuzené nosiče náboje odevzdávají svojí energii ve formě fotonů. U polovodičů je toho dosaženo injekcí nosičů náboje na PN přechodu. Pokud dochází ke spontánní emisi, jde o zdroje nekoherentního záření. U převažující stimulované emise se

mluví o koherentním záření. Mezi nejvýznamnější zdroje nekoherentního záření dnes spadají LED diody, pro generaci koherentního záření se využívají laserové zdroje. [3]

5.1.1 Diody LED

Název vznikl zkrácením anglického Light Emitting Diode, což znamená světlo vyzařující dioda. Po přiložení napětí v propustném směru diody dojde k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Dochází k rekombinaci elektronů a děr, vlivem vnějšího elektrického pole přechází elektrony na vyšší energetickou hladinu. Tam zůstanou po různě dlouhou dobu a pak ji opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum. Jde o spontánní emisi záření, protože tak činí samy od sebe. Kvantum energie, které se uvolní při rekombinaci každého páru elektron – díra, se může vyzářit mimo krystal, nebo být absorbováno v mříži, což se projeví zvýšením teploty krystalu. To závisí na typu materiálu. Pravděpodobnost zářivé rekombinace se zvyšuje s rostoucí šířkou zakázaného pásu. Optické záření opouští destičku ve všech směrech, které jsou pro něj průhledné. [2], [4]

Schématická značka LED:



Obrázek 9: Schématická značka diody LED [21]

LED diody mohou vyzařovat optické záření v ultrafialové, viditelné, nebo infračervené oblasti. Výslednou barvu určuje použitý materiál, jeho poměr a provedené dotace. Nejčastěji se používají sloučeniny prvků ze třetí a páté skupiny periodické soustavy prvků, např. GaP, GaAsP, GaAlAs, GaN, InGaN apod. Speciálními případy jsou RGB a bílé LED diody. Mají více přechodů z různých materiálů a více (až 6) vývodů. Mohou mít společné katody a samostatně vyvedené anody, nebo naopak společné anody a samostatně vyvedené katody. RGB jsou diody, které mohou vyzařovat červenou, zelenou, nebo modrou barvu. Pro bílé světlo se využívá kombinace základních barev, nebo kombinace LED diody a luminoforu. [2], [4]

Svítivost LED diod se udává pro určitý proud diodou v přímém směru (v mcd). Svítivost je také závislá na mnoha faktorech jako typ přechodu, použitý materiál, provedení pouzdra apod. Někteří výrobci používají pro své diody označení jako superjasné či ultrajasně, ale neexistuje standard a tak jde pouze o subjektivní značení. Svítivost se většinou udává pro

proud $I_F = 20$ mA. Standardní diody mají svítivost v rozsahu 3 až 30 mcd / 20 mA. Diody se zvýšenou svítivostí pak 100 až 1000 mcd / 20 mA. Supersvítivé diody dosahují svítivosti větší než 1000 mcd / 20 mA. [4]

Následující tabulka ukazuje barvu a svítivost LED diod v závislosti na materiálu (u bílých LED se udává teplota absolutně černého tělesa se shodným spektrem):

Materiál	Barva	Vlnová délka [nm]	Svítivost [mcd] při $I_F = 20$ mA
GaAlAs/GaAs	Infračervená	940	
GaAlAs/GaAs	Infračervená	880	
GaAlAs/GaAs	Červená	660	200 při $I_F = 50$ mA
InGaAlP	Červená	633	3500
InGaAlP	Oranžová	612	6500
InGaAlP	Žlutá	592	7000
GaAsP/GaP	Žlutá	585	100
GaP	Zelená	555	80
SiC/GaN	Zelená	525	10000
SiC/GaN	Modrá	470	3000
SiC/GaN	Bílá	4500 K	2000
SiC/GaN	Bílá	8000 K	6000

Tabulka 2: Barvy a svítivost LED diod [3], [4]

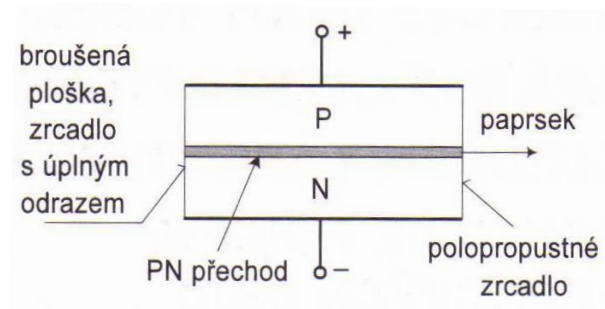
5.1.2 Laserové diody

Název laser vznikl z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což se dá přeložit jako zesílení optického záření pomocí stimulované (vynucené) emise záření. Laserové optické záření se vyznačuje monochromatickostí (jednobarevností), je koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Koherentní znamená, že se fotony pohybují jedním směrem a jsou v průřezu velmi rovnoměrně rozmístěny. [4]

Oproti LED diodám se u laserových diod využívá stimulované emise optického záření. To znamená, že když dopadne do soustavy na atom kvantum energie, která je rovna energetickému rozdílu uvažovaných hladin, dopadající kvantum není pohlceno. Vzniknou dvě kvanta světelné energie – optické záření o dvojnásobné energii. Při běžných podmínkách (termodynamické rovnováze) probíhá v látce, do které je přiváděna energie, spontánní i stimulovaná emise. [4]

U malovýkonové homogenní laserové diody se koherence dosahuje použitím optického rezonátoru, který zajišťuje selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitým kmitočtem a definovanou fází. Tak vzniká stojaté vlnění a stupeň koherence závisí na kvalitě rezonátoru. Rezonátor je v tomto případě soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel obdélníkového tvaru v určité vzdálenosti proti sobě. [4]

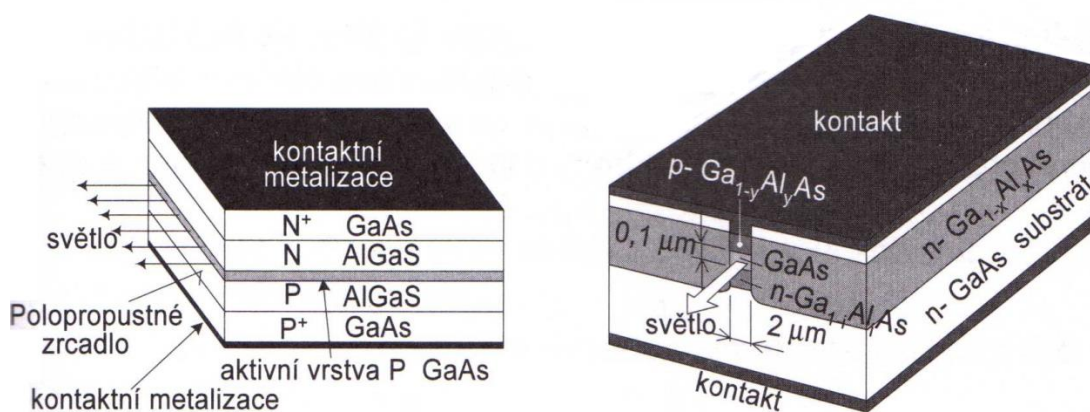
Princip naznačen na následujícím obrázku:



Obrázek 10: Laserová dioda s homogenním přechodem [4]

Pro laserové diody s vyšším výkonem se používá dvojitá heterostruktura. To znamená, že se mezi vrstvy AlGaAs vloží GaAs. Tím vzniknou dva PN přechody mezi různými materiály. [4]

Konstrukční řešení této diody umožňuje vysílání pouze úzkého svazku paprsků, znázorněno na následujícím obrázku:



Obrázek 11: Princip heterostruktury a uspořádání pro úzký svazek paprsků [4]

Světelný paprsek vzniklý v laserové diodě má téměř koherentní vlastnosti. Optické záření z laserové diody obsahuje úzké spektrum kmitočtů. Typicky okolo 1 nm (od desetin do jednotek). I když je toto spektrum velmi úzké, není záření z laserových diod dokonale monochromatické (jako např. u helium-neonových laserů). Připojíme-li laserovou diodu ke

zdroji napětí a budeme zvyšovat proud v propustném směru I_F , bude se dioda zpočátku chovat jako LED (vykazovat spontánní emisi). Bude mít široké, nemonochromatické optické záření s malou intenzitou. Pokud proud překročí prahovou hodnotu I_{th} (threshold-práh), přejde dioda do stavu stimulované emise. Proto je nutné, pro činnost diody, aby tekla proud vyšší než I_{th} . Intenzita optického záření se prudce zvýší a spektrální charakteristika se zúží. Velikost prahového proudu závisí na provedení diody. Přesáhne-li proud I_F určitou velikost, dojde ke stavu saturace, kdy se už intenzita záření nezvyšuje i přes rostoucí proud. [4]

5.1.3 Termické zdroje optického záření

U těchto zdrojů je důležitá kromě intenzity vyzařování také dobrá účinnost, to znamená, aby co největší část jejich záření připadala na optické záření, nebo záření o vlnových délkách, které se dají využít při aplikaci. Spektrální závislost lze řídit změnou teploty zdroje. Při zvyšování teploty se posouvají vlnové délky, při nichž těleso vyzařuje nejintenzivněji, k menším hodnotám. Tak lze posunout maximum vyzařování např. z infračervené do viditelné oblasti optického záření. [6], [23]

Nejznámějším termickým zdrojem světla je klasická žárovka, kde se vyzařování dosahuje rozžhavením wolframového vlákna umístěného v neutrálním prostředí (vakuum, nebo inertní plyn). Vyšší intenzitu vyzařování nabízí halogenové žárovky, kde je prostředí voleno tak, aby se vlákno dalo rozžhavit na vyšší teplotu. [6], [23]

Tyto zdroje záření se používají tam, kde je potřeba osvětlit velké plochy a nevyužije se monochromaticnost záření. Mají nízkou účinnost kvůli široké spektrální křivce vyzařování. Většina záření, hlavně záření tepelné, se nevyužije. [6]

5.1.4 Luminiscenční zdroje optického záření

U těchto zdrojů záření se využívá luminiscence plynů nebo pevných látek, která vzniká např. při průchodu elektrického proudu. Látky, ve kterých luminiscence vzniká, se označují luminofory. Látky, které mají spojitě spektrum energií, jako kovy, luminiscenci nevykazují. [6], [23]

Při luminiscenci se nejdříve vybudí částice (iont, molekula) ze základního elektrického stavu do vybuzeného. Dále dojde k přenosu excitační energie na jinou částici, nebo přechodu na nižší energetickou hladinu a pak k vyzaření luminiscenčního kvanta energie. Luminiscence se označuje jako studené světlo, protože nesouvisí s teplotou a dochází k ní

i při nízkých teplotách. Podle formy energie, která luminiscenci vybudí, se dělí na fotoluminiscenci, radioluminiscenci, katodoluminiscenci a chemiluminiscenci. [6], [23]

Luminiscence se využívá v mnoha aplikacích. Luminiscence buzené v parách kovů a vzácných plynů při sníženém tlaku se využívá při konstrukci osvětlovacích těles a plynových laserů. Luminiscence kapalin se využívá při konstrukci barvivových laserů, nebo ve scintilačních detektorech. Luminofory krystalické se využívají v televizních obrazovkách. [23]

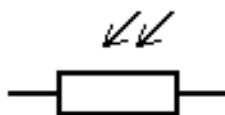
5.2 Detektory optického záření

Detektory optického záření slouží k přeměně optického záření na elektrický signál. Podle typu použití pak pracují v různých oblastech spektra od ultrafialové do infračervené. Detektory se rozdělují na fotovodivostní, fotovoltaiické a fotoemisní. U fotovodivostních dopadající záření zvyšuje měrnou elektrickou vodivost polovodiče (fotorezistor). U fotovoltaiických dopadající záření generuje napětí na elektrodách součástky (fotodioda). U fotoemisních dopadající záření způsobuje emisi elektronů z fotocitlivého emitéru do vakua (fotonásobič). [3], [4]

5.2.1 Fotorezistor

Fotorezistor je polovodičový jednobran bez PN přechodu. Pohlcované optické záření u něho vyvolává, vlivem fotoelektrického jevu, změnu hodnoty elektrické vodivosti. Fotorezistor využívá vlastní (intrinsické) vodivosti, vyrábí se tedy z nedotovaného polovodičového materiálu. Jsou konstruovány pro velký poměr mezi odporem za tmy a odporem při osvětlení. [4]

Schématická značka:



Obrázek 12: Schématická značka fotorezistoru [21]

Citlivost fotorezistoru je definována jako poměr mezi intenzitou dopadajícího optického záření a jeho odporem. Citlivost na určitou vlnovou délku optického záření závisí na

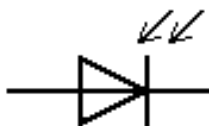
materiálu, ze kterého je fotorezistor vyroben. Například fotorezistory ze sloučeniny CdS mají největší citlivost v oblasti vlnových délek viditelného světla. Obecně mezi používané materiály patří sloučeniny na bázi kadmia (např. CdS, CdSe), olova (např. PbS, PbSe), india (např. InSb, InAs) a slitiny teluru. [4]

Mezi výhody použití fotorezistorů patří nízká cena, snadné použití, poměrně velká citlivost při velkém rozsahu odporů, poměr odporu osvětleného a neosvětleného fotorezistoru, pracují se stejnosměrným i střídavým napětím. Nevýhody spočívají v poměrně dlouhé době odezvy, jsou teplotně závislé (závislost se mění s intenzitou osvětlení), odpor se mění s dobou osvětlení (stárnutí při provozu). [4]

5.2.2 Fotodioda

Funguje jako fotocitlivá součástka díky upravenému PN přechodu tak, aby do něj mohlo dopadat optické záření. Při konstrukci fotodiod se hojně využívají materiály jako křemík (Si), gallium arsenid (GaAs), antimonid india (InSb), arsenid india (InAs) a další. Každý z těchto materiálů pohlcuje optické záření v různém rozsahu (např. křemík 250 až 1100 nm, gallium arsenid 800 až 2000 nm). [4]

Schématická značka:



Obrázek 13: Schématická značka fotodiody [21]

Tloušťka ochuzené vrstvy, která vzniká po vytvoření PN přechodu důsledkem difuze děr a elektronů, má velký význam pro činnost fotodiody. Pokud nedopadá na polovodičový materiál optické záření, dochází k excitaci elektronů do vodivostního pásu pouze díky tepelné energii. Po osvětlení získají elektrony vyšší energii. Pokud je energie fotonu dostatečně velká pro překonání zakázaného pásu, dojde k přechodu elektronu do vodivostního pásu. Na svém původním místě zanechá díru, tak vznikne pár elektron-díra. Pohlcování optického záření je závislé na jeho vlnové délce. Záření s krátkou vlnovou délkou je absorbováno v tenké povrchové vrstvě diody (tloušťka do 1 μm). Pro záření s větší vlnovou délkou se však polovodičový materiál stává průhledným (u křemíku je to pro délky větší než 120 nm). [4], [6]

Citlivost fotodiody na optické záření se udává jako poměr výstupního proudu fotodiody a přijímané světelné energie, vyjádřeno vztahem:

$$R = \frac{I_f}{P} \quad [A \cdot W^{-1}; A; W] \quad (5.1)$$

kde $I_f [A]$ je výstupní proud fotodiody;

$P [W]$ je přijímaná světelná energie;

$R [A \cdot W^{-1}]$ je citlivost fotodiody.

Pro malou intenzitu optického záření je citlivost fotodiody omezena velikostí šumových napětí, pro velkou intenzitu saturační úrovní, nad kterou mají jakékoliv změny osvětlení jen malý vliv na proud protékající fotodiodou. Fotodiody se používá v různých typech optoelektronických senzorů, např. pro kontrolu materiálů, měření vlhkosti, znečištění, aplikace v biomedicíně a chemii. [4]

5.2.3 Fototranzistor

Je to tranzistor vyrobený tak, aby bylo možné intenzitou dopadajícího záření řídit průchod nosičů náboje. Existuje ve dvou základních provedeních. Fototranzistor bez bázevého vývodu (používá se častěji) a fototranzistor s vyvedenouází (ten lze řídit nejen intenzitou dopadajícího optického záření, ale také elektrickým signálem přivedeným do báze). Jako klasické tranzistory se i tyto vyrábí ve variantách NPN a PNP. [4], [6]

Schématická značka fototranzistoru NPN bez vyvedené báze:



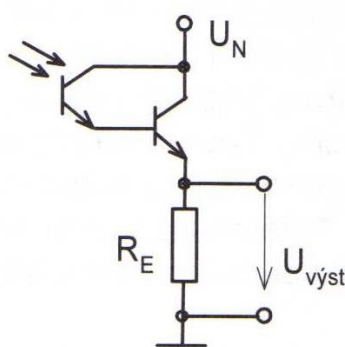
Obrázek 14: Schématická značka fototranzistoru [21]

Optické záření, které je pohlcováno v oblasti báze, generuje páry elektron-díra, které jsou oddělovány kolektorovým a emitorovým přechodem. To způsobí změnu potenciálu kolektorového a emitorového přechodu. Změna napětí emitorového přechodu (polarizovaného v propustném směru) způsobí poměrně větší změnu kolektorového proudu. Nosiče náboje vyslané z přechodu emitor-báze získají v oblasti báze takovou rychlost, až se na své volné dráze dostávají do blízkosti kolektorového přechodu. Pole

v ochuzené vrstvě přechodu je pak vtahuje přes kolektorový přechod a dochází k zesilování fotoelektrického proudu. [4], [6]

Fototranzistor se také využívá v tzv. Darlingtonově zapojení, hlavně u aplikací vyžadujících velkou citlivost. Fototranzistory v tomto zapojení mají nižší mezní kmitočet a jejich použití je většinou omezeno na spínací aplikace. V porovnání s fotodiodami jsou fototranzistory citlivější na optické záření, protože vykazují zesilovací činitel. Proto se používají v širokém spektru aplikací. [4]

Schéma Darlingtonova zapojení:



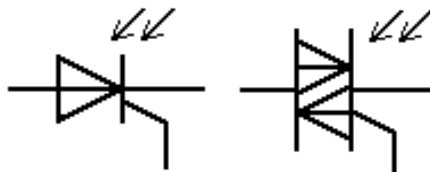
Obrázek 15: Fototranzistor v Darlingtonově zapojení [4]

Pro fototranzistory je charakteristická nízká cena, zesílení 100 a více, středně rychlá odezva na změnu osvětlení, velké množství provedení, použitelné s velkým množstvím různých světelných zdrojů pracujících ve viditelné nebo NIR (Near Infra Red) oblasti. [4]

5.2.4 Fototyristor a fototriak

Jsou to vícevrstvé (čtyřvrstvé - PNPN) polovodičové spínací součástky. Sepnutí z blovaného stavu je řízeno pomocí optického záření dopadajícího na řídicí přechod. Vypnutí fototyristoru a fototriaku funguje stejně jako u normálních tyristorů a triaků. Těmito součástkami se dají přímo spínat elektrické zátěže pomocí světelného signálu. [4], [6]

Schématické značky fototyristoru PNPN (vlevo) a fototriaku (vpravo):



Obrázek 16: Schématické značky fototyristoru a fototriaku [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝBĚR VHODNÝCH OPTOELEKTRONICKÝCH VAZEBNÍCH ČLENŮ

Cílem praktické části této práce je návrh a následná realizace měřicí úlohy pro předmět Senzory k výuce na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Tento předmět se zaměřuje na výuku o různých typech senzorů, které se používají v různých odvětvích průmyslu. Kvůli obsáhlosti látky a pro lepší pochopení dané problematiky se využívá laboratoří, kde si studenti vyzkouší v praxi principy a chování jednotlivých senzorů. Některé úlohy však bylo potřeba vyrobit, protože chyběly. Vývoj v této oblasti postupuje rychle dopředu stejně jako v ostatních odvětvích elektroniky, a tak bylo hlavním cílem vytvořit modulární systém, který umožňuje rychlé a snadné rozdělení či složení, nebo výměnu optoelektronických součástek v případě dalšího vývoje, nebo jejich destrukce. Další podmínkou bylo dodržet jednotvárný vzhled a způsob konstrukce základny u všech nově vznikajících úloh.

Na trhu je v dnešní době nepřeberné množství optočlenů, které se liší v mnoha ohledech jako je typ vnitřního zapojení, typ pouzdrění, elektrické vlastnosti, počet vstupů a výstupů atd. Mnoho výrobců se angažuje ve výrobě optoelektrických senzorů. Po dohodě s vedoucím práce jsme vybrali pro účely úlohy čtyři typy optočlenů, které se liší svými vlastnostmi, vnitřním zapojením a v neposlední řadě také výrobcem. Nebylo totiž účelem používat výrobky jedné firmy, ale šlo o srovnání vlastností různých optočlenů. Přihlíželo se také k ceně, dostupnosti a konstrukci jednotlivých výrobků.

6.1 Důležité parametry optoelektronických vazebních členů

6.1.1 Obecné parametry

CTR (Current Transfer Ratio) – Přenosový poměr – poměr kolektorového proudu fototranzistoru k propustnému proudu diody LED. Vyjádřeno vztahem:

$$\text{CTR} = \frac{I_C}{I_F} \quad [-; A; A]$$

kde I_C je proud protékající kolektorem fototranzistoru

I_F je propustný proud diody LED

Udává se pro určitý proud LED diody I_F a kolektorové napětí fototranzistoru U_{CE} . Pokud je detektorem optického záření fotodioda, bude vztah pro přenosový poměr vypadat následovně:

$$CTR = \frac{I_{FOT}}{I_F} \quad [-; A; A]$$

kde I_{FOT} je proud protékající fotodiodou

Např. $CTR = 50 \%$ při $I_F = 1 \text{ mA}$, $U_{CE} = 5 \text{ V}$ znamená, že výstupní kolektorový proud $I_C = 0,5 \text{ mA}$.

U_{IORM} (U_{ISO}) – Izolační napětí vstup – výstup – maximální napětí, které se může objevit mezi vstupní a výstupní svorkou optronu, aniž by došlo k průrazu. Velikost tohoto napětí je závislá na různých faktorech, jako je vzdálenost kontaktů, rozměry, vzdálenost mezi přijímací a vysílací částí optočlenu, množství nečistot, materiál atd. Např. $U_{IORM} = 5 \text{ kV}$.

R_{IO} – Izolační odpor mezi vstupními a výstupními svorkami – je to odpor mezi vstupními a výstupními svorkami za určitých podmínek. Např. $R_{IO} = 10^{12} \Omega$ při $U_{IO} = 500 \text{ V}$ a $t = 20^\circ\text{C}$.

C_{IO} – Kapacita optronu – označuje kapacitu mezi vstupními a výstupními svorkami při zvoleném kmitočtu. Např. $C_{IO} = 1 \text{ pF}$ při $f = 1 \text{ MHz}$.

t_{ON}/t_{OFF} – Doba sepnutí/rozepnutí (náběhu/doběhu) – je to doba odezvy na jednotkový vstupní impuls. Např. $t_{ON}, t_{OFF} = 10 \mu\text{s}$ při $I_C = 2 \text{ mA}$, $R_C = 100 \Omega$, $U_N = 10 \text{ V}$. Tato doba se zvětšuje při použití většího zatěžovacího rezistoru.

t_{amb} – Rozsah provozních teplot – rozsah teplot ve kterém jsou deklarované hodnoty optronu zaručené výrobcem. Např. -50°C až 90°C . [4]

6.1.2 Parametry udávané pro vstupní část optočlenu

I_F – Proud v propustném směru – trvalý proud, který může protékat diodou LED. Např. $I_F = 50 \text{ mA}$.

I_{FSM} – Špičkový proud v propustném směru – je to velikost proudového impulsu, který projde diodou LED, aniž by došlo k jejímu zničení. Např. $I_{FSM} = 1 \text{ A}$, šířka impulsu $t_i = 100 \mu\text{s}$.

U_F – Napětí v propustném směru – udává se pro určitý proud I_F . Např. $U_F = 1,3 \text{ V}$ při $I_F = 10 \text{ mA}$.

U_R – Napětí v závěrném směru – udává napětí, které je možné připojit (v závěrném směru) k diodě LED a přitom nedojde ke zhoršení jejích parametrů. Např. $U_R = 5 \text{ V}$. [4]

6.1.3 Parametry udávané pro výstupní část optočlenu

U_{CEO} – Průrazné napětí kolektor-emitor. Např. $U_{CEO} = 30 \text{ V}$ při $I_C = 1 \text{ mA}$.

U_{ECO} - Průrazné napětí emitor-kolektor s nezapojenou bází. Např. $U_{ECO} = 7 \text{ V}$ při $I_E = 100 \text{ mA}$.

U_{CEsat} – Saturační napětí kolektor-emitor – udává se pro určitou velikost kolektorového proudu a proudu diody LED. Např. $U_{CEsat} \leq 0,4 \text{ V}$ při $I_C = 1 \text{ mA}$, $I_F = 5 \text{ mA}$.

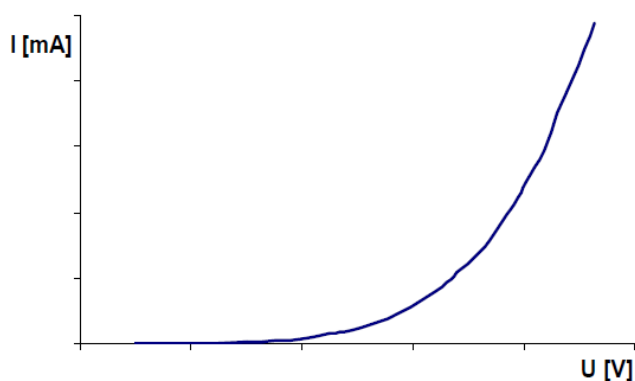
C_{CE} – Kapacita kolektor-emitor. Např. $C_{CE} = 5 \text{ pF}$ při $U_{CE} = 0 \text{ V}$. [4]

6.1.4 Statické vlastnosti optoelektronických vazebních členů

Statické vlastnosti optoelektronických vazebních členů určuje jejich statická přenosová charakteristika, která je nelineární u všech variant optočlenů, hlavně při malých proudech I_F . Statická charakteristika vyjadřuje závislost výstupního signálu na vstupním signálu v jejich ustálených stavech, tj. po doznění všech přechodových jevů. Pokud má statická charakteristika přímkový průběh, je příslušné zařízení lineární, což se považuje za ideální stav. Pokud nemá, jde o nelineární součástku. Matematicky zapsána ideální statická charakteristika vypadá $y = k.x + q$. [6], [28]

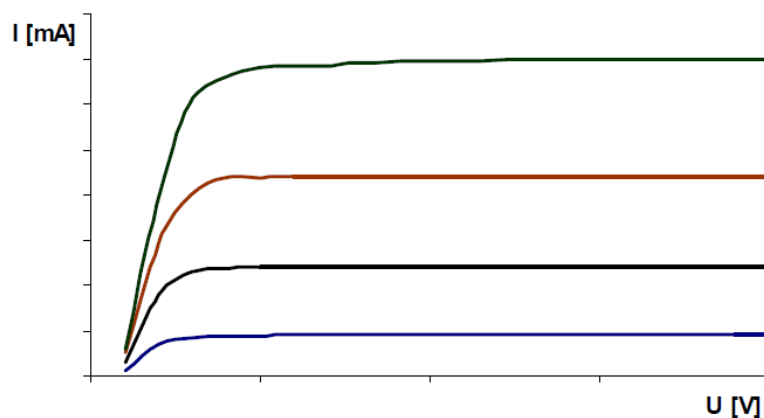
Hlavní příčinou nelinearity je fyzikální princip nebo nedokonalý výrobní postup. U optočlenů je to nelineární závislost intenzity světelného záření LED diody na proudu v propustném směru. [6], [28]

V rámci laboratorních měření pro ověření statických vlastností optočlenů se bude zjišťovat vstupní charakteristika, výstupní charakteristika a převodová charakteristika. Vstupní charakteristika označuje závislost vstupního proudu na vstupním napětí. Ideální průběh viz následující obrázek.



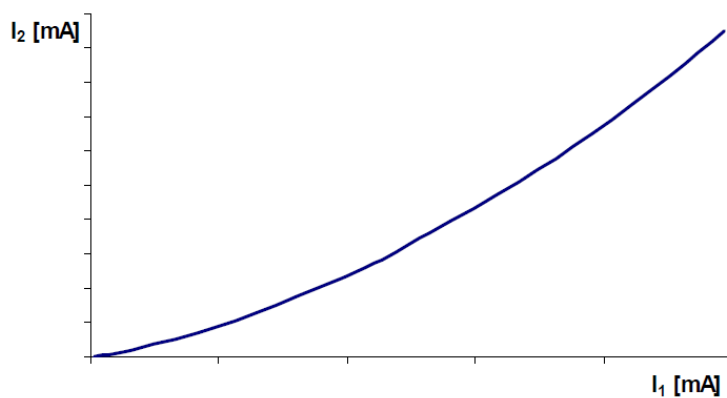
Obrázek 17: Ideální průběh vstupní charakteristiky [29]

Výstupní charakteristika je závislost proudu protékajícího kolektorem na napětí mezi kolektorem a emitorem.



Obrázek 18: Ideální průběh výstupní charakteristiky [29]

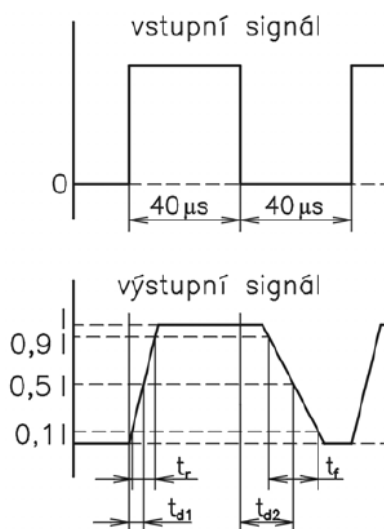
Závislost mezi vstupním proudem protékajícím luminiscenční diodou a výstupním kolektorovým proudem se nazývá převodová charakteristika.



Obrázek 19: Ideální průběh převodové charakteristiky [29]

6.1.5 Dynamické vlastnosti optoelektronických vazebních členů

Dynamické vlastnosti optoelektronických vazebních členů určují mezní frekvence a spínací doby při použití v impulsním režimu (doba náběhu a doba doběhu). Tyto doby jsou určeny časem potřebným k nárůstu nebo poklesu výstupního signálu z 10 % na 90 % konečné hodnoty. Graficky znázorněno:



Obrázek 20: Průběh obdélníkového signálu na vstupu a výstupu [29]

LED diody mají spínací doby v řádu nanosekund, proto dynamické vlastnosti určuje přijímač optického zařízení. Přijímače využívající fotodiodu mají krátké spínací doby, nevýhodou jsou však nízké hodnoty proudového přenosu. Fototranzistory mají naopak větší proudový přenos, ale spínací doby jsou negativně ovlivněny nežádoucí kapacitou mezi bází a kolektorem, která působí jako zpětná vazba. [6]

Stárnutí optoelektronických vazebních členů se projevuje hlavně snížením účinnosti LED diod během provozu. Důležitou roli hraje teplota polovodičového přechodu. Při teplotě okolí 25 °C se po době provozu 50000 až 200000 hodin sníží účinnost na 50 % původní velikosti. To vše za předpokladu, že je LED dioda provozována s proudem odpovídajícím 50 % maximálně přípustného proudu v propustném směru (teplota přechodu kolem 50 °C). Každé zvýšení teploty přechodu se projeví snížením životnosti luminiscenční diody. Účinnost LED diod se může také prudce zmenšovat zatěžováním napětím v nepropustném směru. S tímto je třeba počítat při návrhu konkrétních zapojení. Při provozu v obvodech se střídavým napětím je nutné k LED diodě připojit ochrannou diodu. [6]

6.2 Vybrané optoelektronické vazební členy

6.2.1 HCPL-181

HCPL-181 od firmy Agilent Technologies obsahuje LED diodu opticky spojenou s fototranzistorem (bipolární bez vyvedené báze). Typ pouzdrění je SMD se čtyřmi vývody, což podle výrobce ušetří 30 % místa oproti konvenčnímu DIP typu. [24]

Vlastnosti udávané výrobcem (při teplotě 25 °C):

$CTR = 50\text{--}600 \%$, při $I_F = 5 \text{ mA}$

$t_{amb} = -55 \text{ až } +100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$U_{IORM} = 3750 \text{ V}$

$I_F = 50 \text{ mA}$

$U_F = 1,4 \text{ V}$ při $I_F = 20 \text{ mA}$

$U_R = 6 \text{ V}$

$U_{CEO} = 80 \text{ V}$

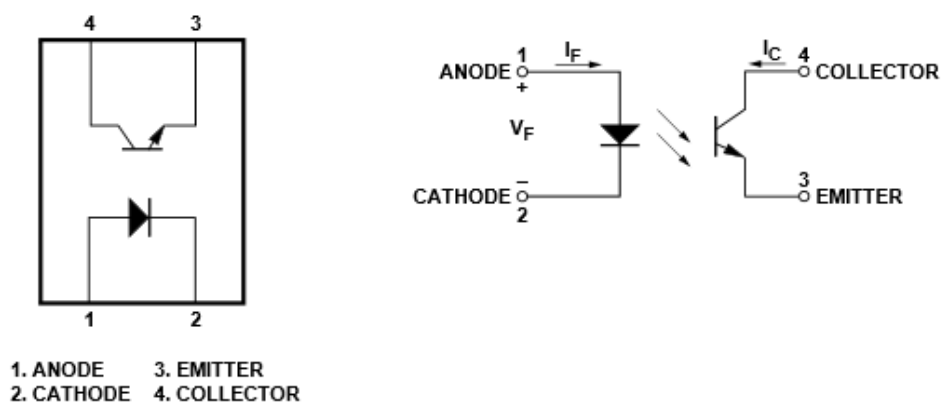
$U_{ECO} = 6 \text{ V}$

$I_C = 50 \text{ mA}$

Doba přitahu = 4 μs

Doba odpadu = 3 μs

Schéma zapojení:



Obrázek 21: Schéma vnitřního zapojení HCPL-181 [24]

Vzhled součástky:



Obrázek 22: HCPL-181

6.2.2 VTL5C9

Výrobek od společnosti PerkinElmer VTL5C9 nabízí LED diodu na vstupu a fotorezistor na výstupu. Společně tento opticky propojený pár tvoří elektricky proměnlivý rezistor. Změna velikosti vstupního proudu nebo napětí vyvolá změnu velikosti odporu na výstupu. Výstupní odpor dokáže přepínat mezi hodnotami „ON“ a „OFF“, nebo může spojitě sledovat vstupní signál. I malá změna vstupního signálu je schopná způsobit velkou změnu odporu na výstupu. Typ pouzdra je THT. [25]

Vlastnosti udávané výrobcem (při teplotě 25 °C):

$$t_{amb} = -40 \text{ až } +75 \text{ °C}$$

$$U_{IORM} = 2500 \text{ V}$$

$$I_F = 40 \text{ mA}$$

$$U_F = 2,8 \text{ V při } I_F = 20 \text{ mA}$$

$$U_R = 3 \text{ V}$$

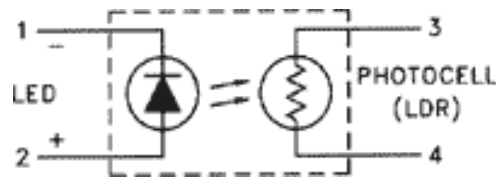
$$C_{IO} = 0,5 \text{ pF}$$

$$\text{„ON“ odpor} = 630 \text{ } \Omega$$

$$\text{„OFF“ odpor} = 50 \text{ M}\Omega$$

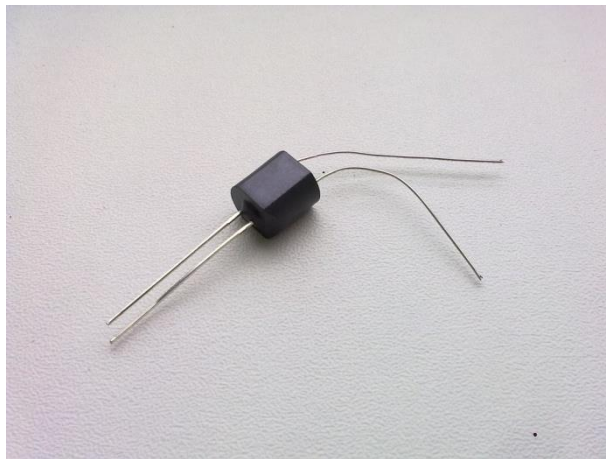
$$\text{Dynamický rozsah} = 112 \text{ db}$$

Schéma zapojení:



Obrázek 23: Schéma vnitřního zapojení VTL5C9 [25]

Vzhled součástky:



Obrázek 24: VTL5C9

6.2.3 6N135-300E

Další součástka od firmy Agilent Technologies. Tato ukrývá optické spojení LED diody na vstupu a fotodiody ve spojení s tranzistorem na výstupu. Tranzistor je použit kvůli zesílení výstupního signálu fotodiody. Tento jednoboký optočlen je určený k použití v TTL/CMOS, TTL/LSTTL, nebo širokopásmových analogových aplikacích. Typ pouzdra je SMD. [26]

Vlastnosti udávané výrobcem:

$CTR = 7-50 \% \text{ při } I_F = 16 \text{ mA}$

$t_{amb} = -55 \text{ až } +100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$U_{IORM} = 3750 \text{ V}$

$I_F = 25 \text{ mA}$

$I_{FSM} = 50 \text{ mA}$

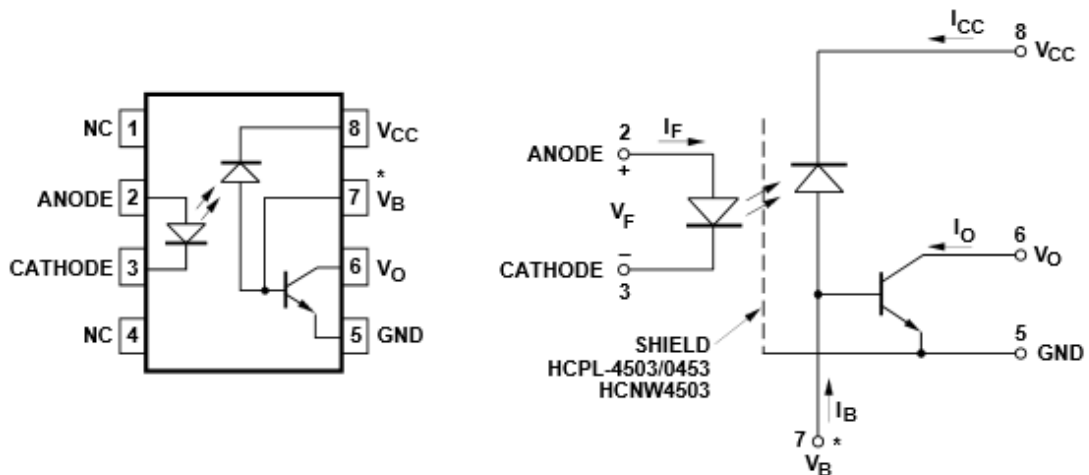
$U_F = 1,5 \text{ při } I_F = 16 \text{ mA}$

$$U_R = 5 \text{ V}$$

$$I_O = 8 \text{ mA}$$

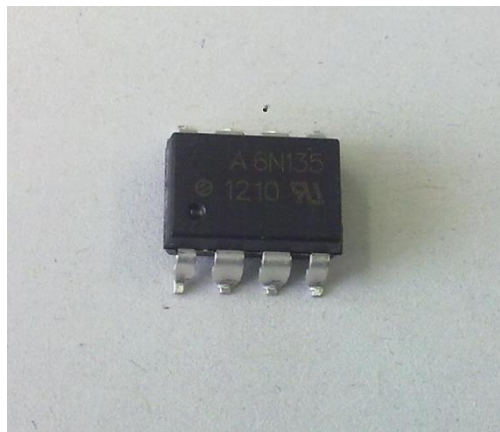
$$I_{O(\text{MAX})} = 16 \text{ mA}$$

Schéma zapojení:



Obrázek 25: Schéma vnitřního zapojení 6N135-300E [26]

Vzhled součástky:



Obrázek 26: 6N135-300E

6.2.4 MOCD233M

Tato součástka od společnosti Fairchild Semiconductor se skládá ze dvou infračervených LED diod a dvou fotodetektorů v Darlingtonově zapojení. Ideální použití je pro aplikace s nízkým vstupním proudem. Pouzdro je typu SMD. [27]

Vlastnosti udávané výrobcem (při teplotě 25 °C):

$CTR = 500-1000 \%$ při $I_F = 1\text{mA}$

$t_{amb} = -40 \text{ až } +100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$U_{IORM} = 2500 \text{ V}$

$I_F = 60 \text{ mA}$

$I_{FSM} = 1 \text{ A}$

$U_F = 1,25 \text{ V}$ při $I_F = 1\text{mA}$

$U_R = 6 \text{ V}$

$U_{CEO} = 30 \text{ V}$

$U_{CBO} = 70 \text{ V}$

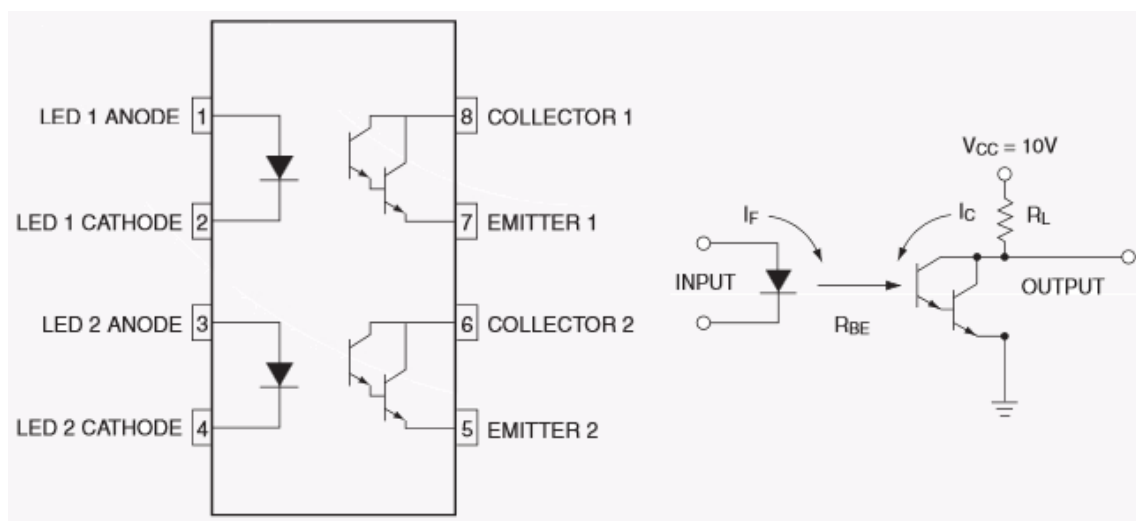
$U_{ECO} = 7 \text{ V}$

$I_C = 150 \text{ mA}$

Doba přitahu = $8\mu\text{s}$

Doba odpadu = $55\mu\text{s}$

Schéma zapojení:



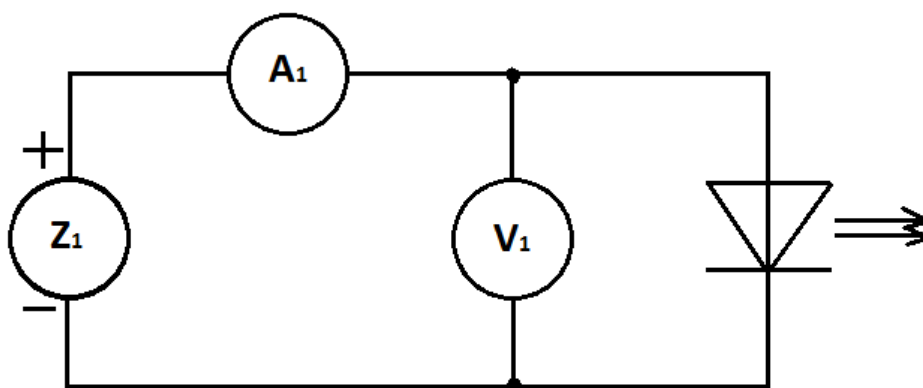
Obrázek 27: Schéma vnitřního zapojení MOC223M [27]

7 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Při návrhu experimentální úlohy na ověření statických a dynamických vlastností optoelektronických vazebních členů byl kladen důraz na jednoduché, unifikované a později snadno upravitelné řešení. To znamená využití modulárního systému, kde jsou jednotlivé optoelektronické vazební členy, ať už samostatně nebo připájeny na plošném spoji, přichyceny pomocí svorkovnic a šroubového spoje. Toto umožňuje snadnou výměnu optočlenů např. v případě jejich destrukce nebo potřeby měření s jinými součástkami. Pro návrh schémat měření se vycházelo ze skript „Úvod do mikroelektroniky“ vydaných na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [29].

Jak již bylo krátce zmíněno v kapitole 6.1.4, ve školních laboratořích se budou měřit tři základní statické vlastnosti optočlenů, a to vstupní, výstupní a převodová charakteristika. Při měření vstupní charakteristiky jde o závislost vstupního proudu (I_F – proud v propustném směru protékající LED diodou) na vstupním napětí (U_F – napětí na LED diodě v propustném směru). Měření bude probíhat se zdrojovým napětím v rozmezí 0 – 1,35 V DC kvůli maximální přípustné hodnotě 1,4 V DC. Při vyšším napětí by mohlo dojít ke zničení součástky a to překročením maximální přípustné hodnoty proudu. Kolem hodnoty 0,9 V DC se začne zvyšovat proud, takže bude potřeba správně odkrokovat jednotlivé hodnoty zdrojového napětí. Odečítat se budou hodnoty U_F (V_1) a I_F (A_1) ze kterých se vytvoří graf.

Schéma zapojení:

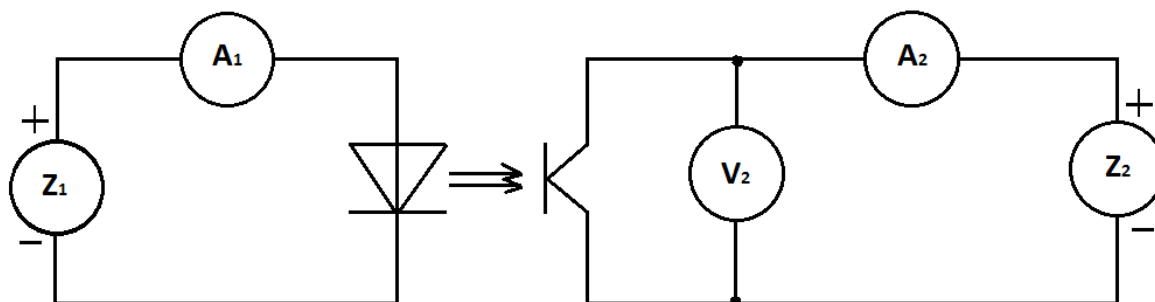


Obrázek 28: Schéma zapojení pro měření vstupní charakteristiky optronu [29]

Výstupní charakteristika je závislost U_{CE} (napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru) na I_C (proud procházející kolektorem). Měření se bude provádět při třech hodnotách I_F a to

5, 10 a 15 mA DC. Proud I_F (A_1) se na začátku měření nastaví pomocí zdroje Z_1 na požadovanou hodnotu a dále se s ním nepohybuje. Také je potřeba zapsat hodnotu napětí U_{Z1} , při kterém je proud I_F na požadované hodnotě. V průběhu měření se mění napětí U_{Z2} v rozsahu 0 - 2 V DC s krokem 0,1 V. Odečítat se budou hodnoty napětí U_{CE} (V_2) a proudu I_C (A_2).

Schéma zapojení:

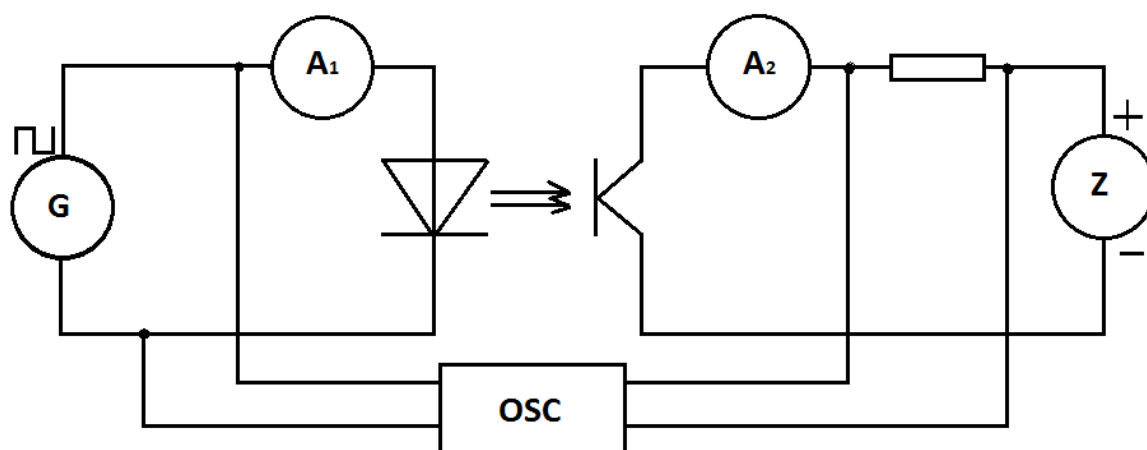


Obrázek 29: Schéma zapojení pro měření výstupní charakteristiky optronu [29]

U převodové charakteristiky jde o závislost výstupního proudu na vstupním proudu. Měření bude probíhat pro dvě nastavené hodnoty napětí U_{CE} (V_2) a to 1 a 2 V DC. Toto napětí se nastaví pomocí zdroje Z_2 a nechá se tak po celou dobu měření. Při měření se bude nastavovat hodnota napětí zdroje Z_1 opět v rozsahu 0 – 1,35 V DC obdobně jako u měření vstupní charakteristiky. Odečítat se budou proudy I_F (A_1) a I_C (A_2) ze kterých se vytvoří graf. Schéma zapojení je stejné jako u měření výstupní charakteristiky viz obrázek 26.

Při měření dynamických vlastností se bude na vstup optoelektronických vazebních členů použít obdélníkový signál z programovatelného generátoru a pomocí osciloskopu se bude sledovat zkreslený výstupní signál vůči vstupnímu signálu. Z teoretických předpokladů vyplývá, že čím bude vyšší kmitočet vstupního signálu, tím bude výstupní signál více reálný (zaoblené hrany). Měření bude probíhat pro různé kmitočty a výstupní signály se budou ukládat a budou k dispozici pro porovnání či další zpracování. Z naměřeného signálu poté bude možné určit dobu náběhu a dobu doběhu.

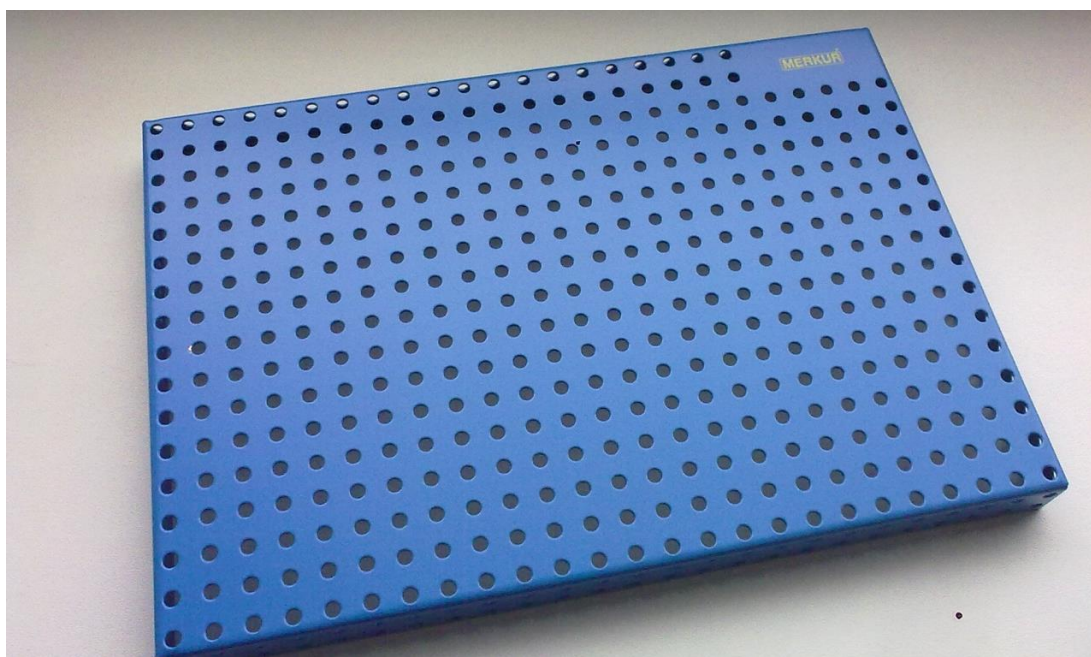
Schéma zapojení:



Obrázek 30: Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností optronu [29]

8 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Jako základna pro experimentální měřicí úlohu byly, po dohodě s vedoucím práce a řešiteli dalších obdobných měřicích úloh, zvoleny kovové desky od firmy Merkur s rozměry 250x170x20 mm. Tato deska kromě ideální velikosti a dostatečné pevnosti nabízí také předvrtané otvory pro přichycení dalších součástek. Využity byly dvě desky. Ty se k sobě přichytily do pravého úhlu kvůli zvětšení pracovní plochy a možnosti zapojení více optoelektronických vazebních členů. Dle průměru otvorů byl vybrán odpovídající spojovací šroubový materiál.



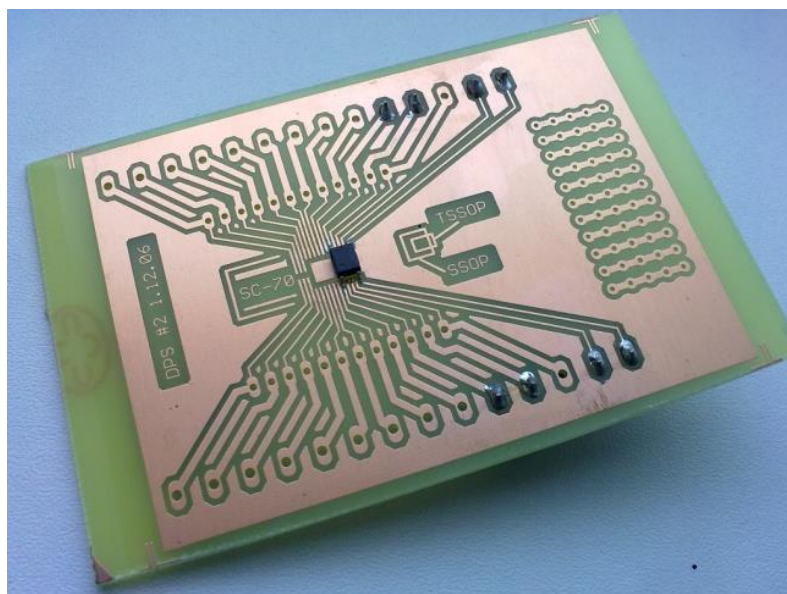
Obrázek 31: Základna – kovová deska

Po přichycení kovových desek k sobě došlo k přišroubování svorkovnic, kde každá má 8 děr. Tyto svorkovnice slouží pro přívod vstupních a výstupních signálů optoelektronických vazebních členů.

V měřicí úloze jsou použity celkem tři ze čtyř výše popisovaných optoelektronických vazebních členů. Důvodem je, že po přijetí zásilky z internetového obchodu dodavatele jeden typ optronu chyběl i když byl v době objednání skladem. Byl to MOCD233M využívající dvou tranzistorů v Darlingtonově zapojení na výstupu. V návrhu experimentální úlohy se s tím však počítá a je vymezen prostor na základní desce určený pro pozdější osazení a doplnění. Bylo tak učiněno po konzultaci s vedoucím práce.

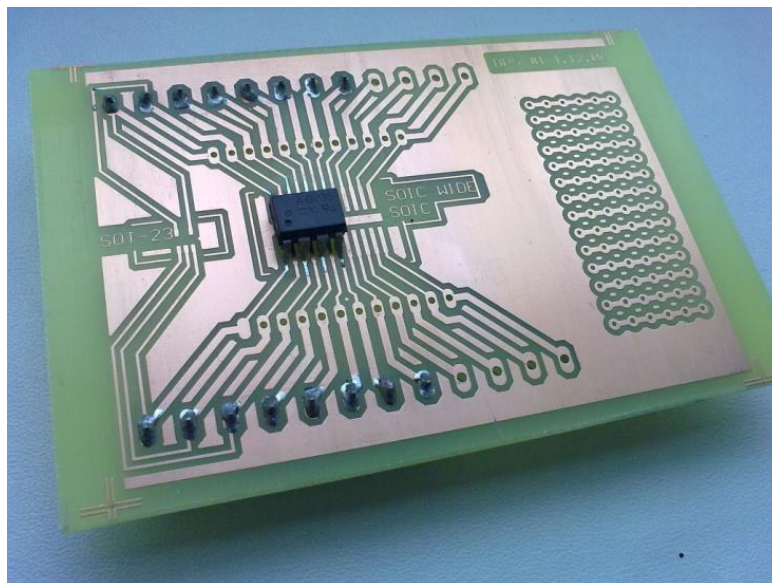
Z optočlenů co byly dodány je na desce uchycený VTL5C9, který obsahuje optické spojení LED diody a fotorezistoru. Kvůli typu pouzření patrného z obrázku 20 v kapitole 6 je součástka přichycená přímo ve svorkovnicích jak jde vidět na obrázku 30.

Dalším typem je model HCPL-181, který je tvořen párem LED dioda - fototranzistor bez vyvedené báze. Tento optron je kvůli typu pouzdra osazen na již hotový plošný spoj, který byl v roce 2006 navržen pro potřebu laboratoří předmětu Senzory a byl vyroben a stále dodáván firmou Semach se sídlem ve Valašském Meziříčí. Slouží k testování integrovaných součástek s různým typem pouzdra. V tomto případě se jedná o desku plošného spoje s označením DPS #2, který je vhodný pro pouzdra typu SC 70, ISSOP a SSOP. Na tento spoj bude také dodatečně doplněn nedodaný optočlen MOCD233M. Osazený plošný spoj DPS #2 je ukázán na níže uvedeném obr. 29.

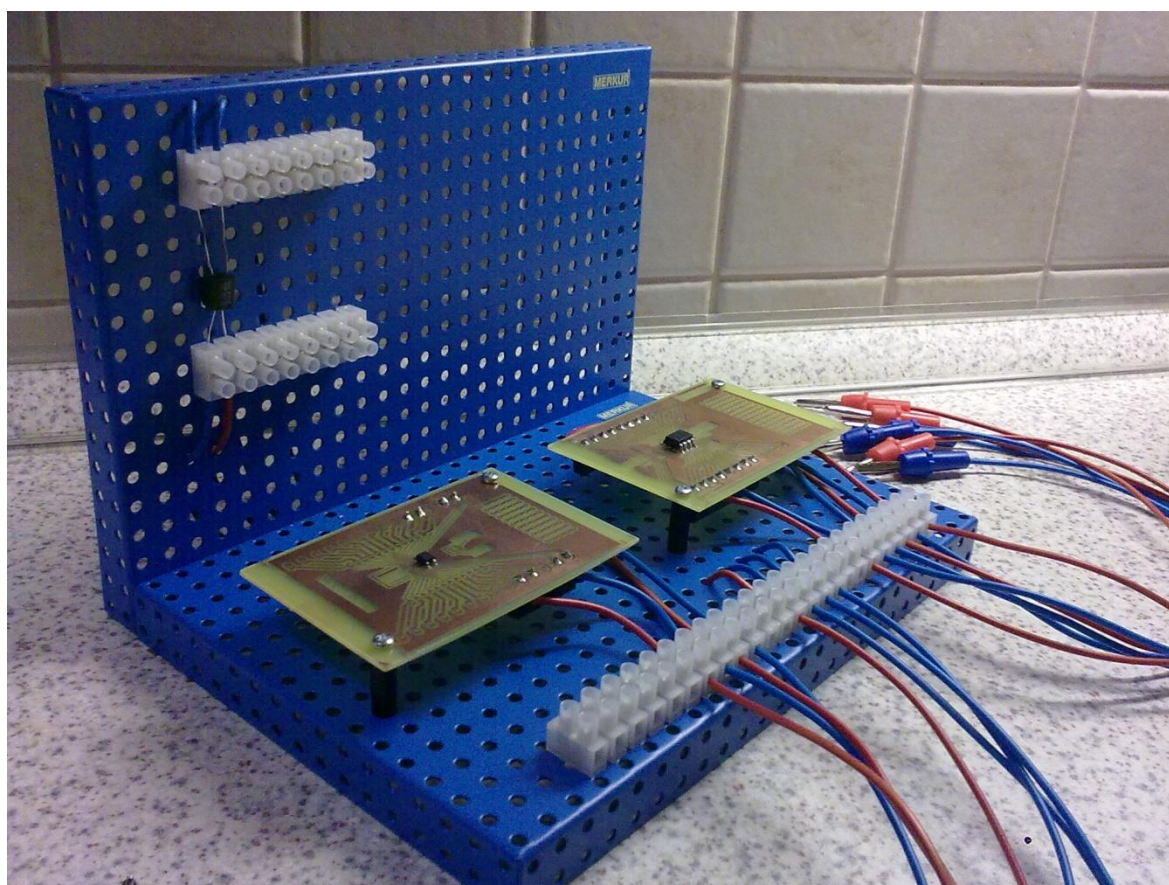


Obrázek 32: Osazený plošný spoj s HCPL-181

Poslední použitou součástkou je 6N135-300E, který využívá spojení fotodiody a tranzistoru na výstupu. Tento optočlen má jiný typ pouzdra než ten předchozí a musel být osazen na jiný plošný spoj a to konkrétně na DPS #1, který je určený pro součástky s pouzřením SOT-23, SOIC, SOIC WIDE, jak lze vidět na obrázku 30.



Obrázek 33: 6N135-300E – optron s fotodiodou a tranzistorem



Obrázek 34: Zkompletovaná úloha pro měření vlastností optronů

Na obrázku 31 je znázorněna kompletně zkonstruovaná experimentální úloha. Plošné spoje jsou ke kovové desce připojeny pomocí šroubového spoje s 2 cm vysokými distančními sloupky. Pod hlavičku šroubů patří nevodivá podložka zamezující dotyku šroubu a vodivé části plošného spoje. Měřicí úloha obsahuje 14 vývodů, které jsou na svorkovnici od sebe odděleny podle toho, kterému optočlenu patří. Vývody jsou také barevně odlišeny kvůli rozeznání polarity signálu. Na konci jsou vyvedené vodiče ukončeny „banánky“, které jsou kompatibilní se zdroji a měřicími přístroji ve školní laboratoři.

9 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

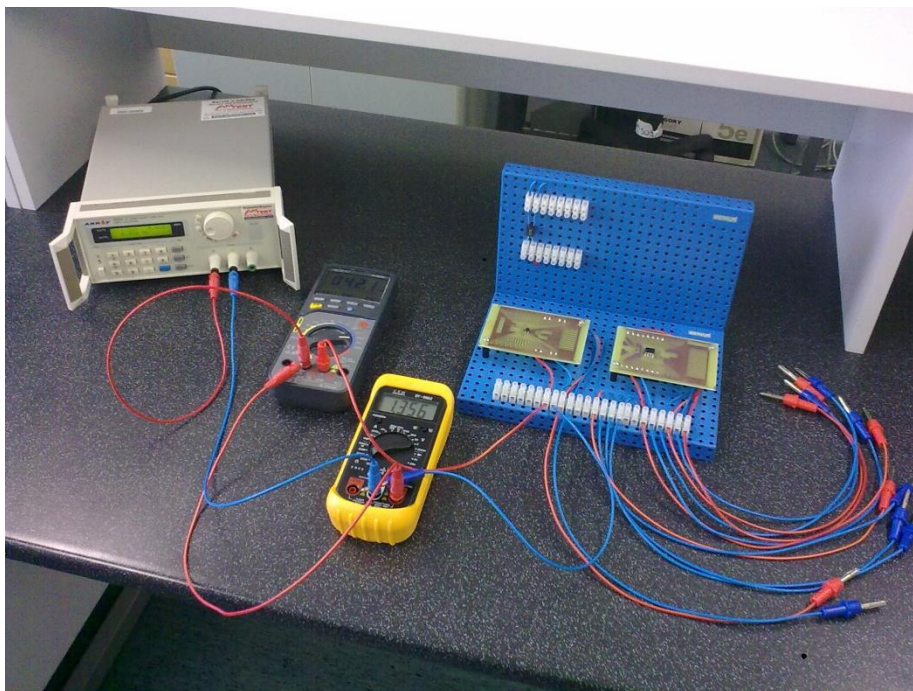
Experimentální měření bylo provedeno pro všechny tři dostupné typy optoelektronických vazebních členů, tj. HCPL-181 od firmy Agilent Technologies (obsahuje optické spojení LED diody s fototranzistorem), VTL5C9 od společnosti PerkinElmer (obsahuje pár LED dioda - fotorezistor) a nakonec opět výrobek od firmy Agilent Technologies 6N135-300E (nabízí optické spojení LED diody a fotodiody s tranzistorem). Všechny optočleny byly odzkoušeny a funkční. Po dohodě s vedoucím práce byl vybrán pouze jeden z výše uvedených a to optočlen HCPL-181, na kterém bude provedeno podrobné měření za účelem zpracování zprávy ve formě protokolu a to dle požadavků kladených daným předmětem. Kompletní zpráva z měření ve formě protokolu je součástí přílohy P I.

9.1 Měření statických vlastností optoelektronických vazebních členů

Mezi statické vlastnosti optoelektronických vazebních členů patří mimo jiné vstupní, výstupní a převodová charakteristika.

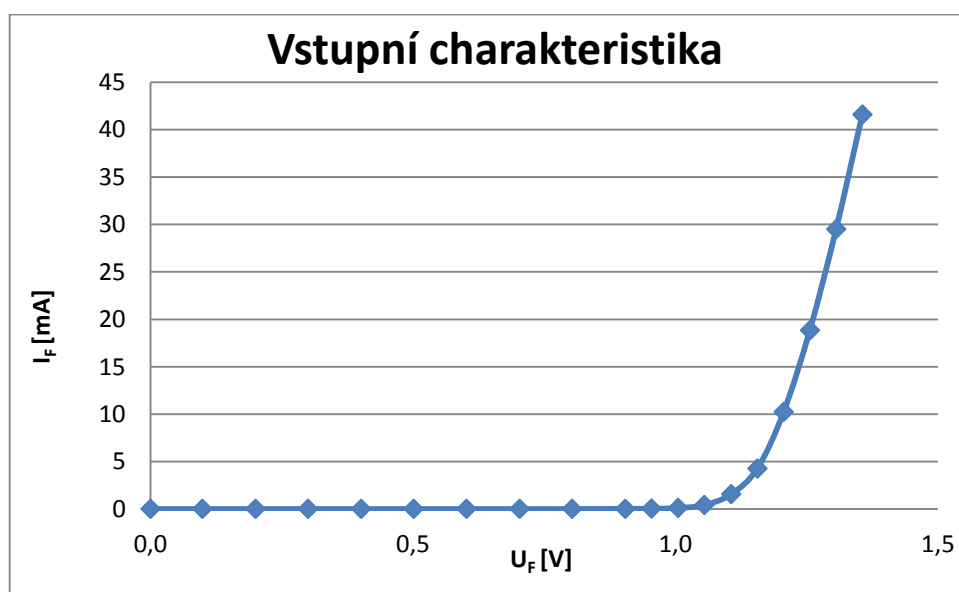
9.1.1 Vstupní charakteristika

Při měření vstupní charakteristiky bylo použito schéma zapojení uvedené na obrázku 24. K tomuto zapojení bylo potřeba využít programovatelný zdroj stejnosměrného napětí (v našem případě ARRAY 3645A), číslicový ampérmetr (METEX M3860M), číslicový voltmetr (CEM DT-9602) a připravenou základnu s optočleny. Měření probíhalo, jak již bylo zmíněno, na optronu HCPL-181, který využívá optického spojení luminiscenční diody a fototranzistoru bez vyvedené báze. Celkově zapojenou úlohu ukazuje následující obrázek.



Obrázek 35: Celkové zapojení pro měření vstupních charakteristik optronu

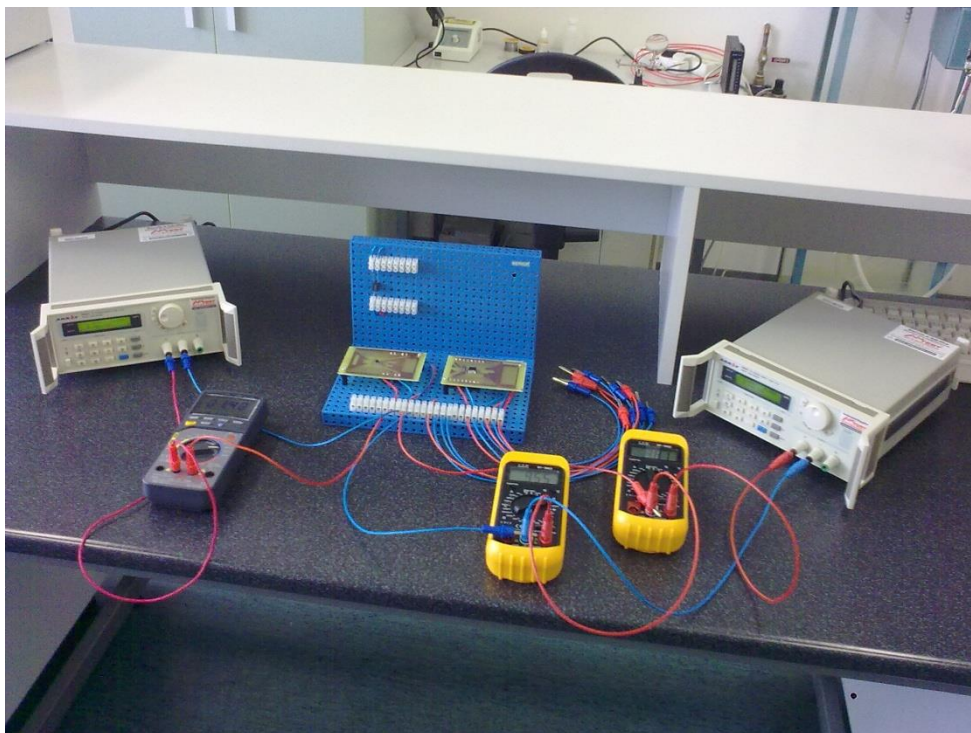
Po správném zapojení se postupně nastavovaly hodnoty napětí zdroje a odečítaly se hodnoty vstupního proudu protékajícího LED diodou I_F a hodnoty napětí na LED diodě U_F . Maximální nastavená hodnota napětí zdroje nesměla překročit hodnotu 1,35 V DC kvůli ochraně součástky před zničením. Po překročení hodnoty zdrojového napětí 0,9 V DC bylo potřeba zvolnit kroky, protože se LED dioda začala otevírat a začal se měnit proud I_F . Přesné hodnoty z měření jsou k nalezení v příloze P I. Grafickým výstupem z tohoto měření je graf závislosti I_F na U_F .



Obrázek 36: Graf vstupní charakteristiky

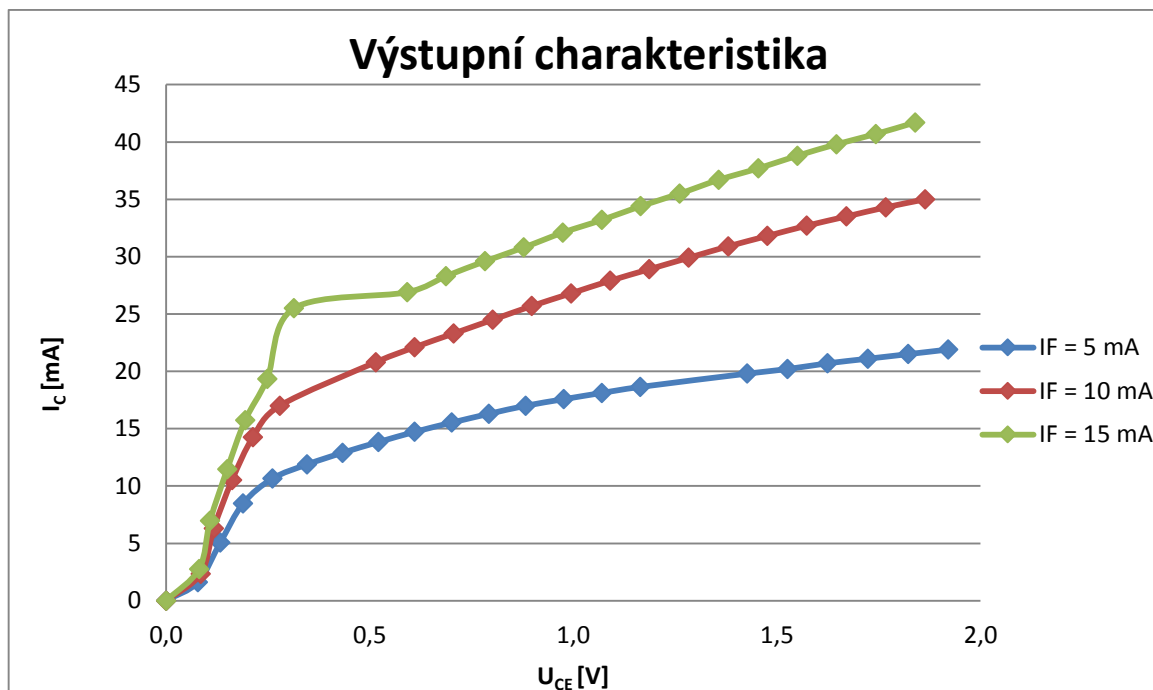
9.1.2 Výstupní charakteristika

Pro měření výstupní charakteristiky se použilo schéma zapojení uvedené na obrázku 25. Kromě pomůcek potřebných pro měření v předchozím případě se v tomto případě navíc využívá další programovatelný stejnosměrný zdroj napětí (ARRAY 3645A) a další číslicový ampérmetr (CEM DT-9602). Celkově zapojená úloha je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 37: Celkové zapojení pro měření výstupních a převodových charakteristik optronu

Po správném zapojení měřicí úlohy bylo nejdříve potřeba nastavit hodnotu proudu protékajícího LED diodou I_F . Nastavení se provádělo pomocí změny napětí prvního zdroje U_{Z1} . Měření se provádělo pro tři hodnoty proudu I_F , konkrétně 5, 10, a 15 mA DC. Po nastavení požadované hodnoty tohoto proudu se postupně měnila hodnota napětí na druhém zdroji U_{Z2} . Rozmezí hodnot bylo 0-2 V DC s krokem 0,1 V. Po každé změně napětí U_{Z2} se odečetly a do tabulky zapsaly hodnoty napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru U_{CE} a hodnoty kolektorového proudu I_C . Přesné hodnoty jsou k nalezení v příloze P I. Grafickým výstupem z této části měření je závislost I_C na U_{CE} pro tři různé hodnoty I_F .

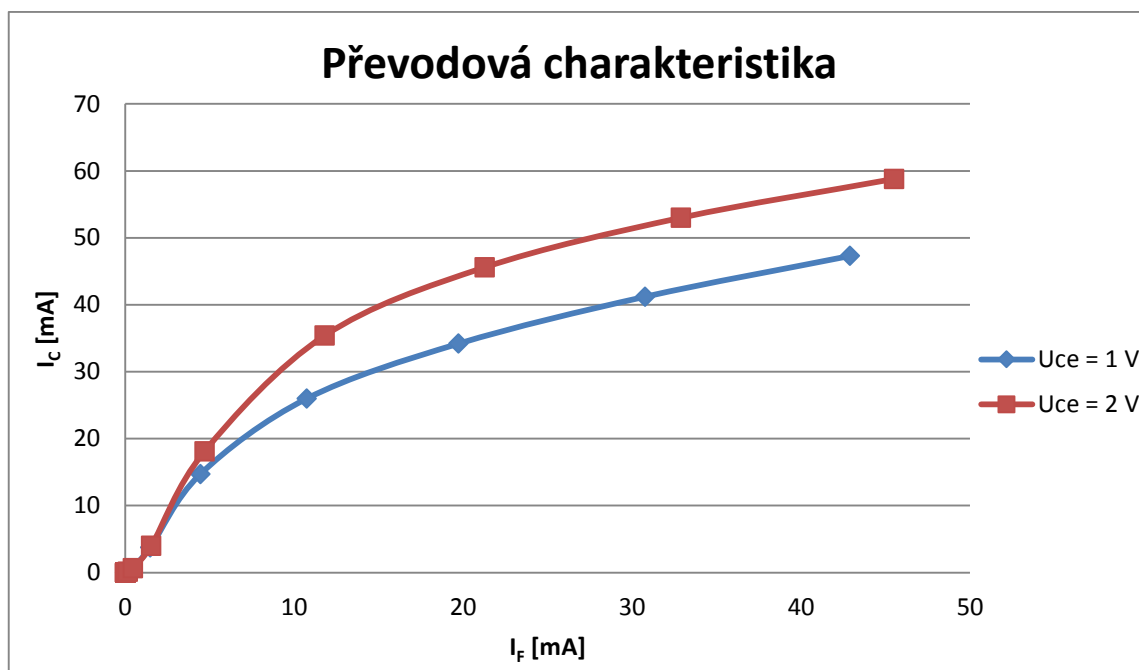


Obrázek 38: Graf výstupní charakteristiky

9.1.3 Převodová charakteristika

Při měření převodové charakteristiky se opět vycházelo ze schématu zapojení uvedeného na obrázku 25. Byly použity stejné pomůcky měření jako u výstupní charakteristiky v předešlé kapitole. Také reálné zapojení a rozmístění přístrojů bylo identické s předchozí kapitolou, viz obrázek 33.

Po zapojení úlohy dle schématu bylo potřeba pomocí druhého zdroje Z_2 nastavit napětí kolektor-emitor U_{CE} . Měření se provádělo pro dvě hodnoty tohoto napětí a to 1 a 2 V DC. Následně se po krocích měnilo napětí prvního zdroje U_{Z1} obdobně jako při měření vstupní charakteristiky, to znamená v rozmezí 0-1,35 V DC. Odečítaly a zapisovaly se hodnoty proudu LED diodou I_F a hodnoty kolektorového proudu I_C . Přesné hodnoty zapsané v tabulkách jsou opět k dispozici v příloze P I. Grafickým výstupem z této části měření je závislost I_C na I_F .



Obrázek 39: Graf převodové charakteristiky

9.2 Měření dynamických vlastností optoelektronických vazebních členů

Při měření dynamických vlastností optoelektronických vazebních členů jde o zjištění doby náběhu a doby doběhu optronu, když je vstupním signálem obdélníkový průběh s danou amplitudou a frekvencí. Při měření se vycházelo ze schématu zapojení na obrázku 27. Mezi použité pomůcky pro měření patří funkční generátor Agilent 33210A, osciloskop Agilent DSO3062A, dále stejnosměrný programovatelný zdroj napětí ARRAY 3645A, číslicový ampérmetr METEX M3860M a číslicový ampérmetr CEM DT-9602. Zvolené hodnoty rezistorů byly 100 Ω . Měření probíhalo při amplitudě vstupního signálu 2 V a frekvencích 1, 10, 50 a 100 kHz.

Problémem při tomto měření bylo ukládání zaznamenaných průběhů na flash disk k dalšímu zpracování. Osciloskop totiž přijímá pouze flash disky s formátováním FAT32 a do velikosti 4 GB. Můj flash disk po úspěšném připojení hlásil chybu při pokusu o uložení průběhů. Kvůli tomu jsou průběhy signálu pouze ofocené z displeje osciloskopu.

Ukázka vstupního a výstupního signálu při kmitočtu 50 kHz, kde žlutý průběh znázorňuje vstupní obdélníkový signál a zelený zobrazuje výstupní signál.



Obrázek 40: Průběh vstupního a výstupního signálu

Příklady dalších průběhů při odlišných frekvencích a odečet doby náběhu a doby doběhu jsou k dispozici v příloze P I.

U ověřování dynamických vlastností bylo potřeba zjistit frekvenci vstupního obdélníkového signálu, při kterém začíná docházet k deformaci výstupního signálu. Nakonec byly pro ukázkou zvoleny čtyři kmitočty, ze kterých jde vidět, že vyšší frekvence signálu znamená více zdeformovaný výstupní signál a naopak.

Musím podotknout, že při měření dynamických vlastností se jednalo pouze o testovací zapojení, takže byla nutnost použití provizorního spojení mezi generátorem signálu, osciloskopem a samotnou sestavou. Generátor a osciloskop byly napojeny pomocí koaxiálních kabelů s kombinací konektorů BNC a „banán“. Úloha zatím neumožňuje kompaktní připojení s tímto typem konektorů. Proto by do budoucna bylo dobré přidat na základovou desku další svorkovnice, ze kterých by vystupovaly právě kabely kompatibilní s funkčním generátorem a osciloskopem. Předělo by se tak nepřehlednému zapojení a celé měření by se urychlilo.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a zrealizovat experimentální úlohu, která by umožnila měření a ověřování statických a dynamických vlastností optoelektronických vazebních členů. Tato úloha bude dále využita pro potřeby předmětu Senzory vyučovaného na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a tím podpoří výuku tohoto předmětu.

Práce je rozdělena do dvou oddílů. Teoretická část se věnuje fyzikálním principům, které souvisejí s danou problematikou. Nejdříve byla shrnuta historie tohoto odvětví, protože dochované pokusy se světlem se odehrávaly již v 19. století. Dále byly popsány vlastnosti optického záření, na které se dá pohlížet jako na vlnu nebo částici. Další důležitá kapitola je o fotoelektrickém jevu, který je základem funkce optronů a bez jeho existence by žádné fotosenzory nefungovaly. Následuje část věnovaná vlastnostem polovodičů, které jsou základem většiny elektronických zařízení a součástek, tudíž i optočlenů. Nakonec je popsán samotný optoelektronický vazební člen, typy vnitřních zapojení a prvky, které se v něm používají pro vysílání optického záření, jako jsou luminiscenční diody a pro jeho přijímání, jako jsou fototranzistory.

Praktická část nejdříve řeší výběr vhodných optoelektronických vazebních členů, jejich důležité parametry a vlastnosti. Vybrány byly čtyři různé typy od různých výrobců, které liší svým vnitřním zapojením a také svými vlastnostmi. Následuje část, která se zabývá návrhem experimentální úlohy pro měření statických a dynamických vlastností optronů. Jsou zde k nalezení také schémata zapojení pro tato měření. Kapitola zabývající se realizací experimentální úlohy popisuje její vznik od základní konstrukce úlohy až po samotné osazení optočleny. Dále je popsán způsob měření na optočlenu pro zjištění jeho statických a dynamických vlastností. Byla ověřena funkčnost experimentální úlohy a předvedena vedoucímu práce. Veškeré naměřené průběhy na optočlenech odpovídaly teoretickým předpokladům. V této práci je uvedeno podrobnější měření pouze na jednom optočlenu, konkrétně na HCPL-181. Jeden z optočlenů, typ MOCD233M nebyl dodán a to z důvodů již uvedených v práci. Experimentální úloha je navržena tak, aby se chybějící optočlen po jeho dodání dál osadit dodatečně. Bude osazen na stejný plošný spoj, na kterém je optron HCPL-181. Jeho vstupy a výstupy budou vyvedeny stejným způsobem jako u ostatních optoelektronických vazebních členů.

Součástí této práce jsou také dvě přílohy. První obsahuje kompletní zprávu z měření ve formě protokolu. Druhá (externí) obsahuje návrh zadání na měření laboratorní úlohy společně s technickou dokumentací k jednotlivým typům optoelektronických vazebních členů.

CONCLUSION

The aim of this bachelor thesis was to design and realize an experimental system that would allow the measurement and verification of static and dynamic properties of optocouplers. This system will be further used for the needs of the subject Sensors at the Faculty of Applied Informatics at Tomas Bata's University in Zlín and thereby support the teaching of this subject.

The work is divided into two sections. The theoretical part deals with the physical principles that relate to the topic. At first, there was summarized history of the industry, because the experiments with light took place in the 19th century yet. There were also described the properties of optical radiation, which can be viewed as a wave or particle. Another important chapter is about the photoelectric effect, which is the basis function of optocouplers and without his presence there would be no photosensors that work. The following section is about properties of semiconductors, which are the basis of most electronic devices and components, including optocouplers. Finally, there is described optocoupler itself, types of internal connection and the elements in it that are used for the transmission of optical radiation, such as luminescent diodes and its receivers such as phototransistors.

The practical part at first addresses the selection of suitable optocoupler, the important parameters and properties. There were chosen four different types from different manufacturers, which differ in their internal connection and properties. The following is the part that deals with experimental tasks for measuring static and dynamic properties of optocouplers. There are schematic diagrams for these measurements. The section on implementation of the experimental system describes its development from basic construction tasks to the actual installation of optocouplers. There is also described a method of measuring the optocoupler to determine their static and dynamic properties. We have verified the functionality of the experimental task and shown it to the supervisor. All waveforms of optocouplers match theoretical expectations. In this work the measurements are made on a single optocoupler, namely HCPL-181. One of the optocouplers, type MOCD233M, was not delivered for the reasons given in the work and will be implemented later. The experimental system is designed in such a way that it is possible. It will be mounted on the same printed circuit board on which the optocoupler HCPL-181 is. The inputs and outputs are routed in the same way as other optocouplers.

This thesis also includes two appendices. The first contains a complete report of measurements as a protocol. The second (external) contains a draft terms of reference for measuring laboratory work together with the technical documentation for the various types of optocouplers.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FISCHER, Jan. *Optoelektronické senzory a videometrie: cvičení*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 143 s. ISBN 80-010-2525-X.
- [2] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika: cvičení*. 6. vyd., V Idea servis 5., dopl. a upr. vyd. Praha: Idea servis, 2008, 362 s. ISBN 978-80-85970-64-7.
- [3] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [5] *BMR vývoj a výroba regulační techniky* [online]. 2013 [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://bmr.cz/>
- [6] NAVRÁTIL, Zdeněk a Milan VOŘÍŠEK. *Optoelektronika*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 96 s.
- [8] *Optoelektronické prvky* [online]. [2013] [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/uvod.htm>
- [9] *Optoelektronika: Kapitola 2*. [online]. [2011] [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/oks/cz/pdf/skripta_kap_1.pdf
- [10] Elektromagnetické spektrum. *Radek Jandora* [online]. 2000 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f25.htm>
- [11] *Kosmické záření* [online]. 2001 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www-hep2.fzu.cz/Auger/cz/kosmzar.html>
- [12] *Detekce vesmírného záření gama* [online]. 2010 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/neutrina/gamaastropis.htm>
- [13] MARTYKÁNOVÁ, Eva. *Rtg záření, jeho vlastnosti a využití*. Brno, 2007. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/84466/pedf_m/rtg_zareni_diplomka.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [14] Ultrafialové (UV) záření. *Optikarium* [online]. 2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.optikarium.cz/optika-fyzika/ultrafialove-uv-zareni>
- [15] *Záření a zdraví* [online]. [2008] [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/zareni.pdf>

- [16] *Infračervené záření z pohledu fyziky* [online]. [2008] [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://sun-of-hope-topne-panely.sunofhope.cz/pohled-fyziky.pdf>
- [17] Neionizující záření. *Radiobiologie* [online]. [2007] [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/12.html>
- [18] *Rozdělení radiových vln a jejich šíření* [online]. 2001 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: http://dlabos.wz.cz/en/Rozdeleni_radiovych_vln_a_jejich_sireni.html
- [19] Science - Physics. *INFOThread* [online]. [2013] [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://infotread.org/Science/Physics/>
- [20] Polovodiče: fyzikální základy. *Elektrina* [online]. 2003 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>
- [21] Značky, vzorce, zkratky, termíny... *Miracle 's homepage* [online]. 2008 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.miracle.wz.cz/elsch/elsch.htm>
- [22] Fotoelektrický jev. *Fakulta pedagogická: Oddělení fyziky* [online]. [2012] [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotoel.html>
- [23] *Zdroje záření* [online]. [2008] [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://ulb.upol.cz/prednasky/zual11/lasery.pdf>
- [24] *Agilent HCPL-181 Phototransistor Optocoupler SMD Mini-Flat Type* [online]. 2004 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/4d71d788654f9a4e0e0d3beef0b6b7de/HCPL-181-06DE.pdf>
- [25] *Advanced sensor technologies for today's breakthrough applications: PerkinElmer* [online]. 2007 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/fe1572b75ff161512b63e5a55f987a87/VTL5C7.pdf>
- [26] *Single Channel, High Speed Optocouplers: Technical Data* [online]. 2004 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/eb98a096cbfec214f27768d178cd1034/6N135-000E.pdf>
- [27] *MOCD223M: Dual Channel Phototransistor Small Outline Surface Mount Optocouplers* [online]. 2003 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/285cbd19d8ebb3b2ecf589c7480e06bf/MOCD223M.pdf>

- [28] *Statické a dynamické vlastnosti regulačních členů: Čestmír Serafin* [online].
[2013] [cit. 2013-05-18]. Dostupné z:
<http://www.kteiv.upol.cz/uploads/soubory/serafin/mechatronika/statticke%20a%20dynamicke%20vlastnosti.ppt>
- [29] ADÁMEK, Milan a Miroslav MATÝSEK. *Úvod do elektrotechniky*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006, 159 s. ISBN 80-7318-411-7

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CTR	Current Transfer Ratio.
DC	Direct Current.
IR	Infrared.
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
LED	Light-Emitting Diode.
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
TTL	Transistor–Transistor Logic.
US	United States.
UV	Ultraviolet

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [19]	14
Obrázek 2: Vazby atomů křemíku [1]	22
Obrázek 3: Znázornění vlastní vodivosti u polovodiče [1]	23
Obrázek 4: Vznik volného elektronu [1]	24
Obrázek 5: Vznik kladné díry [1]	25
Obrázek 6: Přejchod mezi polovodičovými materiály s různým typem vodivosti [1]	26
Obrázek 7: Oblast prostorového náboje [1]	27
Obrázek 8: Schématická značka optočlenu [21]	28
Obrázek 9: Schématická značka diody LED [21]	29
Obrázek 10: Laserová dioda s homogenním přechodem [4]	31
Obrázek 11: Princip heterostruktury a uspořádání pro úzký svazek paprsků [4]	31
Obrázek 12: Schématická značka fotorezistoru [21]	33
Obrázek 13: Schématická značka fotodiody [21]	34
Obrázek 14: Schématická značka fototranzistoru [21]	35
Obrázek 15: Fototranzistor v Darlingtonově zapojení [4]	36
Obrázek 16: Schématické značky fototyristoru a fototriaku [21]	37
Obrázek 17: Ideální průběh vstupní charakteristiky [29]	42
Obrázek 18: Ideální průběh výstupní charakteristiky [29]	42
Obrázek 19: Ideální průběh převodové charakteristiky [29]	42
Obrázek 20: Průběh obdélníkového signálu na vstupu a výstupu [29]	43
Obrázek 21: Schéma vnitřního zapojení HCPL-181 [24]	44
Obrázek 22: HCPL-181	45
Obrázek 23: Schéma vnitřního zapojení VTL5C9 [25]	46
Obrázek 24: VTL5C9	46
Obrázek 25: Schéma vnitřního zapojení 6N135-300E [26]	47
Obrázek 26: 6N135-300E	47
Obrázek 27: Schéma vnitřního zapojení MOCD223M [27]	48
Obrázek 28: Schéma zapojení pro měření vstupní charakteristiky optronu [29]	49
Obrázek 29: Schéma zapojení pro měření výstupní charakteristiky optronu [29]	50
Obrázek 30: Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností optronu [29]	51
Obrázek 31: Základna – kovová deska	52
Obrázek 32: Osazený plošný spoj s HCPL-181	53

Obrázek 33: 6N135-300E – optron s fotodiodou a tranzistorem.....	54
Obrázek 34: Zkompletovaná úloha pro měření vlastností optronů.....	54
Obrázek 35: Celkové zapojení pro měření vstupních charakteristik optronu.....	57
Obrázek 36: Graf vstupní charakteristiky	57
Obrázek 37: Celkové zapojení pro měření výstupních a převodových charakteristik optronu.....	58
Obrázek 38: Graf výstupní charakteristiky	59
Obrázek 39: Graf převodové charakteristiky	60
Obrázek 40: Průběh vstupního a výstupního signálu.....	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Frekvence a vlnové délky viditelných barev [15]	17
Tabulka 2: Barvy a svítivost LED diod [3], [4]	30

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Zpracovaná data z měření ve formě protokolu

Příloha P II: Návrh zadání na měření laboratorní úlohy

PŘÍLOHA P I: ZPRACOVANÁ DATA Z MĚŘENÍ VE FORMĚ PROTOKOLU

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky Institut řízení procesů a aplikované informatiky				
Předmět:		Senzory		
Název úlohy:		Měření statických a dynamických vlastností optronů		
Číslo úlohy: I				
Datum: 25. 5. 2013	Jméno:	Vlastimil Roháček	Hodnocení:	
Skupina: 3B3				

Úkol:

1. Změřte vstupní charakteristiku optoelektronického vazebního členu
2. Změřte výstupní charakteristiku optoelektronického vazebního členu
3. Změřte převodovou charakteristiku optoelektronického vazebního členu
4. Ověřte dobu náběhu a dobu doběhu optoelektronického vazebního členu s hodnotami uvedenými v technické dokumentaci

Teoretický úvod:

Optoelektrický vazební člen (optron, optočlen) je označení pro elektronické součástky, kde je vnitřní vazba mezi elektrickým vstupním a výstupním signálem obstarána pomocí světelného záření (nejčastěji v oblasti infračerveného spektra).

Schématická značka této součástky:



Obr. 1: Schématická značka optronu

Optočlen se skládá z optronové dvojice. Tu tvoří zdroj a detektor optického záření v jednom pouzdře. Ze zdroje optického záření se generuje světelný signál, který je závislý na velikosti vstupního elektrického signálu. Ten je přijímán detektorem optického záření, převáděn zpět na elektrický signál a případně předán na vstup navazujícího elektronického obvodu, nebo součástky. Mezi zdrojem a detektorem se nenachází vodivé propojení, jsou galvanicky oddělené. Proto se využívají pro galvanické oddělení dvou různých elektronických obvodů, nebo k oddělení elektronického zařízení od vnějšího prostředí. Optrony se také používají pro přenosy analogových (střídavých i stejnosměrných) nebo datových signálů.

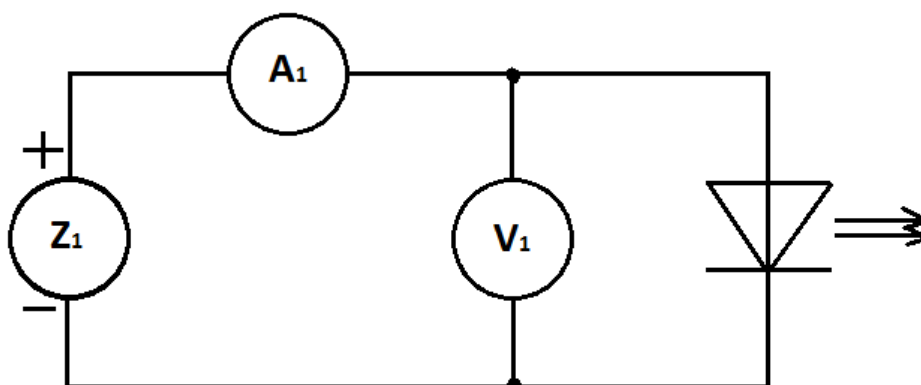
Vysílací část (vstupní) je nejčastěji realizována pomocí LED diod, jako přijímací část (výstupní) se používají fototranzistory, fotorezistory, fotodiody, fototriaky a fototyristory.

Použité pomůcky:

- Stejnosměrný programovatelný zdroj ARRAY 3645A (2x)
- Funkční generátor Agilent 33210A
- Osciloskop Agilent DSO3062A
- Číslicový měřicí přístroj METEX M-3860M
- Číslicový měřicí přístroj CEM DT-9602 (2x)
- Přípravek s optrony

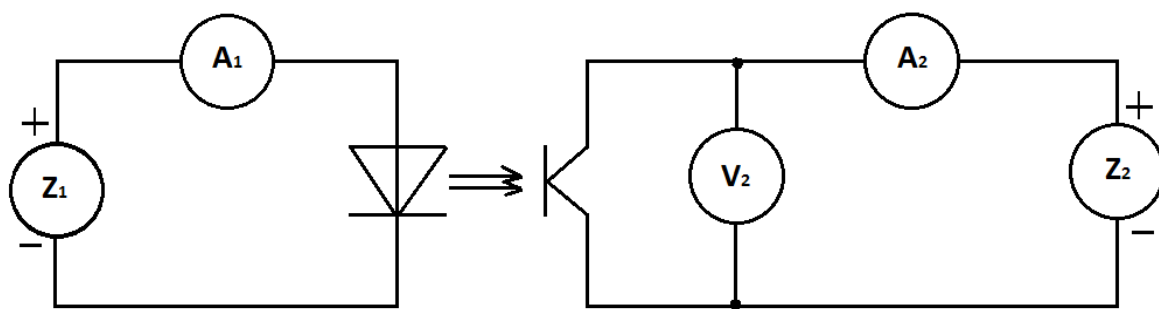
Schémata zapojení:

Ad1:



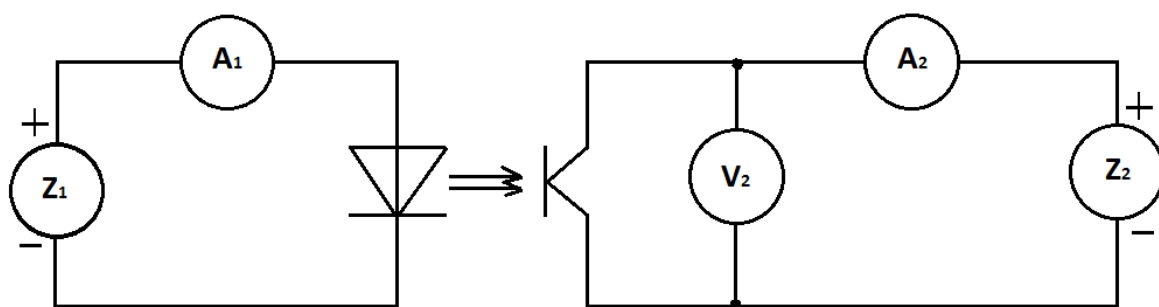
Obr. 2: Schéma zapojení pro měření vstupní charakteristiky

Ad2:



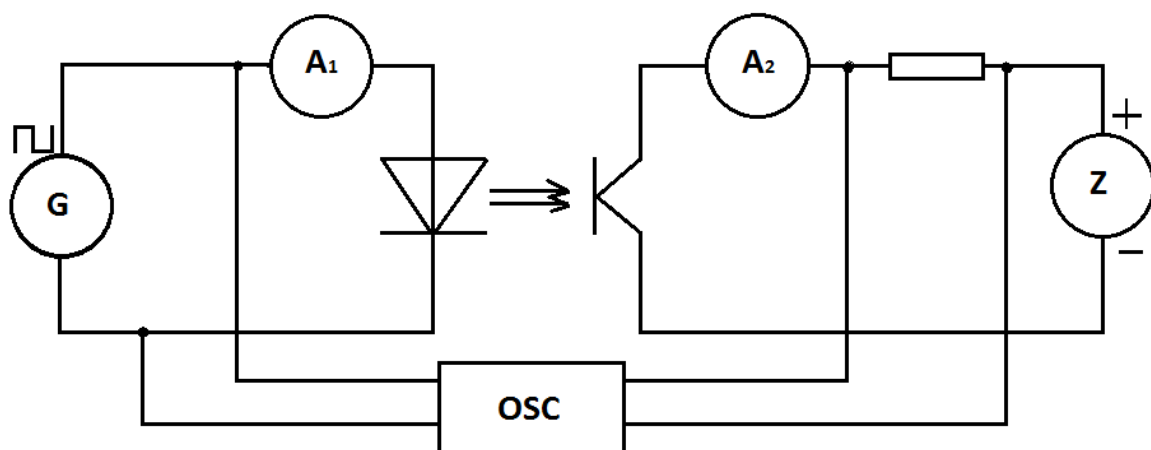
Obr. 3: Schéma zapojení pro měření výstupní charakteristiky

Ad3:



Obr. 4: Schéma zapojení pro měření převodové charakteristiky

Ad4:



Obr. 5: Schéma zapojení pro měření spínacích dob (doba náběhu a doběhu)

Postupy měření:

Ad1:

Po zapojení obvodu dle schématu zapojení se postupně mění hodnota napětí na zdroji Z_1 v rozmezí 0 – 1,35 V DC, po překročení hodnoty 0,9 V začíná docházet ke změnám proudu. Proto byl zvolen krok 0,1 V pro 0 - 0,9 V DC a krok 0,05 V pro vyšší hodnoty. Do tabulek se zapisovaly odečtené hodnoty proudu I_F (A_1) a napětí U_F (V_1). Grafickým výstupem je závislost tohoto proudu a napětí.

Ad2:

Obvod se zapojil dle příslušného schématu zapojení. Na zdroji napětí Z_1 se nastavilo takové napětí, aby proud I_F (A_1) byl 5 mA DC. Postupně se měnila hodnota napětí na zdroji Z_2 v rozmezí 0 – 2 V DC s krokem 0,1 V. Do tabulek se zapisovaly odečtené hodnoty napětí U_{CE} (V_2) a proudu I_C (A_2). Měření se opakovalo také pro hodnoty proudů I_F 10 a 15 mA DC. Grafickým výstupem je závislost proudů I_C na napětí U_{CE} pro všechny hodnoty proudu I_F .

Ad3:

Po zapojení obvodu dle schématu zapojení se na zdroji napětí Z_2 nastavilo takové napětí, aby napětí U_{CE} (V_2) bylo 1 V DC. Postupně se měnila hodnota napětí na zdroji Z_1 v rozmezí 0 – 1,35 V, obdobně jako u měření vstupní charakteristiky. Do tabulek se zapisovaly odečtené hodnoty proudu I_F (A_1) a proudu I_C (A_2). Měření se opakovalo také pro hodnotu napětí U_{CE} 2 V. Grafickým výstupem je závislost proudu I_C na proudu I_F .

Ad4:

Nejdříve se úloha zapojila dle schématu zapojení. Na zdroji napětí Z_2 se nastavilo napětí 3,6 V. Amplituda obdélníkového signálu jdoucího z funkčního generátoru se nastavila na 2 V. Postupně se měnila frekvence vstupního obdélníkového signálu na hodnoty 1, 10, 50 a 100 kHz. Na připojených ampérmetrech se dá sledovat, jestli nejsou překročeny maximální přípustné hodnoty proudu optonu. Zobrazené signály byly uloženy.

Naměřené hodnoty:

Ad1:

U_{Z1} [V]	U_F [V]	I_F [mA]
0	0,000	0,00
0,1	0,099	0,00
0,2	0,200	0,00
0,3	0,300	0,00
0,4	0,401	0,00
0,5	0,501	0,00
0,6	0,602	0,00
0,7	0,703	0,00
0,8	0,803	0,00
0,9	0,904	0,02
0,95	0,954	0,03
1,00	1,005	0,11
1,05	1,055	0,41
1,10	1,106	1,56
1,15	1,156	4,27
1,20	1,206	10,22
1,25	1,256	18,84
1,30	1,306	29,49
1,35	1,356	41,60

Tab. 1: Naměřené hodnoty pro vstupní charakteristiku

Ad2:

$I_F = 5 \text{ mA}$			$I_F = 10 \text{ mA}$			$I_F = 15 \text{ mA}$		
U_{Z2} [V]	U_{CE} [V]	I_C [mA]	U_{Z2} [V]	U_{CE} [V]	I_C [mA]	U_{Z2} [V]	U_{CE} [V]	I_C [mA]
0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,00
0,1	0,078	1,62	0,1	0,085	2,35	0,1	0,081	2,77
0,2	0,133	5,07	0,2	0,117	6,31	0,2	0,108	6,97
0,3	0,189	8,48	0,3	0,162	10,52	0,3	0,150	11,46
0,4	0,261	10,65	0,4	0,213	14,25	0,4	0,194	15,73
0,5	0,346	11,88	0,5	0,279	17,00	0,5	0,248	19,33
0,6	0,433	12,90	0,6	0,515	20,80	0,6	0,314	25,50
0,7	0,521	13,83	0,7	0,610	22,10	0,7	0,592	26,90
0,8	0,610	14,72	0,8	0,706	23,30	0,8	0,687	28,30
0,9	0,701	15,53	0,9	0,802	24,50	0,9	0,783	29,60
1,0	0,792	16,29	1,0	0,898	25,70	1,0	0,878	30,80

1,1	0,883	17,00	1,1	0,994	26,80	1,1	0,974	32,10
1,2	0,976	17,57	1,2	1,090	27,90	1,2	1,070	33,20
1,3	1,070	18,12	1,3	1,186	28,90	1,3	1,165	34,40
1,4	1,164	18,64	1,4	1,283	29,90	1,4	1,261	35,50
1,5	1,427	19,80	1,5	1,380	30,90	1,5	1,357	36,70
1,6	1,526	20,20	1,6	1,476	31,80	1,6	1,454	37,70
1,7	1,624	20,70	1,7	1,573	32,70	1,7	1,550	38,80
1,8	1,723	21,10	1,8	1,670	33,50	1,8	1,646	39,80
1,9	1,822	21,50	1,9	1,767	34,30	1,9	1,743	40,70
2,0	1,920	21,90	2,0	1,864	35,00	2,0	1,839	41,70

Tab. 2: Naměřené hodnoty pro výstupní charakteristiku

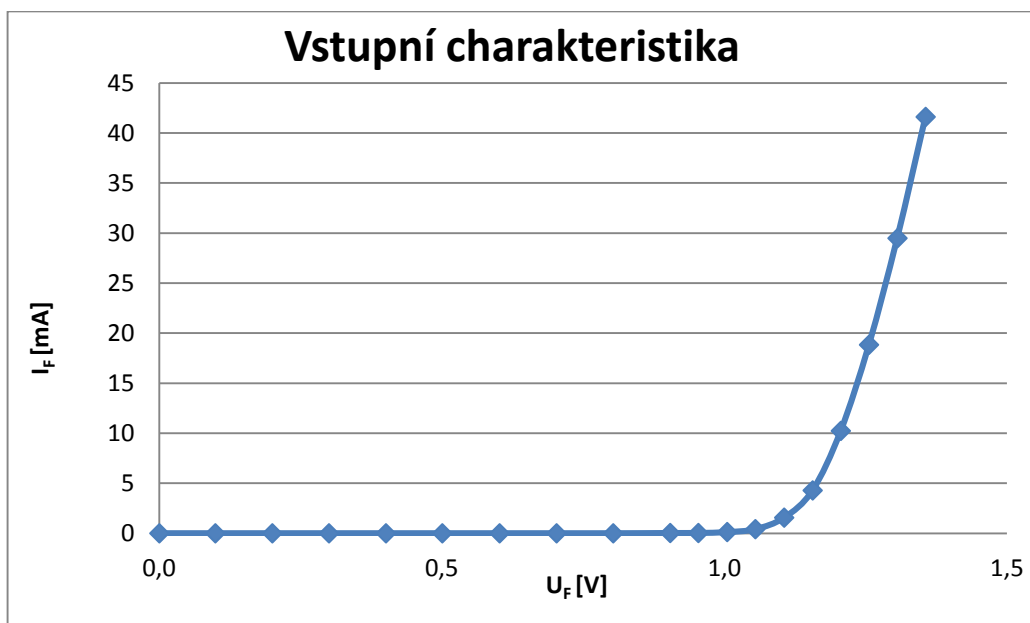
Ad3:

$U_{CE} = 1 \text{ V}$			$U_{CE} = 2 \text{ V}$		
$U_{Z1} [\text{V}]$	$I_F [\text{mA}]$	$I_C [\text{mA}]$	$U_{Z1} [\text{V}]$	$I_F [\text{mA}]$	$I_C [\text{mA}]$
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00
0,30	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00
0,40	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00
0,60	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
0,70	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00
0,80	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00
0,90	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00
0,95	0,02	0,00	0,95	0,03	0,00
1,00	0,15	0,07	1,00	0,16	0,13
1,05	0,41	0,60	1,05	0,45	0,64
1,10	1,48	3,76	1,10	1,54	4,00
1,15	4,45	14,72	1,15	4,69	18,10
1,20	10,75	26,00	1,20	11,80	35,40
1,25	19,73	34,20	1,25	21,28	45,60
1,30	30,76	41,20	1,30	32,89	53,00
1,35	42,90	47,30	1,35	45,50	58,80

Tab. 3: Naměřené hodnoty pro převodovou charakteristiku

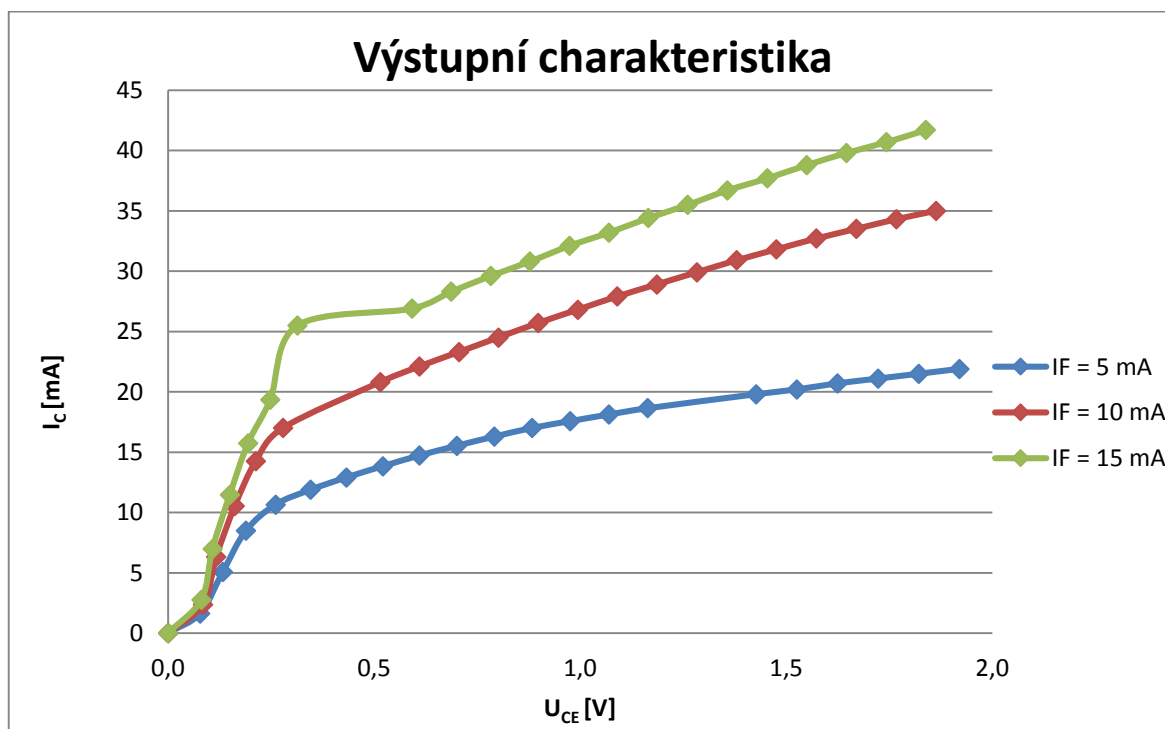
Grafy:

Ad1:



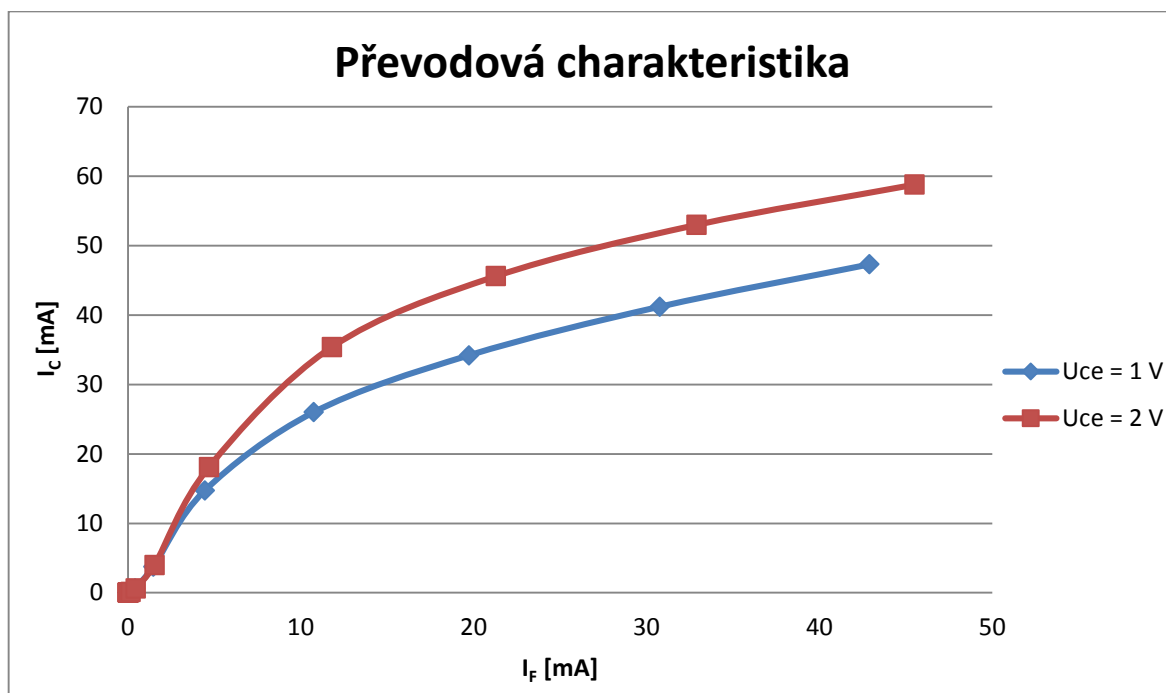
Obrázek 6: Grafické znázornění vstupní charakteristiky

Ad2:



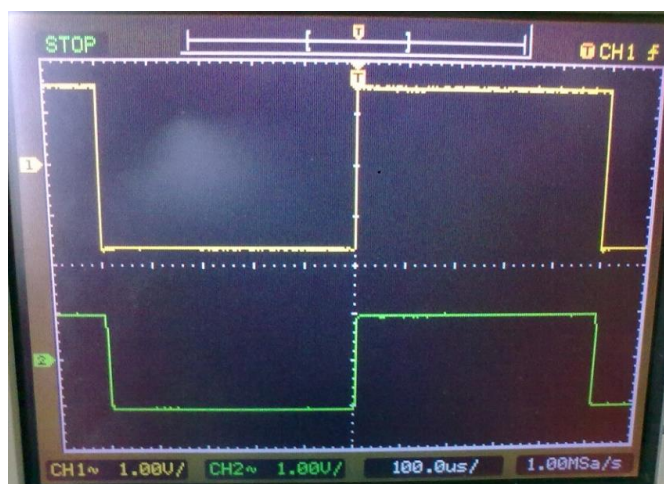
Obrázek 7: Grafické znázornění výstupní charakteristiky

Ad3:

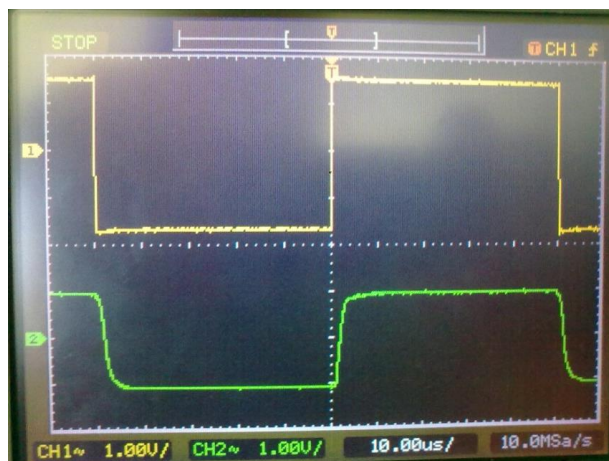


Obrázek 8: Grafické znázornění převodové charakteristiky

Ad4:



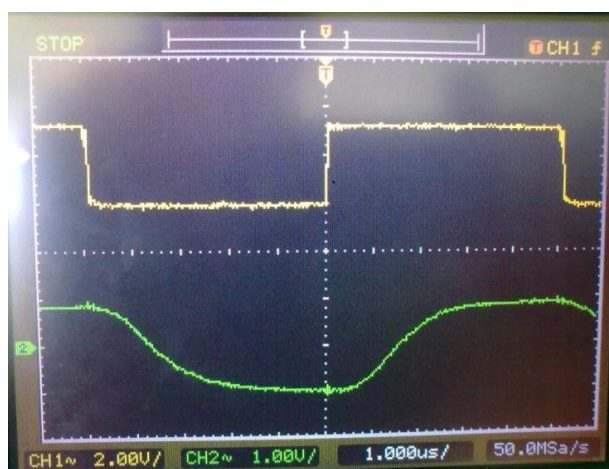
Obrázek 9: Uložený průběh signálů pro frekvenci 1 kHz



Obrázek 10: Uložený průběh signálů pro frekvenci 10 kHz

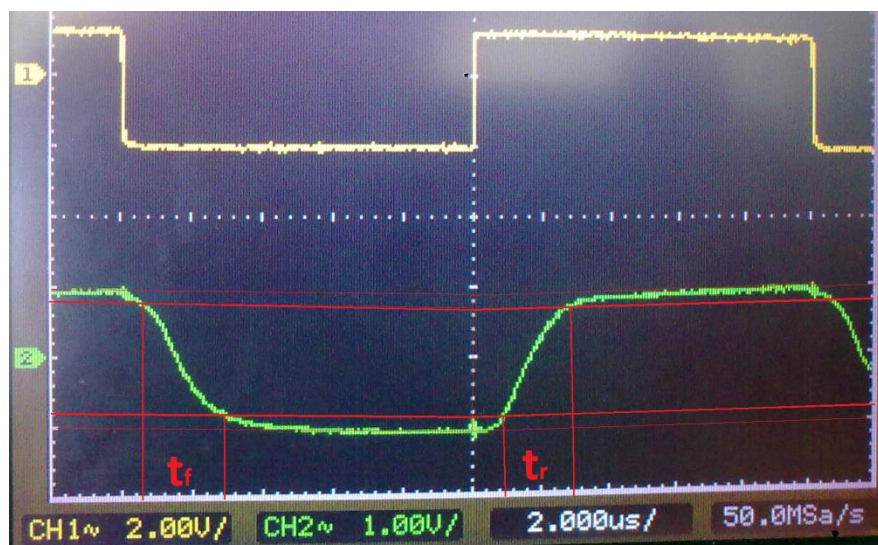


Obrázek 11: Uložený průběh signálů pro frekvenci 50 kHz



Obrázek 12: Uložený průběh signálů pro frekvenci 100 kHz

Odečet dob náběhu (t_r) a doběhu (t_f) z vybraného průběhu (50 kHz):



Obrázek 13: Odečtení doby náběhu a doběhu pro frekvenci 50 kHz

Z obrázku vyplývá, že doba náběhu t_r (změna z 10 % na 90 % maximální hodnoty) je 2 μ s.

Doba doběhu t_f (změna z 90 % na 10 % maximální hodnoty) je 2,2 μ s.

Výrobce udává v technické specifikaci hodnoty $t_r = 4 \mu$ s a $t_f = 3 \mu$ s.

Zhodnocení měření:

Naměřené statické vlastnosti odpovídají teoretickým předpokladům. Malá odchylka nastala při měření výstupní charakteristiky při proudu LED diodou $I_F = 15$ mA DC. Tato hodnota vyčnívající z grafu je pravděpodobně způsobena přepnutím rozsahu na číslicovém ampérmetru.

Při měření dynamických vlastností nastal problém s přijetím USB flash disku, proto jsou průběhy signálů pouze vyfocené z displeje osciloskopu. Tím je snížena přesnost odečtu dob náběhu a doběhu. I přesto se odečtené hodnoty výrazně neliší od hodnot udávaných výrobcem. Ověřování dynamických vlastností optronu také prokázalo, že čím je vyšší hodnota kmitočtu vstupního signálu, tím je výstupní signál více reálný (zaoblený).

PŘÍLOHA PII: NÁVRH ZADÁNÍ NA MĚŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Tato externí příloha obsahuje i technickou dokumentaci k jednotlivým typům optoelektronických vazebních členů, tzn. HCPL-181, VTL5C9, 6N135-300E a MOCD223M.