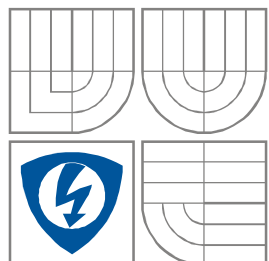


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTOELEKTRONICKÉ MĚŘICÍ METODY OPTO-ELECTRONICAL MEASUREMENT METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Antonín Kvapil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Antonín Kvapil
Bytem: Hanáckého pluku 17, Olomouc, 779 00
Narozen/a (datum a místo): 25. října 1984 v Olomouci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Optoelektronické měřicí metody

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou měření výkonu i složek elektrického a magnetického pole. V práci je proveden rozbor metod pro měření pulsního napětí, proudu a okamžitého výkonu elektromagnetického pulsu. Je navržena metoda a pracoviště pro měření okamžitého výkonu elektromagnetického pulsu. Vybraná měřicí metoda je experimentálně realizována.

Klíčová slova

Elektromagnetický puls, pulsní výkonový generátor, pulsní mikrovlnný generátor, magneto-optický jev, elektro-optický jev, optoelektronický senzor, indukční senzor, magneto-optický senzor.

Abstract

This thesis deals with the aspects of methods for power and elements of electric and magnetic field measurement. Analysis of methods are performed for measuring pulsed voltage, current and power electromagnetic puls in this thesis. The method and workplace for measuring power of electromagnetic field is designed. The measurement method has been experimentally realized.

Keywords

Electromagnetic pulse, pulsed power generator, pulse microwave generator, magneto-optic effect, electro-optic effect, opto-electronic sensor, inductive sensor, magneto-optic sensor.

Bibliografická citace práce

KVAPIL, A. *Optoelektronické měřicí metody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Optoelektronické měřicí metody jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Fialovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2008

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	10
1 Optoelektronika.....	11
2 Optické záření jako elektromagnetické vlnění.....	12
3 Magnetooptické a elektro-optické jevy.....	14
3.1 Faradayův jev.....	14
3.2 Kerrův jev.....	14
3.3 Pockelsův jev.....	15
3.4 Elektrogyreční jev.....	16
3.5 Fotoelastický jev.....	16
4 Měřicí metody.....	17
4.1 Měření elektrického a magnetického pole.....	17
4.2 Proudový bočník.....	18
4.3 Rogowského senzory.....	18
4.4 Ortokonjugální reflektor.....	19
4.5 Teorie zpětného rozptylu světla v optických vláknech.....	20
4.6 Optical Time Domain Reflectometry.....	20
4.7 Polarization Time Domain Reflectometry.....	20
4.8 Optical Frequency Domain Reflectometry.....	21
5 Měření okamžitého výkonu pulsu.....	22
6 Experimentální ověření měření okamžitého výkonu a magneto-optického senzoru.....	23
6.1 Bezindukční dělič vysokého napětí pro extrémní podmínky.....	27
7 Indukční a magneto-optické senzory.....	31
7.1 Indukční senzory magnetického pole.....	31
7.2 Magneto-optické senzory.....	31
8 Komunikační systém.....	34
8.1 Vysílač.....	34
8.2 Komunikační kanál.....	34
8.3 Optická vlákna.....	35
8.4 Výstupní vazební člen.....	39
8.5 Fotodetektor.....	39
8.6 Signálový procesor.....	40
8.7 Přijímač.....	40
Závěr.....	41
Seznam literatury.....	42
Rejstřík obrázků.....	43

Úvod

V „klasické“ fyzice je na světlo (a zde budeme pod pojmem světlo uvažovat „světlo“ v širším smyslu, to znamená již od infračervené oblasti) v partiích optiky nahlíženo ze dvou pohledů.

Jednak podle staršího, spíše uchopitelného pohledu jako na paprsky, které se šíří prostředím podle určitých pravidel, a druhým náhledem, z pohledu skutečného šíření exaktnějším, je vlnová optika. Ve vlnové optice je jedním z nejčastěji probíraných témat problematika moderních optických vláknových senzorů fyzikálních veličin. V poslední době je jí věnována velká pozornost a to jak ve vědě, tak i v technické praxi. Optoelektronika našla uplatnění v telekomunikačních, zobrazovacích, měřicích, řídicích a výpočetních systémech.

V současné době se problematikou měření pulsních proudů, napětí a výkonů elektromagnetických pulsů zabývají laboratoře po celém světě. Nově vytvořené metody měření těchto veličin jsou zatím většinou obtížné a zvláště pro měření okamžitého výkonu složité. Samotné měření okamžitého výkonu elektromagnetického pulsu se provádí na základě měření napětí a proudu, kde výsledný okamžitý výkon musí být vypočten, protože tento výkon se měří nepřímými metodami.

1 Optoelektronika

Optoelektronika se týká zařízení, která reagují na optický výkon, emitují nebo modifikují optické záření nebo využívají optické záření pro svou vnitřní funkci.

Je to dominantní technika pro získávání, skladování, zpracovávání a přenos informace. Rozsah potenciálních aplikací se rozšiřuje s novými materiály, zařízeními a systémy. Patří sem jakékoliv zařízení, které funguje jako elektrooptický nebo optickoelektrický převodník.

Optoelektronika studuje metody zpracování elektrického a optického signálu založené na elektrické nebo elektronické vazbě a na vazbě optické mezi vysílači optického signálu a detektory fotonů (přijímači optického signálu). Zpracováním se rozumí zesilování elektrického nebo optického signálu analogového, jeho převod z elektrického na optický nebo naopak, kmitočtová transpozice signálu elektrického, respektive spektrální transpozice signálu optického, směšování signálů. Dále logické operace se signály číslicovými, a to jak elektrickými, tak optickými.

Všeobecně se za základ optoelektroniky považuje prvek nazývaný optron. Optron je v podstatě fotonický měnič, jenž se v základní podobě skládá ze zdroje záření, fotoelektrického detektoru a prostředí mezi nimi, kterým se vede záření [5].

Optoelektronika se zabývá celým spektrem oborů:

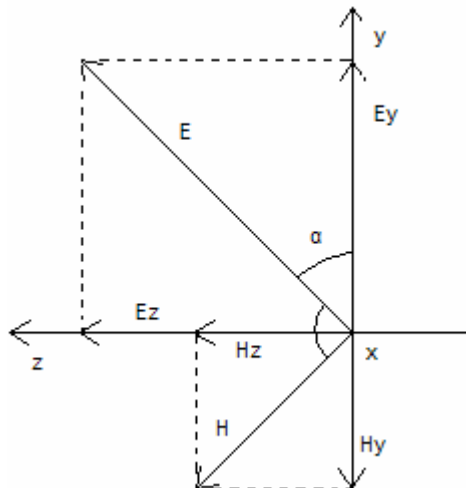
- základním výzkumem amorfních polovodičů, skel, kapalných krystalů, a dalších nových elektrooptických materiálů,
- vývojem zařízení založených na supermřížkách a tunelových strukturách,
- optoelektronickými světelnými zdroji, jako jsou lasery všeho druhu a LED,
- holografií,
- výrobou a zkoušením spolehlivosti optoelektronických součástí,
- optickými senzory a jejich integrací, zobrazovacími zařízeními a zpracováním obrazu,
- dálkovým optickým průzkumem, optickými vláknovými senzory a sítěmi,
- optickými paměťmi, akumulací a zpracováním optického signálu,
- aplikacemi optoelektroniky např. v komunikacích a výpočetní technice.

Technické využití :

- komunikace (sdělování),
- ukládání informací (záznam),
- získávání externích dat,
- řízení (robotika, automatizace).

2 Optické záření jako elektromagnetické vlnění

Optické záření můžeme chápat jako elektromagnetické vlnění. Pokud se šíří rovinná vlna, jsou vektory intenzity elektrického pole E a intenzity magnetického pole H na sebe navzájem kolmé a současně leží v rovině, která je kolmá na směr šíření záření [4].



Obrázek 1 Vektory intenzity elektrického a magnetického pole u rovinného elektromagnetického vlnění

Předpokládejme souřadný systém podle obrázku 1, v němž se ve směru osy x , která je kolmá k nákrešné rovině a vystupuje z ní, šíří elektromagnetické rovinné vlny. Vlnění nechť je polarizováno tak, že vektor intenzity elektrického pole E se vyskytuje pouze v jedné rovině, která svírá úhel α s rovinou os x a y . Pak budou složky ve směru osy x nulové

$$E_x = 0, \quad H_x = 0 \quad (1,2)$$

a velikost složek vektoru intenzity elektrického pole ve směru y a z bude záviset na uvažovaném místě a času. Pro jednotlivé složky ve směru osy y a z lze napsat

$$E_y(x, t) = E_{0y} \sin \omega(t - \frac{x}{v}), \quad E_z(x, t) = E_{0z} \sin \omega(t - \frac{x}{v}), \quad (3,4)$$

kde E_{0y} a E_{0z} jsou amplitudy složek E_y a E_z ve směru osy y a z , v je rychlost šíření vlnění v daném izotropním prostředí, ω je úhlový kmitočet vlnění a x vzdálenost vyšetřovaného bodu ve směru osy x od počátku. Pro složky intenzity magnetického pole s využitím Maxwellových rovnic pak bude platit, že

$$H_y = -\sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_r}{\mu_0}} E_z, \quad H_z = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_r}{\mu_0}} E_y \quad (5,6)$$

a mezi velikostmi elektrického a magnetického pole v nevodivém neferomagnetickém prostředí platí vztah

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0}} E \quad (7)$$

Pro vyhodnocení vlnění stačí pak znát průběh jen jeho jedné části, např. intenzity elektrického pole, průběh druhé se určí z výše uvedených rovnic.

3 Magnetooptické a elektro-optické jevy

3.1 Faradayův jev

V roce 1831 Michael Faraday objevil na základě svých pokusů vztah pro velikost napětí U_i indukovaného na jednom závitě:

$$U_i = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}, \quad (8)$$

kde $\Delta\phi$ je změna magnetického indukčního toku za čas Δt .

Je-li závitů N , platí

$$U_i = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (9)$$

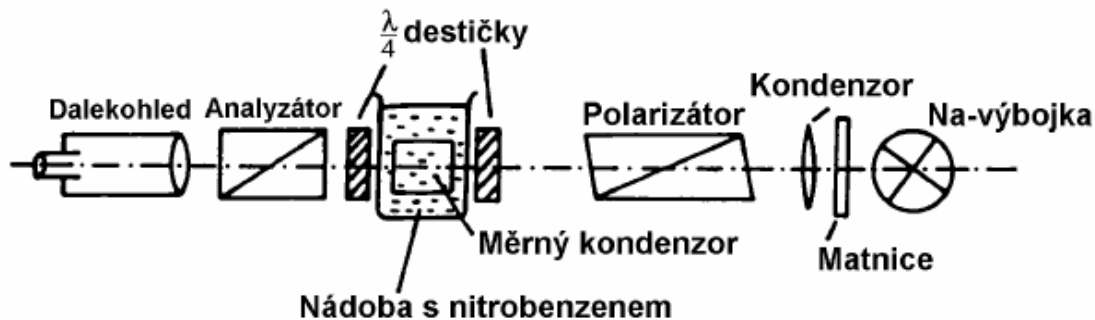
Platí tedy :

- čím rychleji se mění magnetické pole v cívce, tím větší napětí se indukuje na jejích vývodech;
- při stejné rychlosti změny magnetického pole se vyšší napětí indukuje na cívce, která je umístěna v silnějším magnetickém poli a má průřez o větší ploše;
- i na nepohyblivé cívce v homogenním magnetickém poli se může indukovat napětí; stačí, když se s časem mění průřez cívky;
- čím více závitů cívka má, tím je indukované napětí větší;
- když přiblížíme tyčový magnet k cívce naplocho, napětí se neindukuje, protože se nemění magnetický indukční tok cívkou (siločáry magnetického pole magnetu jsou kolmé na osu cívky, magnetický indukční tok cívkou je tedy stále prakticky nulový).

3.2 Kerrův jev

- kvadratický elektrooptický jev,
- vznik dvojlomu v opticky izotropních prostředích (kapaliny, skla, středově symetrické krystaly),
- spočívá v tom, že izotropní látka umístěná do elektrického pole se stává látkou anizotropní, nabývá vlastnosti jednoosého krystalu s optickou osou, jejíž směr je rovnoběžný se směrem vektoru intenzity elektrického pole,
- je-li přiloženo elektrické pole k látkám majícím dipólový moment, pak toto pole způsobuje orientaci molekul ve směru elektrického pole (tzv. **orientační Kerrův jev**),
- pro látky, jejichž molekuly nevykazují vlastní dipólový moment, přiložení elektrického pole dipólový moment indukuje (tzv. **polarizační Kerrův jev**).

Kerrův jev tedy souvisí s orientací molekul látky v elektrickém poli. K jeho měření lze v zásadě užít stejnosměrného nebo střídavého napětí, jehož frekvence však nesmí přesáhnout hodnotu, kdy se projevuje disperze permitivity (nad touto frekvencí můžeme očekávat frekvenční závislost Kerrovy konstanty).



Obrázek 2 Měření Kerrova elektro-optického jevu

- rovina polarizovaného světla odraženého do magnetického povrchu se otočí ve směru hodinových ručiček nebo proti jejich směru v závislosti na magnetické orientaci povrchu. Laserový paprsek používaný u MO disků se otočí ve směru hodinových ručiček, pokud se odrazí od místa reprezentující binární hodnotu 1, a proti směru hodinových ručiček při odrazu od místa reprezentující 0. Změnu polarity odraženého paprsku lze snadno detekovat a přeměnit na posloupnost elektrických signálů,
- isotropní kapalina o indexu lomu n se stane dvojlomnou tím, že její molekuly se orientují do směru elektrického pole.

3.3 Pockelsův jev

- lineární elektrooptický jev,
- změna indexu lomu anizotropního prostředí úměrná intenzitě přiloženého pole,
- přiložené napětí indukuje dvojlom; z jednoosého krystalu dělá krystal dvojosý,
- s objevem laserů našel široké uplatnění, na jeho principu byla navržena řada přístrojů, elektrooptických modulátorů, elektrooptických závěrek pro rychlé Q-spínání.

Pod Pockelsovým jevem tedy rozumíme změnu optické anizotropie pevných látek prostřednictvím elektrostatického pole rovnoběžného se směrem šíření světelného paprsku.

Přiložením elektrického pole na materiál dochází ke změně jeho optické permitivity (impermitivity). Je-li závislost změny na velikosti pole lineární, jde o lineární (Pockelsův) elektrooptický jev, je-li kvadratická, jde o kvadratický (Kerrův) elektrooptický jev. Lineární (Pockelsův) jev nastává pouze v materiálech, jejichž fyzikální vlastnosti nejsou invariantní vůči záměně směru souřadnicových os (necentrosymetrický materiál).

Pokud umístíme mezi polarizátory kondenzátor bez elektrického pole a mezi desky kondenzátoru např. nádobu s nitrobenzenem, světlo analyzátozem neprojde. Po zapnutí pole se kapalina stane anizotropní, její optická osa je rovnoběžná se směrem pole. Poněvadž má tento jev velmi malou setrvačnost, lze jej používat modulaci světla.

V dvojlomých krystalech může elektrické pole působit změnu indexu lomu (Pockelsův jev). Použijeme-li například krystal vybroušený tak, aby z něj vycházelo lineární polarizované světlo, které analyzátozem nepropustí, stane se z tohoto světla po zapnutí pole elipticky polarizované, to už analyzátozem částečně propouští. Díky ještě menší setrvačnosti než u Kerrova jevu lze Pockelsův jev použít pro získání krátkých pulsů v laserech.

3.4 Elektrogyreční jev

- vzniká při působení elektrického pole na některé křišťály (např. křemen), ve kterých se šíří lineárně polarizované světlo;
- otočení roviny polarizace je úměrné intenzitě elektrického pole E a přejíté optické dráze L [1].

3.5 Fotoelastický jev

- optická anizotropie vyvolána vnějším silovým působením a mechanickou deformací původně opticky izotropní látky.
- takovou schopnost vykazuje např. obyčejné sklo nebo polymerní polymetylmetakrylát (plexisklo).
- optickou anizotropii je možno v pevných látkách (sklo), ale i v kapalinách (sirouhlík, nitrobenzen) vyvolat silným elektrostatickým polem.

4 Měřicí metody

4.1 Měření elektrického a magnetického pole

Pro měření základních parametrů jako jsou proud, intenzita a indukce elektrického a magnetického pole se využívají elektrooptické (Pockelsův a Kerrův) a magnetooptické (Faradayův, Cotton-Moutonův, Kerrův) jevy.

Nejčastější uspořádání nevlastních OVS pro tyto účely vychází z vlastností magnetostrikčních (topných) vrstev (tělísek) a jejich působení na optické vlákno.

Pro snímání intenzity elektrického pole se používá piezoelektrická vrstva. Složením vrstvy a jejími rozměry se ovlivňuje citlivost na měřenou veličinu a kompenzuje vliv ostatních působících (parazitních) veličin [1].

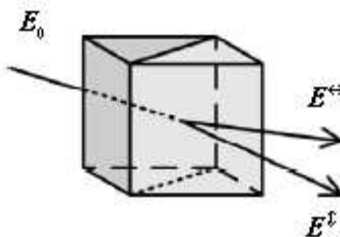
Abychom mohli vybrat vhodné metody pro měření pulsního proudu, napětí a špičkového výkonu elektromagnetického pulsu musíme vycházet z předpokládaných hodnot měřených veličin a jejich časových průběhů. Současné metody nám dávají informace o velikosti pulsního proudu a napětí dodávaného pulsním výkonovým generátorem. Výkon můžeme určit z hodnot pulsního proudu a napětí [6].

Nemůžeme použít klasické metody pro měření proudu (například metodu proudového bočníku). Pulsní napětí se dá měřit díky speciálním vysokonapěťovým děličům anebo se vyskytuje možnost využít elektro-optické jevy. Elektro-optické jevy přiřazujeme jak vybraným krystalům, tak i amorfním látkám.

K nejvýznamnějším jevům počítáme lineární elektro-optický jev (Pockelsův jev) a kvadratický elektro-optický jev (Kerrův jev), kterými jsme se zabývali výše. Tyto jevy se obecně vyskytují současně. V sensorové technice je důležitý Pockelsův jev zvláště kvůli své linearitě.

Pro popis vlivu elektro-optických jevů na šíření světla využíváme představu, že každá světelná vlna je superpozicí dvou vln, které mají navzájem kolmé polarizace elektrické složky E . Složky se budou šířit různými rychlostmi, pokud světelná vlna prochází prostředím, kde pro každou z jejích složek vykazuje jinou hodnotu indexu lomu n . Dojde k fázovému posuvu složek a výsledná polarizace se změní. Elektro-optický jev má v krystalech malou setrvačnost. Díky tomu se dají konstruovat modulátory s šířkou pásma stovek GHz.

Na pozici analyzátoru je možné použít polarizační dělič svazku, tudíž získáme dva výstupní optické signály s ortogonálními polarizacemi E_{\leftrightarrow} a E_{\updownarrow} .



Obrázek 3 Polarizační dělič svazku

Aplikace elektro-optických senzorů je příhodnou možností pro měření velkých pulsních napětí. Výhodou je vysoký horní mezní kmitočet, vhodná citlivost, která je upravitelná.

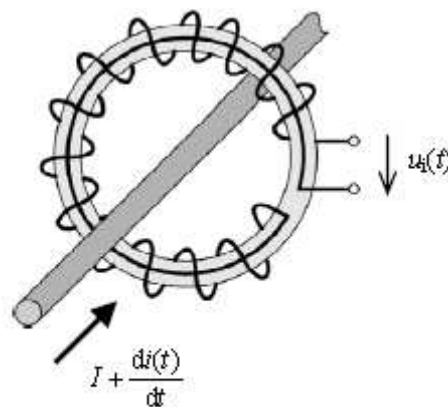
Mezi polarizátor – analyzátor zařadíme krystal, abychom převedli polarizační modulaci na intenzitní modulaci, protože je složité zajistit přenos světelné vlny optickým vláknem tak, aby její polarizační stav nebyl změněn. Takto modulovaný signál je možné přenášet mnohovidovým optickým vláknem. V praxi ovšem vzniká problém s kolísáním intenzity svazku na výstupu mnohovidových vláken. Kvůli těmto problémům je vhodnější použít jednovidová vlákna (resp. polarizaci zachovávající vlákna) [6].

4.2 Proudový bočník

Proudový bočník se užívá pro měření velkých proudů. Jeho cena je relativně nízká a má jednoduchý vztah mezi úbytkem napětí a měřeným proudem. Pro velké proudy potřebujeme ale velmi nízké hodnoty odporu bočníku. Při měření časově proměnných proudů musí bočník vykazovat nízkou vlastní indukčnost, tím nedochází ke zkreslení tvaru a velikosti hodnoty měřeného průběhu. Při měření s vysokými napětími a proudy je nutné dát pozor na nebezpečí při obsluze měření a poškození měřících přístrojů [6].

4.3 Rogowského senzory

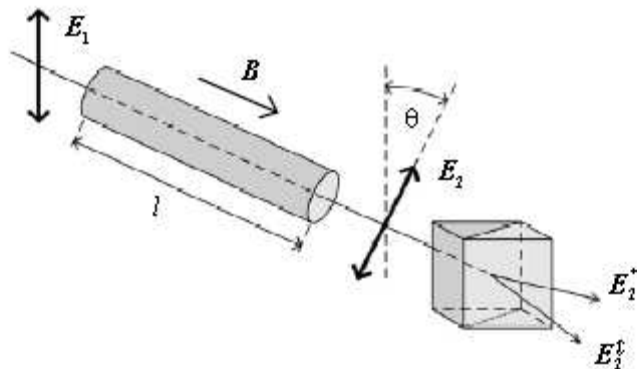
Pro indukční senzory elektrického proudu se často používají Rogowského senzory (Rogowského cívky). Rogowského cívka je přesný lineární sensor proudu pro přesné měření ve velkém rozsahu. Prakticky jde o toroidní cívku bez železného jádra (vzduchovou cívku) umístěnou kolem primárního měřeného vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí měřícího proudového transformátoru. Rogowského cívka jako měřící prvek měří změny proudu ve sledovaném vodiči díky indukovanému napětí ve vodiči cívky. Princip je tak podobný jako u běžného transformátoru. To znamená, že střídavý proud sledovaného vodiče vytváří kolem sebe střídavé magnetické pole, které způsobí indukci napětí ve vodiči toroidní vzduchové (Rogowského) cívky. Výsledné napětí je tak úměrné změně magnetického toku a tedy i hodnotě střídavého proudu, který ho vyvolal. Nejlepší metodou pro zpracování napětíového výstupu cívky je napětí elektronicky integrovat. Integrovaný výstup je frekvenčně nezávislý a přesně reprezentuje průběh měřeného proudu. Použitím vhodných integrátorů lze použít ohebné cívky na měření proudů v rozsahu od méně než jednoho ampéru až do několika milionů ampér.



Obrázek 4 Rogowského cívka jako senzor elektrického proudu

Pevné Rogowského cívky mají větší přesnost a stabilitu než ohebné cívky a jsou mimořádně odolné proti rušení způsobené vnějšími magnetickými poli. Jsou vhodnější na měření malých proudů a nižších frekvencí než ohebné cívky.

Funkce stočení roviny je lineární pro velmi silná pole pro diamagnetické a paramagnetické materiály. V případě, že se polarizační modulace vyhodnocuje polarimetricky je mezním stavem pro vyhodnocení úhel stočení $\theta = 45^\circ$.



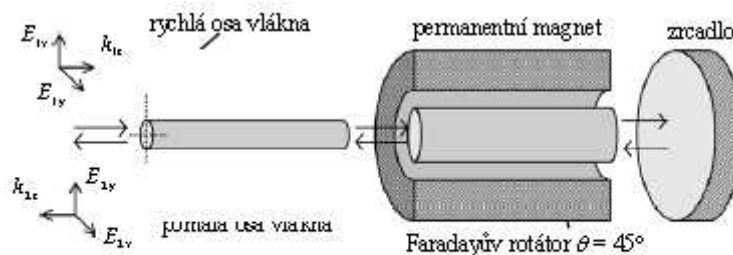
Obrázek 5 Polarimetrické vyhodnocení Faradayova magneto-optického jevu

Pro proudové senzory je možné využít několika uspořádání.

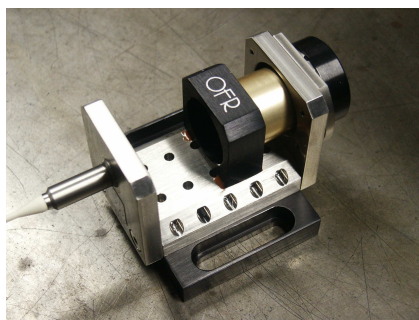
Jedno uspořádání je, že umístíme do blízkosti vodiče Faradayův rotátor. Tímto rotátorem prochází měřicí optický svazek. V rotátoru musí být minimalizován lineární dvojlom. Pro jeho potlačení použijeme jako rotátor mechanicky kroucené vlákno. Kroucení způsobí, že vlákno vykazuje vysoký kruhový dvojlom. Vliv lineárního dvojlomu můžeme zanedbat. Abychom potlačili parazitní dvojlom, konstruujeme senzory se zpětným šířením optického signálu. Světelná vlna projde rotátorem, odrazí se a prochází zpátky v opačném směru. Odražená vlna bude mít stočenou rovinu polarizace o dvakrát takový úhel než když jím projde pouze jedním směrem.

4.4 Ortokonjugační reflektor

Druhým způsobem je využití ortokonjugačního retroreflektoru (OKR). OKR je také nazýváno jako Faradayovo zrcadlo. OKR je odrazný optický komponent, který se skládá ze zrcadla a Faradayova rotátoru. Faradayův rotátor má úhlem stočení roviny polarizace $\theta = 45^\circ$



Obrázek 6 Schéma ortokonjugačního retroreflektoru



Obrázek 7 OKR - ortokonjugační retroreflektor

Lineárně polarizovaná vlna vstoupí do optického vlákna a je složena ze dvou ortogonálních lineárně polarizovaných složek. Tyto složky můžeme popsat jako vektory E_{1x} a E_{1y} . Dvojlomné optické vlákno má rychlou a pomalou osu. Obě osy mají rozdílný index lomu. Dojde k fázovému posuvu ortogonálních složek vstupní vlny a její polarizace se mění obecně na eliptickou. Vlna poté vstupuje do OKR. Jakmile poprvé projde Faradayovým rotátorem, stočí se směr její polarizace o úhel $\theta = 45^\circ$. Vlna se odrazí od zrcadla a projde zpět rotátorem v opačném směru. Výsledný úhel stočení roviny polarizace je $\theta = 90^\circ$. Vlna poté opět vstoupí do vlákna. Orientace vektorů E_{1x} a E_{1y} vůči dvojlomným osám je ale otočena o úhel $\theta = 90^\circ$. Složka vlny E_{1y} se nyní šíří větší rychlostí. Složka vlny E_{1x} je zpožděna. Ortogonální složky vlny jsou fázově posunuty, mají stejnou velikost akorát s opačným znaménkem. Výsledný fázový posuv je tak nulový. Výstupní polarizace vlny je lineární a je stočena o úhel $\theta = 90^\circ$. Takto je potlačen vlastní i indukovaný dvojlom [6].

4.5 Teorie zpětného rozptylu světla v optických vláknech

Ve stručnosti uvedené základy teorie zpětného rozptylu světla v optických vláknech.

Světelné impulsy z laseru se vedou do mnohavidového optického vlákna a rozptýlené světlo, které se vrací z optického vlákna, přechází přes optický vazební prvek a dopadá na detektor světla. Zpětně rozptýlené světlo je možné rozdělit na dvě části – světlo rozptýlené diskretními nehomogenitami optického vlákna a světlo, které vzniká jako důsledek distribuovaného (spojitého) rozptylu (např. Rayleighův rozptyl, Mieův rozptyl apod.). Kromě rozptylu se část světla šířícího se optickým vláknem absorbuje.

4.6 Optical Time Domain Reflectometry

Rozložené optické vláknové senzory využívají na snímání fyzikálních veličin, působících na sensorové optické vlákno, reflektometrické metody, které jsou založené na metodě zpětného rozptylu. Nejčastěji se využívá vliv fyzikální veličiny na tlumení optického vlákna. Nejpoužívanější metodou je optická reflektometrie v časové oblasti OTDR (Optical Time Domain Reflectometry); často se používá při měření tras optických vláknových komunikačních systémech. Metoda umožňuje identifikovat místo působení snímané veličiny a tlumení signálu vyvolané touto veličinou. Mírou tlumení je směrnice závislosti $\log I = f(t)$. Kde I je intenzita zpětného rozptýleného světla (úměrná amplitudě elektrického signálu z fotodetektoru) a t je čas.

Optické vláknové senzory založené na metodě OTDR se však nejčastěji používají na měření rozložení teploty [1].

4.7 Polarization Time Domain Reflectometry

Vyšší citlivost rozložených optických vláknových senzorů je možno dosáhnout měřením změn polarizace zpětně rozptýleného optického signálu namísto změny jeho

intenzity. Tento princip využívají rozložené optické senzory, založené na polarizační reflektometrii v časové oblasti POTDR (Polarization Time Domain Reflectometry). Používají se jednovidová optická vlákna zachovávající polarizaci (např. optická vlákna s eliptickým průřezem jádra, vlákna typu panda, motýlek apod.). Snímaná veličina mění polarizační vlastnosti sensorového optického vlákna, čím se mění polarizace zpětně rozptýleného optického signálu. Tyto změny se detekují pomocí dvou fotodetektorů. Systém POTDR se nejčastěji využívá na měření rozložených veličin, které není možné měřit systémem OTDR; např. na měření intenzity magnetického pole na základě Faradayova jevu, intenzity elektrického pole na základě Kerrova jevu apod. [1].

Z analýzy vyplývá, že využitím metody POTDR je možné konstruovat senzory s následujícími parametry:

- senzor intenzity magnetického pole (práh citlivosti přibližně 40 A.m⁻¹ při šířce frekvenčního pásma 10kHz),
- senzor intenzity elektrického pole (práh citlivosti přibližně 4.103 V.m⁻¹),
- senzor tlaku (práh citlivosti 3.104 N.m⁻² při přesnosti měření 1 %),
- senzor teploty (citlivost 5.105 T-1M-12, kde T je teplota (K) a M je počet optických impulsů použitých na jeho měření).

4.8 Optical Frequency Domain Reflectometry

Využití optické reflektometrie ve frekvenční oblasti OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) umožňuje použít metodu zpětného rozptylu i na krátkých úsecích optického vlákna, což by nebylo možné při metodě OTDR ani POTDR, protože tyto metody by vyžadovali extrémně rychlou odezvu použitých optoelektronických prvků.

Optický signál z laseru je frekvenčně modulován generátorem pilových kmitů. Zpětně rozptýlený signál z optického vlákna se smíchává se vstupním signálem. Změny spektra výsledného signálu jsou mírou místa působení a hodnoty snímané fyzikální veličiny [1].

Metoda OFDR se používá ve dvou modifikacích :

- **Nekoherentní metoda OFDR**
 - využívá frekvenční modulaci amplitudově modulované nosné vlny a nebo přímým modulováním polovodičového laseru, anebo použitím externího amplitudového modulátoru. Výhodou je možnost použít mnoharamenných optických vláken, použití je však omezené poměrně malým frekvenčním rozsahem.
- **Koherentní metoda OFDR**
 - náročnější na použití optických prvků, (jednopramenné optické vlákno, jednopramenný optický laser) její možnosti jsou však podstatně širší. Umožňuje získat frekvenční posun až 1 Khz na centimetr optického vlákna. Prostorová zesilovací schopnost optických vláknových senzorů založených na koherentní metodě OFDR je přibližně 3 mm. Maximální použitelná délka optického vlákna je (vzhledem na dosažitelnou koherenci použitého optického signálu) 10m. Tyto metody byly použité i na diagnostiku optických integrovaných obvodů.

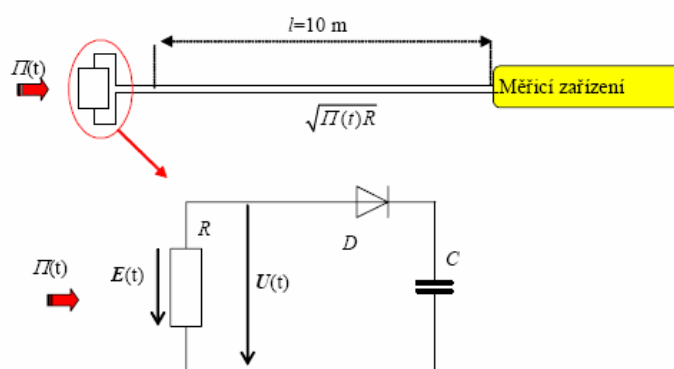
5 Měření okamžitého výkonu pulsu

Okamžitý výkon elektromagnetického pulsu můžeme charakterizovat velikostí Poyntingova vektoru $\Pi(t)$. Složky elektrického a magnetického pole mají úzkou souvislost, a proto musíme výkon interpretovat pouze na základě popisu elektrické složky pole.

$$\Pi(t) = |E(t) \times H(t)| = \frac{1}{c\mu_0} E^2(t) \quad (10)$$

Hlavní frekvenční složky pulsu byly očekávány ve frekvenčním rozsahu jednotek GHz.

Nemůžeme přímo měřit časový průběh elektrické složky $E(t)$, protože neznáme přesné spektrální složení pulsu. Z toho důvodu byla navržena měřicí metoda založená na obálkové detekci. Schematicky je metoda zobrazena na obrázku 4.



Obrázek 8 Principiální uspořádání metody měření okamžitého výkonu

Elektromagnetická vlna, která dopadá na frekvenčně nezávislý odpor R vyvolá rozdíl napětí $U(t)$ na terminálech odporu. Napětí na odporu je přímo úměrné odmocnině výkonu dopadající elektromagnetické vlny

$$U(t) = \sqrt{\Pi(t)R} . \quad (11)$$

Napětí na odporu R je snímáno detektorem s mikrovlnnou diodou D a kapacitou C . Lze tak získat časový průběh okamžité hodnoty výkonu představovaný detekovanou modulační obálkou pulsu. Pro zachování korektních podmínek měřicí metody je nutno zajistit frekvenční nezávislost odporu R a definovat způsob vazby složky elektrického pole na terminály odporu [6].

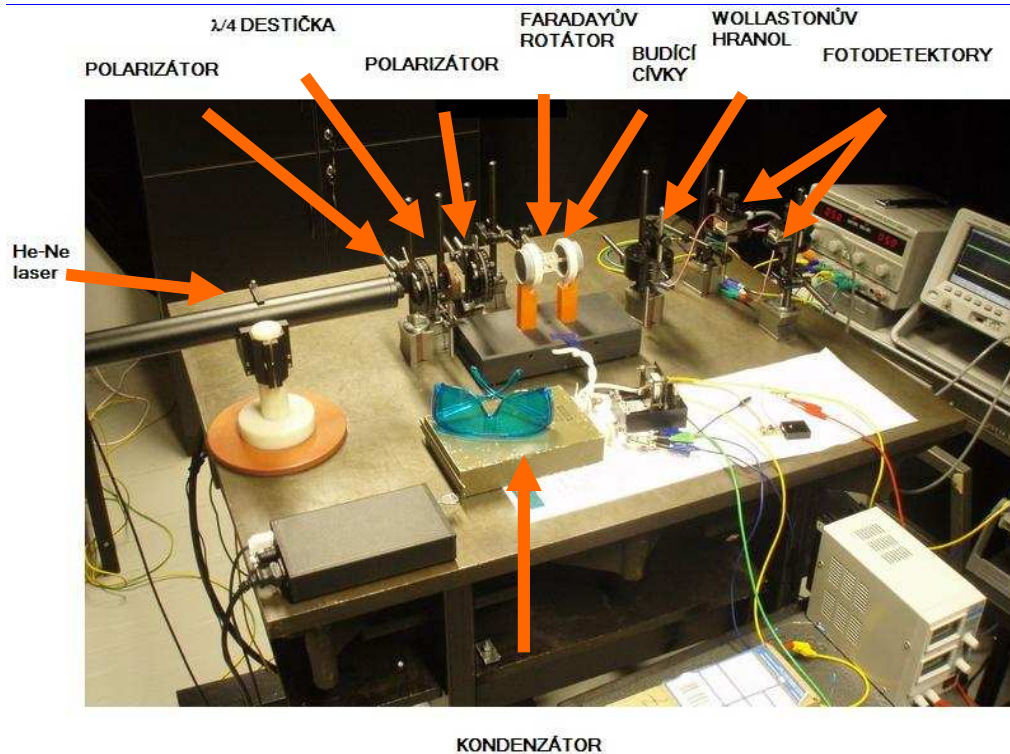
6 Experimentální ověření měření okamžitého výkonu a magneto-optického senzoru

Pro generování magnetického pole jsme použili soustavu dvou souosých cívek, jsou tvořeny dvěma závity vysokonapěťového izolovaného vodiče. Budicí cívky jsme zapojili do jednoduchého obvodu spolu s vysokonapěťovým kondenzátorem [6].



Obrázek 9 Budicí cívky

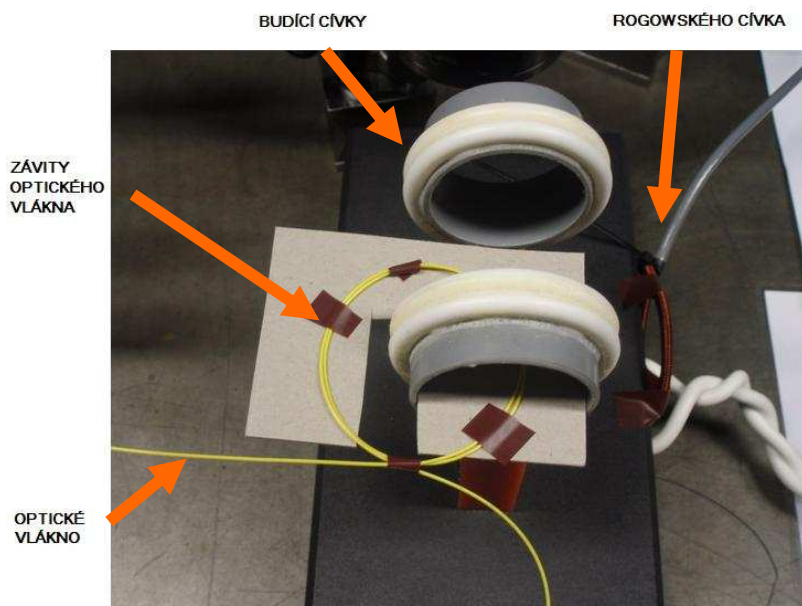
Střídavý zdroj napájí kaskádní násobič napětí. Na výstupu můžeme nastavit stejnosměrné napětí až $U = 2500$ V. Toto napětí měříme voltmetrem přes napěťový dělič. Kaskádní násobič napětí nabíjí vysokonapěťový kondenzátor. V ose soustav cívek jsme umístili Faradayův rotátor. Kvůli vysokému napětí bylo nutné dodržovat zásady bezpečnosti. Jako zdroj měřicího svazku jsme použili He-Ne laser. Tento laser pracuje na vlnové délce $\lambda = 632,8$ nm a jeho vyzařovaný výkon je $P_0 = 5$ mW. Laserový svazek je lineárně polarizovaný. Do cesty svazku jsme zařadili $\lambda/4$ destičku jako čtvrtvlnný fázový retardér. Díky tomuto retardéru získáme kruhovou polarizaci. Lineární polarizátor, který je umístěn mezi laserem a retardérem je určen pro jemné dostavení kruhové polarizace. Za retardérem následuje lineární polarizátor, který kruhovou polarizaci převádí na lineární. Poté laserový svazek projde Faradayovým rotátorem. Rotátor je konstruován jako váleček dlouhý $l = 60$ mm. [6].



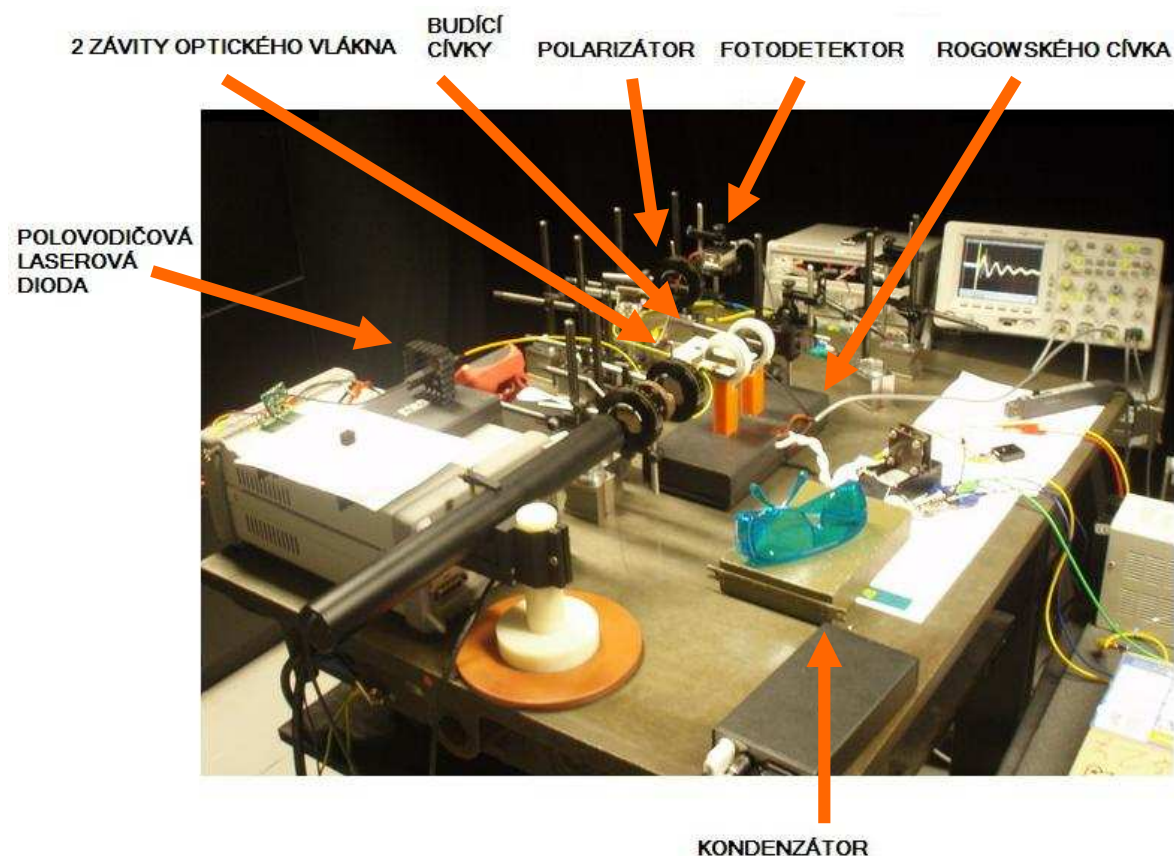
Obrázek 10 Experimentální pracoviště pro měření pulzního proudu s optickým elementem

Z rotátoru dopadá svazek na Wollastonův hranol (polarizační dělič svazku). Ten symetricky rozděluje ortogonálně polarizované svazky. Když vhodně natočíme rovinu polarizace svazku, tak bude optický výkon rozdělen rovnoměrně mezi oba kvadrurní kanály. Tyto kanály jsou snímány fotodetektory [6].

Poté jsme pracoviště ještě pozměnili. Optický element jsme nahradili dvěma závitami optického vlákna.

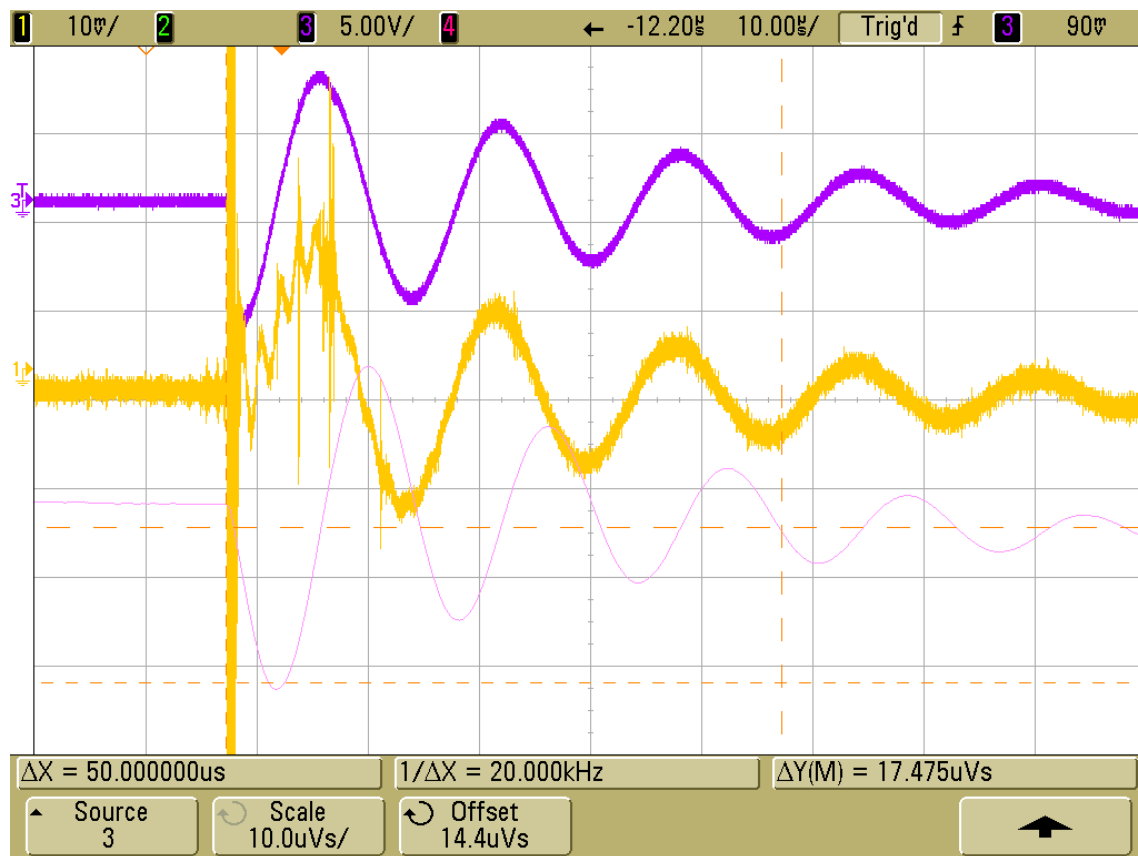


Obrázek 11 Závity optického vlákna



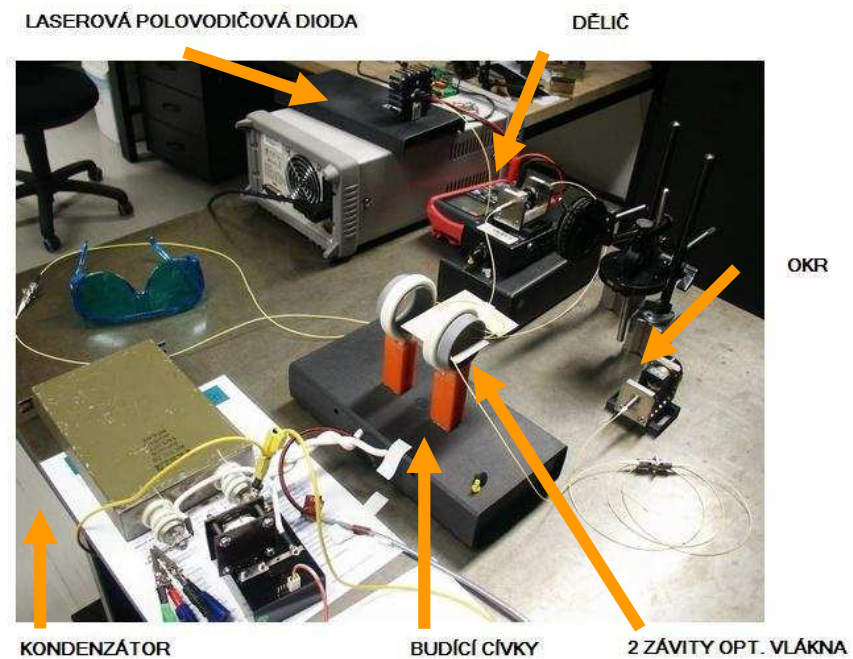
Obrázek 12 Experimentální pracoviště pro měření pulzního proudu s optickým vláknem

Výstupy z fotodetektoru (žlutý průběh) a z Rogowského cívky (fialový průběh) jsme přivedli na kanály osciloskopu. Třetí průběh (tenká čára) nám ukazuje integrovaný signál z Rogowského cívky. Všechny tři průběhy jsou zobrazeny na obrázku 13. Polarizace laserového svazku dopadajícího na rotátor byla nastavena pod úhlem $\theta = 45^\circ$ vůči svislé ose děliče svazku. Tím bylo zajištěno, že výkon vstupního svazku byl rozdělen do obou kanálů stejným dílem.



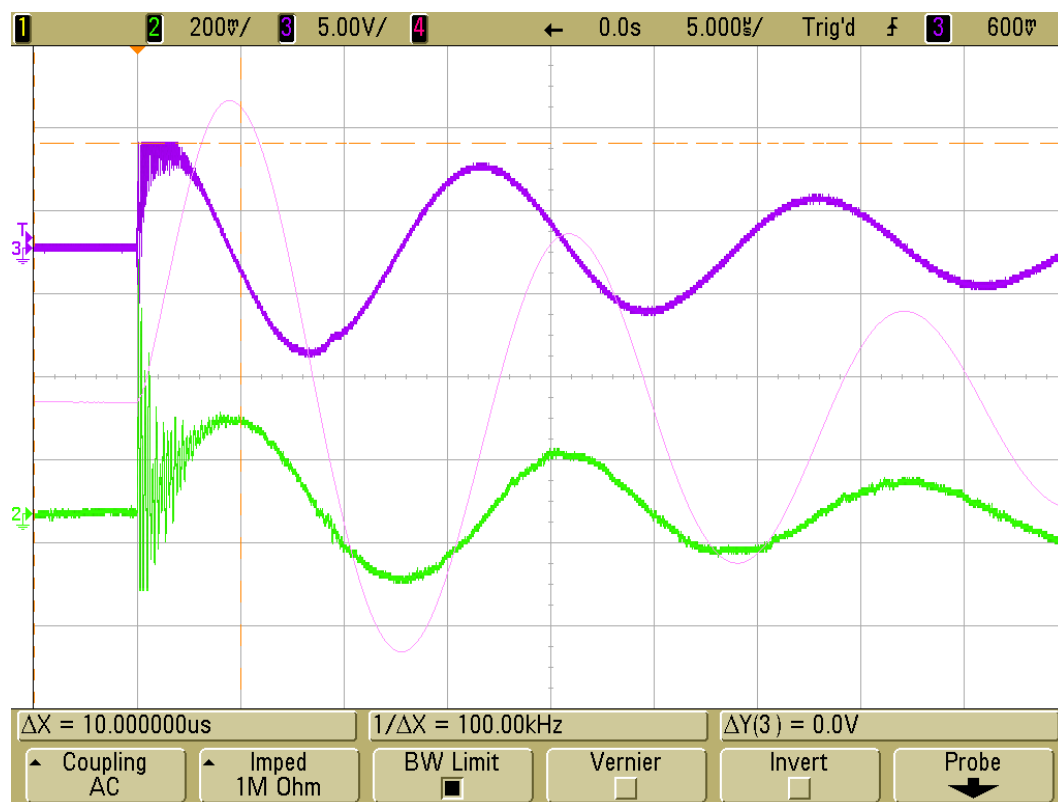
Obrázek 13 Napětí fotodetektoru a Rogowského cívky

Měření jsme provedli i se zapojením ortokonjugáčního retroreflektoru (OKR). Experimentální pracoviště je zobrazeno a popsáno na obrázku 14.



Obrázek 14 Experimentální pracoviště s OKR

Výsledek experimentálního ověření tohoto pracoviště můžeme vidět na následujícím obrázku (obrázek 15), kde zelený průběh je napětí fotodetektoru, fialový průběh je napětí Rogowského cívky a tenký průběh je integrálem napětí Rogowského cívky.



Obrázek 15 Průběhy napětí s OKR

Na sestaveném experimentálním pracovišti bylo provedeno experimentální měření.

Metoda duální kvadrurní elipsometrie je vhodná pro vyhodnocení polarimetrického měření magneto-optického jevu a měření pulsního proudu.

Měření okamžitého výkonu je možné realizovat pomocí metody měření pulsního proudu, do které připojíme vysokonapěťový dělič. Samotný vysokonapěťový dělič není těžké zkonstruovat a jeho popis je v následující kapitole. Největším problémem byla právě složitost měření pulsního proudu. Výkon můžeme určit z hodnot pulsního proudu a napětí. Výsledný okamžitý výkon zjistíme z jednoduchého vzorce

$$P = U \cdot I , \quad (12)$$

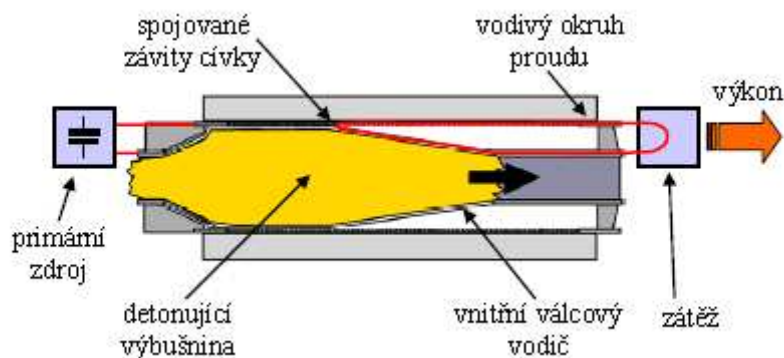
kde I je okamžitá hodnota proudu a U je odpovídající odečtená hodnota napětí.

6.1 Bezindukční dělič vysokého napětí pro extrémní podmínky

Pro naše účely je potřeba dělič, který je určen pro jednorázové měření napěťových impulsů se špičkovou hodnotou stovek kV v extrémních pracovních a klimatických podmínkách. Kvůli jednorázovému měření impulsů potřebujeme dělič, který je návrhem a hlavně jeho následnou realizací levný a přitom spolehlivý. Toho bylo docíleno použitím levné modifikace sériového vysokonapěťového izolátoru.

Pro samotné měření budeme potřebovat pulsní výkonový generátor. Aspekty návrhu a konstrukce pulsního výkonového generátoru jsou v poslední době intenzivně řešeny ve světových laboratořích. Pulsní výkonové generátory jsou konstruovány se špičkovým výkonem až do stovek megawattů. Významná část návrhu pulsního výkonového generátoru je vývoj měřicích metod se speciálními vlastnostmi. Tyto metody musí být schopné měřit napětí a proud, který dosahuje velmi vysokých hodnot v krátkém čase.

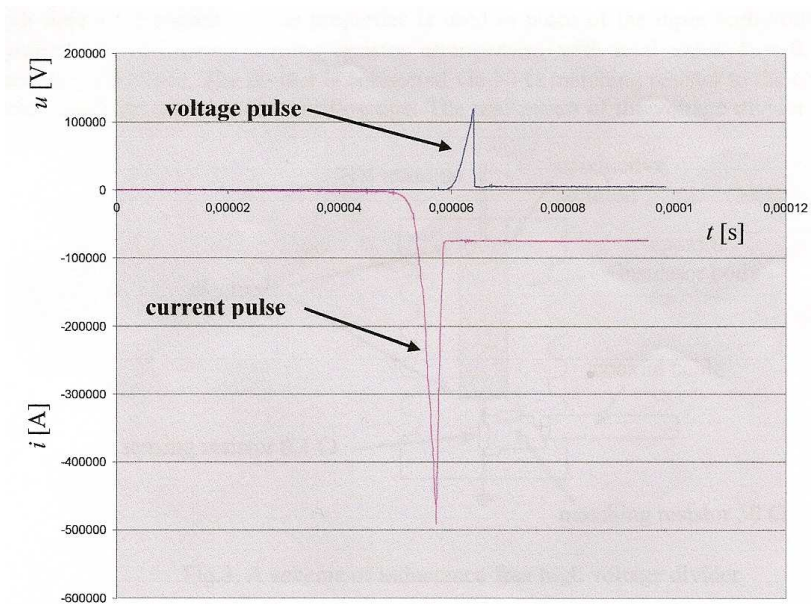
Projekty pulsního výkonového generátoru jsou řešeny výzkumnými týmy PROTOTYPA a.s. a VTUPV Vyškov. Cílem projektů je návrh, realizace a testování pulsního výkonového generátoru s výstupním výkonem až do $P_{max} = 20$ GW. Výkon je generován v krátkém impulsu s délkou trvání $t_d = 70$ μ s. Princip pulsního výkonového generátoru je zobrazen na obrázku 16 [7].



Obrázek 16 Princip efektu zesílení proudu parametrického induktoru.

Jako externí primární zdroj můžeme použít vysoce kvalitní kondenzátor nebo výkonový generátor. Vnitřní část, "Konvertor W_k-W_e ", je skutečné jádro generátoru. Při deformaci můžeme dosáhnout rychlosti deformační vlny $v_d=10$ km/s. Je nutné mít schránku dobře elektricky vodivou a průměr schránky musí být schopen zvětšení bez jakéhokoli mechanického poškození. Třetí část generátoru je mikrovlnná anténa, která je zodpovědná za vyzáření impulsu. Pro účely měření je v místě třetí části generátoru připojena smyčka s impedancí Z_s .

Výbojem primárního zdroje do budící cívky roste proud. Jakmile proud dosáhne maxima, je spuštěna detonace. Pokračující deformace vnitřní schránky spojuje závití cívky. Indukčnost budící cívky klesá, a kvůli zachování energie je akumulována v magnetickém poli, proud začne stoupat. Druhý efekt je založen na Faradayově indukčním zákoně, kdy je indukováno vířivé elektrické pole a vzniká pulsní proud. Proces je charakterizován proudovým zesílením. Obrázek 17 ukazuje příklad proudových/napěťových křivek [7].



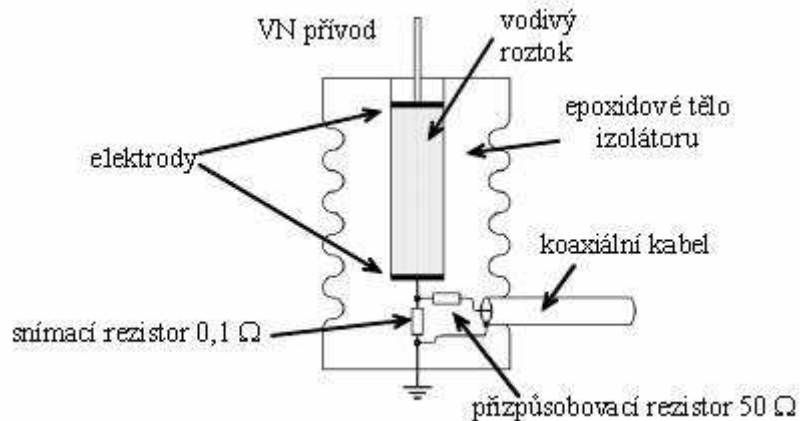
Obrázek 17 Příklad proudových/napěťových křivek

Při testování prototypu pulsního napěťového generátoru se vyskytuje problém měření vysokonapěťového impulsu. Napěťový impuls je generován se špičkovou hodnotou $U_{max} = 120$ kV a pro měření tak vysokého napětí je potřeba odpovídající obvod. Alternativou tohoto obvodu je dělič napětí. Dělič napětí je v podstatě složen ze dvou rezistorů. Poměr hodnot rezistorů nastavuje napěťový transformační faktor A_u .

Pro vstupní napětí $U_{inmax} = 100$ kV je požadováno $U_{outmax} = 1$ V. Napěťový transformační faktor je $A_u = 10^{-5}$. Při použití $0,1 \Omega$ nízkonapěťového snímacího rezistoru je hodnota vstupního vysokonapěťového rezistoru 10 k Ω . Je velice složité zkonstruovat tento dělič z klasických komponentů. Pro tento případ pulsní výkon děliče dosahuje $P = 1$ MW a špičková hodnota proudu je $I = 10$ A [7].

Vysokonapěťovým děličem můžeme měřit vysokonapěťové impulsy. Doba náběžné hrany impulsu dosahuje hodnoty $t_r = 0,1$ ns. Parazitní indukčnost děliče napětí může způsobit zkreslení měřené napěťové křivky, ale můžeme ji minimalizovat. Dělič musí být navržen pro vysoké napětí, aby se předešlo elektrickému zkratu. Dělič musí být odolný extrémním pracovním a klimatickým podmínkám, abychom jej mohli použít ve vnějším prostředí.

Na základě těchto požadavků byla navržena a realizována speciální konstrukce bezindukčního vysokonapěťového děliče. Schéma děliče ukazuje obrázek 18. Schránka děliče je vyrobena z epoxidového izolátoru. Rezistor $R_1 = 10$ k Ω je realizován jako kapalínový s využitím organického roztoku s časově a teplotně stálými vlastnostmi. Symetricky sestavený snímací rezistor uspořádaný s celkovou hodnotou $R = 0,1 \Omega$ předchází parazitní indukčnosti. Dělič je připojen přes 50Ω odpovídající rezistor ke koaxiálnímu kabelu, který vede signál do osciloskopu. Realizace děliče napětí je ukázána na obrázku 19.



Obrázek 18 Schéma bezindukčního vysokonapětového děliče

Kalibrační měření realizovaného děliče bylo provedeno rázovou vlnou $1,2/50\mu\text{s}$ v rozmezí $U = 10 \text{ kV} - 98 \text{ kV}$. Referenční měření bylo prováděno kalibrovaným kapacitním děličem. Měřené křivky rázových vln ukazuje obrázek 20. Je zřejmé, že získané křivky z kalibrovaného kapacitního děliče a navrhovaného děliče jsou takřka totožné [7].



Obrázek 19 Bezindukční vysokonapětový dělič (vlevo) založený na sériovém vyráběném epoxidovém izolátoru (vpravo)



Obrázek 20 Křivky z kapacitního (níže) a navrženého (výše) děliče

7 Indukční a magneto-optické senzory

7.1 Indukční senzory magnetického pole

K měření proudů o vysokých úrovních můžeme využít indukovaného magnetického pole. Tento způsob předpokládá měření velikosti magnetického pole indukovaného protékajícím proudem. Ze změřeného průběhu velikosti magnetického pole je proud následně odvozen výpočtem. Pro snímání magnetického pole jsou v současnosti užívány senzory pracující na několika různých principech. Podle principu můžeme senzory rozdělit na senzory indukční, magnetorezistivní, Hallovy, fluxgate senzory, SQUID senzory a senzory magneto-optické. Jmenované senzory jsou nejčastěji využívány. Existuje několik dalších typů sensorů, které jsou ale menšího významu (magnetostrikční, magnetoelastické, magnetoinduktivní a další). Z hlediska úrovně veličin měřeného magnetického pole a jejich předpokládaným časovým průběhům jsou nejvhodnější senzory typu indukčního a magnetooptického.

Indukční senzory jsou konstrukčně jednoduché. Tvoří je cívky (resp. soustavy cívek) o definovaných rozměrech a počtech závitů. Umožňují měření magnetických polí v úrovních řádově $10^{-12} - 10^3$ T, mohou dosáhnout značných šířek pásma a vysoké linearitu. Indukční senzory jsou založeny na principu Ampérova zákona celkového proudu a Faradayova indukčního zákona. Magnetické pole buzené proudem protékajícím vodičem je podle Ampérova zákona vírového typu

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I. \quad (13)$$

Závit cívka vložený do magnetického pole indukovaného měřeným proudem bude mít na svých svorkách napětí úměrné časové změně magnetického indukčního toku

$$u_i(t) = \frac{-d\phi(t)}{dt} = -\mu_r \mu_0 S \frac{dH(t)}{dt}, \quad (14)$$

kde S je plocha závitu. Měřicí cívky lze konstruovat se vzduchovým jádrem. Pak je relativní permeabilita $\mu_r \cong 1$ [6].

7.2 Magneto-optické senzory

Nové možnosti v problematice měření elektrických proudů a magnetických polí přinesl rozvoj sensorů využívajících magneto-optických jevů. Magneto-optické jevy spočívají v ovlivňování vlastností šíření světla v látkách a při odrazu na jejich rozhraní za současného působení magnetického pole. Mezi magneto-optické jevy řadíme Cotton-Moutonův jev, Kerrův povrchový jev a Faradayův magneto-optický jev.

Cotton-Moutonův jev (také zvaný Voigtův jev) způsobuje vznik lineárního dvojlomu v kapalinách při působení magnetického pole kolmého na směr šíření světla v materiálu.

Tento jev obvykle doprovází jiné magneto-optické jevy, je ale slabého projevu a není vhodný pro využití v sensorových aplikacích. Při Kerrově povrchovém magneto-optickém jevu (SMOKE-Surface Magneto-optic Kerr Effect) dochází ke změnám vlastností světla odráženého od povrchu magnetizovaného materiálu. Podle vzájemné polohy roviny dopadu světla a směru vektoru magnetizace vzorku rozlišujeme tři základní typy tohoto jevu. Je to podélný Kerrův jev, při němž je vektor magnetizace rovnoběžný s rovinou

dopadu a s rovinou odrazu, příčný Kerrův jev, při němž je vektor magnetizace kolmý na rovinu dopadu a zároveň rovnoběžný s rovinou odrazu, a polární Kerrův jev, při němž je vektor magnetizace kolmý na rovinu odrazu světla. U podélného a polárního Kerrova jevu dochází ke změně lineárně polarizované světelné vlny na vlnu elipticky polarizovanou. Hlavní osa elipsy je natočena vzhledem k původní rovině polarizace úměrně velikosti magnetizace vzorku. U příčného Kerrova jevu dochází ke změně intenzity odražené vlny a fázovému posuvu vlny. Kerrovy jevy dosahují poměrně malého poměru změny parametrů světelné vlny k velikosti magnetizace a jsou nelineárního charakteru. Tyto vlastnosti určují využití Kerrova jevu jako nevhodné pro řešenou problematiku.

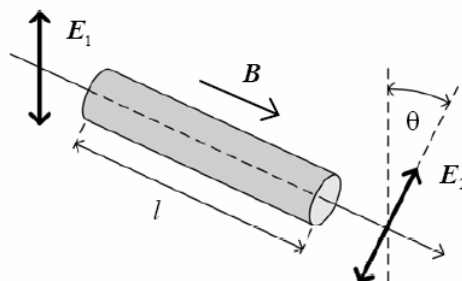
Pro senzorové aplikace je nejvýhodnější využití Faradayova magneto-optického jevu. Jev se projevuje stáčením roviny polarizace světelné vlny v látce při podélném působení magnetického pole. Stáčení roviny polarizace světla je pozorovatelné u opticky aktivních látek. Faradayův jev způsobuje optickou aktivitu prostředí za přítomnosti magnetického pole, jehož směr je rovnoběžný se směrem šíření světelné vlny v prostředí. Jev lze pozorovat u velkého množství materiálů krystalických i amorfních (plyny, kapaliny, amorfní křemík).

Základní vztah pro Faradayův magneto-optický jev je

$$\theta = \frac{\pi}{\epsilon_0 \lambda_0} \cdot \frac{N_e}{n} \cdot \frac{e^3}{m_e^2} \cdot \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)} Bl = VBl = \mu VHL, \quad (15)$$

kde $\bar{n} = (n_1 + n_p)/2$ je střední index lomu, V je tzv. Verdetova konstanta, která charakterizuje magneto-optické vlastnosti prostředí. Je zřejmé, že Verdetova konstanta je závislá na vlnové délce světla.

Je patrné, že úhel stočení roviny polarizace θ světelné vlny je přímo úměrný velikosti magnetické indukce působícího pole v optickém prostředí v interakční délce l (Obrázek 21). Faradayův magneto-optický jev je nerecipročního charakteru. Směr stočení roviny polarizace závisí na vzájemné orientaci magnetického pole a směru šíření. Rovina polarizace světelné vlny šířící se magneto-optickým elementem souhlasně se směrem magnetického pole bude stočena o úhel θ . Rovina polarizace světelné vlny šířící se magneto-optickým elementem proti směru magnetického pole bude stočena o úhel $-\theta$. Magneto-optický element se v literatuře nazývá Faradayovým rotátorem. Podobně jako v případě elektro-optického jevu zastává v senzoru funkci magneto-optického modulátoru [6].

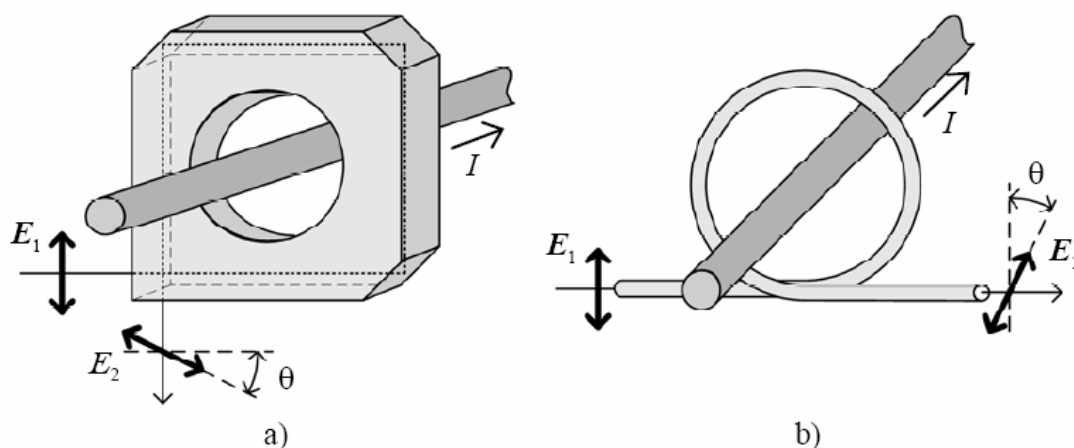


Obrázek 21 Faradayův magneto-optický jev

Při návrhu magneto-optického senzoru vzniká otázka citlivosti. Důležitými faktory jsou interakční délka l a hodnota Verdetovy konstanty V . Délku interakční dráhy senzoru není

vhodné příliš prodlužovat. Senzor by nabýval velkých rozměrů a interakční délka by zasahovala do velkého prostoru, kde je magnetické pole rozloženo.

Pro realizaci dostatečně citlivého senzoru je nutno použít materiál s vhodnou velikostí Verdetovy konstanty. První možností je použití speciálního optického elementu. Měřicí svazek prochází magneto-optickým prostředím a pomocí odrazů na určených plochách, je jeho dráha směřována tak, aby obepínala měřený vodič (Obrázek 22a). Svazek dále postupuje k analyzátoru a fotodetektoru. Druhou možností realizace integrálního senzoru je využití optického vlákna jako rotátoru (Obrázek 22b). Opticky aktivním prostředím rotátoru je jádro vlákna [6].

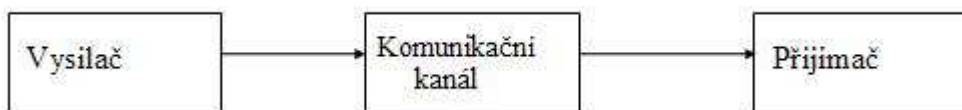


Obrázek 22 Uspořádání integrálních proudových magneto-optických senzorů s použitím speciálního optického elementu a) a s použitím optického vlákna b)

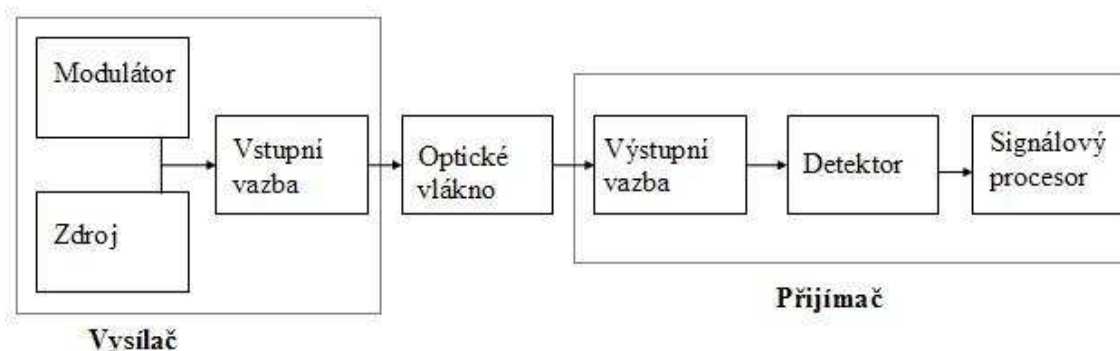
Výrobci optických vláken určují minimální krátkodobý a dlouhodobý poloměr ohybu optického vlákna. Ohyb vlákna s poloměrem menším než je minimální krátkodobý, může způsobit zlomení vlákna. Minimální dlouhodobý ohyb je nutno dodržet pro zajištění přenosových vlastností specifikovaných výrobcem. Zmenšování poloměru ohybu není limitováno pouze rizikem poškození vlákna, ale i vznikem ohybem indukovaného lineárního dvojlomu. V magneto-optických materiálech je vždy lineární dvojlom přítomen. Způsobuje změnu stavu polarizace procházející světelné vlny. Lineárně polarizovaná vlna přejde po průchodu lineárně dvojlomným prostředím na vlnu obecně eliptickou. Lineární dvojlom je parazitní vlastností materiálu určeného pro konstrukci rotátorů. Může být buď charakteru vlastního (trvale přítomného) nebo indukovaného a vyskytuje se jak u skleněných optických elementů tak v optických vláknech. Vlastní dvojlom bývá způsoben vznikem vnitřního mechanického napětí materiálu, který se může objevit při výrobě (např. při rychlém ochlazení odlévaného skla). Vlastní dvojlom je navíc teplotně závislý. Indukovaný lineární dvojlom vzniká působením vnějšího mechanického napětí na materiál nebo vlivem teplotních změn, které vedou ke vzniku vnitřního napětí.

U jednovidových optických vláken má vlastní dvojlom příčinu v nedokonalé kruhové symetrii jádra. Ta spolu s jinými možnými výrobními nepřesnostmi způsobuje přítomnost vnitřního napětí a tím i vlastního lineárního dvojlomu. Indukovaný lineární dvojlom je způsobován vnějšími mechanickými vlivy na vlákno, kterými jsou příčný tlak na vlákno, podélný tah a ohyb vlákna. Ohyb vlákna je ovšem nutností při konstrukci integrálního proudového senzoru s vláknem ve tvaru smyčky [6].

8 Komunikační systém



Obrázek 23 Zjednodušené blokové schéma komunikačního systému



Obrázek 24 Blokové schéma komunikačního systému

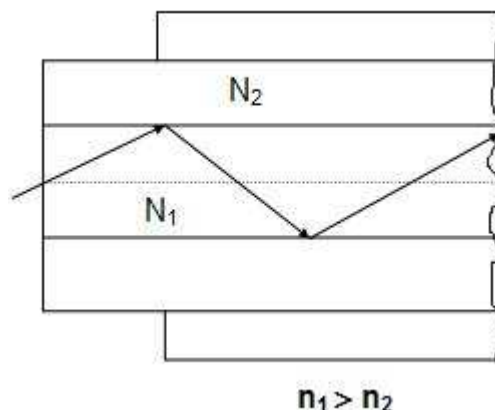
8.1 Vysílač

- převádí analogový nebo digitální elektrický signál do podoby vhodné k přenosu
 - a) polovodičové laserové diody LD
 - b) elektroluminiscenční diody LED

Budí se vždy v propustném směru. U LED diod se světelná energie generuje prostřednictvím "spontánní emise", fotony se generují v oblasti přechodu P-N jeden na druhém nezávisle. U LD laserových diod "stimulovaná emise" způsobí rekombinaci dalšího volného páru elektron/díra, takže vzniká další foton, přičemž původní nezaniká. Opakující se proces – řetězová reakce násobí velikost světelné energie, tzn. podstatně větší světelný výkon než LED a vyšší spektrální čistota o několik řádů.

8.2 Komunikační kanál

- překleneje vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Byla vyvinuta celá řada nejrůznějších typů **optických vláken**, které se liší provedením, vlastnostmi i cenou.



Obrázek 25 Dvouvrstvé optické vlákno

Dvouvrstvé optické vlákno je tvořeno jádrem s vyšším indexem lomu n_1 , které je obklopeno pláštěm s nižším indexem lomu n_2 a tzv. sekundární ochranou.

Základními charakteristikami optických vláken jsou kromě jeho konstrukčních parametrů (rozměry, index lomu a jeho prostorová závislost), parametry přenosové - útlum a disperze, které jsou nejdůležitějšími při návrhu optických přenosových systémů.

Jedno nebo několik vláken je základní součástí **optického kabelu**. Informační kanál je většinou vybaven také opakovači.

8.3 Optická vlákna

Rozhodujícím kritériem pro správný výběr a použití optických vláken je z hlediska **přenosových vlastností** především - disperze, protože útlum prakticky všech typů je již blízko teoretické hranici 0,2 dB/km.

Přenosové vlastnosti optických vláken ovlivňují jejich **konstrukční parametry**. Základními konstrukčními parametry jsou příčné rozměry a rozložení indexu lomu materiálu podél průřezu.

U vícevidových vláken se předpokládá současné šíření až několika set vidů.

Jak již bylo uvedeno, hlavním faktorem omezujícím přenosové možnosti vlákna je disperze. K jejímu potlačení existují v podstatě dvě cesty:

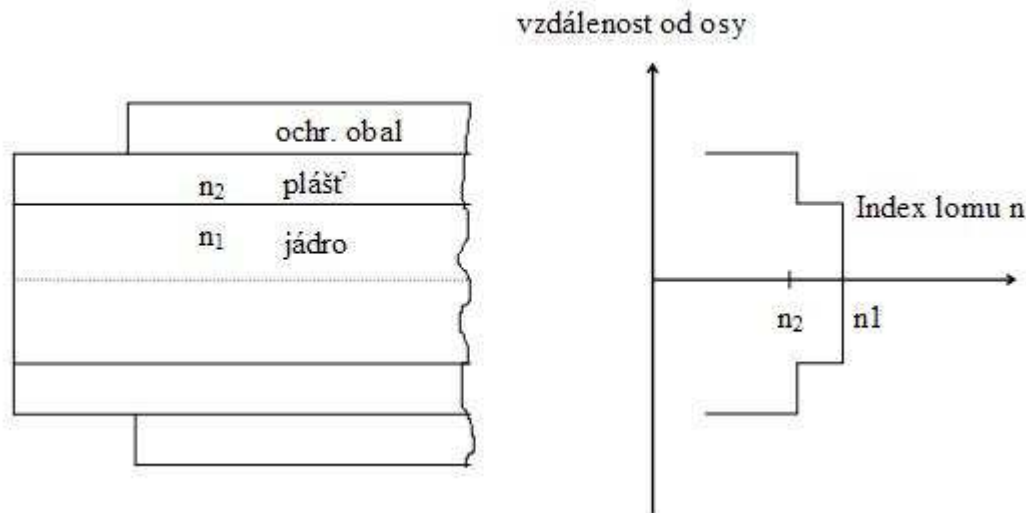
- jedna spočívá v redukcí šířících se vidů až na jeden - **jednovidová vlákna**,
- druhou cestou je vhodná volba profilu indexu lomu, která vede k vyrovnání skupinových rychlostí jednotlivých vidů - **vícevidové vlákno gradientní**.

Základní rozdělení podle průběhu indexu lomu podél průřezu jádra **vícevidových vláken**:

- a) **vícevidová se skokovou změnou indexu lomu** - označované SI (step-index)
- b) **vícevidová s plynulou změnou indexu lomu**: - označované GRIN (gradient - index)

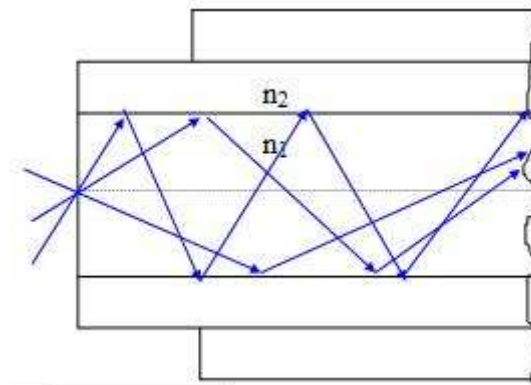
a) Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu:

Index lomu jádra n_1 je konstantní podél celého průřezu jádra, jádro je vyrobeno z materiálu s vyšším indexem lomu n_1 než vnější část vlákna - pláště, který má index lomu n_2 - obrázek 26:



Obrázek 26 Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

Tento typ vlákna je historicky nejstarším vyráběným typem, z hlediska technologie výroby i nejsnáze realizovatelným. Jednotlivé vidy optického signálu se zde šíří na principu mnohonásobného odrazu mezi rozhraním plášť - jádro – viz obrázek 27. Protože průřez jádra je poměrně velký, mohou vstupovat paprsky do vlákna pod mnoha úhly a vytvářejí tak mnohovidový způsob šíření paprsků ve vlákně. Tento typ se vyznačuje největší disperzí.



Obrázek 27 Mnohonásobný odraz

Optická vlákna jsou vlnovodné struktury, ve kterých se mohou za jistých podmínek šířit elektromagnetické vlny. Těmto vlnám odpovídají určitá rozložení elektromagnetického pole ve vlákně, která se nazývají vidy či mody. Každý vid je řešením Maxwellových rovnic a musí splňovat okrajové podmínky na válcovém rozhraní dielektrických prostředí jádra a pláště vlákna. Jednotlivé vidy jsou charakterizovány konstantou šíření a příčným rozložením pole. Každý z vidu se může šířit ve dvou nezávislých polarizačních stavech současně. Obecně mohou ve vláknovém vlnovodu existovat tzv. hybridní vidy HE_{mp} a EH_{mp} , které mají všech šest složek intenzit elektromagnetického pole, E_r , E_j , E_z , H_r , H_j , H_z . Kromě těchto vidů mohou ve vlákně existovat ještě vidy TE_{0p} , TM_{0p} , což jsou vidy transversální, rotačně symetrické, které nemají jednu z podélných složek (E_z nebo H_z). Index m popisuje variace pole v azimutálním směru (ve směru úhlu j) a index p ve směru radiálním.

Každá ze složek elektrického a magnetického musí splňovat Helmholtzovu rovnici

$$\nabla^2 U + n^2 \cdot (k_0)^2 U = 0, \quad (16)$$

kde $k_0 = 2\pi/\lambda_0$.

Pro vlákno se skokovým profilem indexu lomu platí, že $n = n_1$ v jádře ($r < a$) a $n = n_2$ v plášti ($r > a$), a je poloměr jádra. Za předpokladu nekonečně rozlehlého pláště lze elektromagnetické pole na jeho vnějším rozhraní zanedbat. K tomuto zjednodušení nás opravňuje fakt, že amplituda evanescentní vlny v plášti klesá s poloměrem velmi rychle k nule. Helmholtzova rovnice má ve válcových souřadnicích tvar

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0 \quad (17)$$

kde $U = U(r, \varphi, z)$ je libovolná kartézská složka intenzity elektrického či magnetického pole. Řešením rovnice je funkce ve tvaru

$$U(r, \varphi, z) = u(r) \cdot e^{-jm\varphi} \cdot e^{-j\beta z}, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (18)$$

Dosazením dostaneme pro $u(r)$ obyčejnou diferenciální rovnici ve tvaru

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) \cdot u = 0. \quad (19)$$

Aby řešením byla vedená vlna, musí konstanta šíření splňovat nerovnost

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0, \quad (20)$$

Řešením rovnice jsou funkce ze třídy Besselových funkcí

$$u(r) \propto J_m(k_T r), \quad r < a \text{ (v jádře)} \quad (21)$$

$$u(r) \propto K_m(\gamma \cdot r), \quad r > a \text{ (v plášti)} \quad (22)$$

kde

$$k_T^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2,$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$$

Konstanty k_T a γ se normují podle vztahů

$$X = k_T a \quad Y = \gamma a. \quad (23) \quad (24)$$

$J_m(x)$ je Besselova funkce 1.druhu m -tého řádu a $K_m(x)$ je modifikovaná Besselova funkce 2.druhu m -tého řádu.

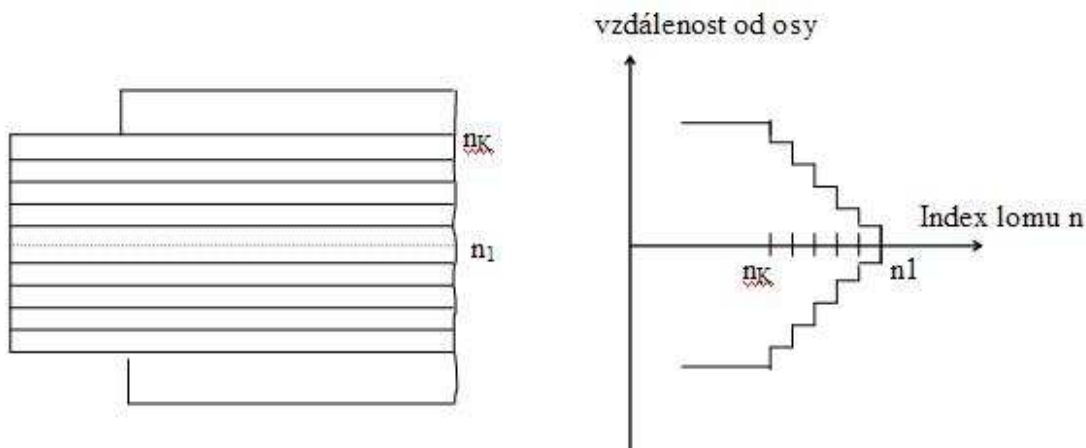
Pro optické vlákno se skokovým lze odvodit tzv. disperzní rovnici

$$m^2 \beta^2 \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} \right) - \omega^2 u \cdot \left(n_1^2 \cdot \frac{J'_m(X)}{X J_m(X)} + n_2^2 \cdot \frac{K'_m(Y)}{Y K_m(Y)} \right) \cdot \left(\frac{J'_m(X)}{X J_m(X)} + \frac{K'_m(Y)}{Y K_m(Y)} \right) = 0 \quad (25)$$

Řešením této rovnice jsou konstanty X a Y , které popisují HE_{mp} a EH_{mp} vidy v optickém vlákně.

b) Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu:

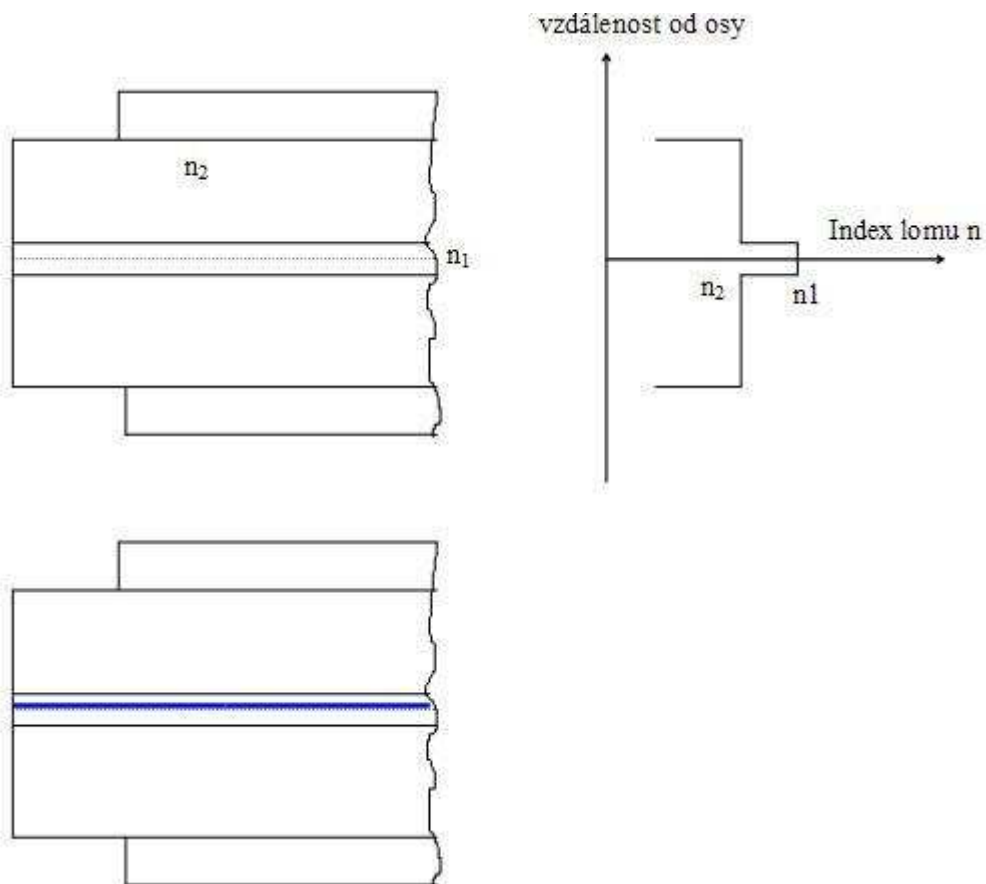
Index lomu jádra n_1 se podél průřezu jádra mění, gradientní změna indexu lomu jádra je způsobena postupným nárůstem optické hustoty materiálu jádra směrem k jeho ose – obrázek 28.



Obrázek 28 Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

c) Jednovidové vlákno

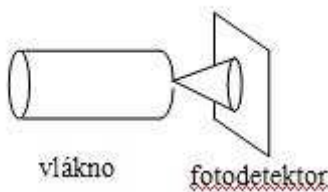
Jednovidová vlákna mají velmi malý průměr jádra, kterým se šíří optický paprsek pouze jedním videm. Tento vid se šíří přímo (axiálně), nikoli odrazy na rozhraní jádra a pláště – obrázek 29. Přenosové parametry jednovidových vláken jsou podstatně kvalitnější než u vláken vícevidových.



Obrázek 29 Jednovidové vlákno

8.4 Výstupní vazební člen

- realizuje vazbu vlákno - fotodetektor. V optických systémech se většinou používá přímá vazba, která může být velmi účinná, protože energie vyzařovaná vláknem se snadno zachytí fotodetektoem, který mívá citlivou plochu podstatně větší, než je příčný rozměr vlákna.



Obrázek 30 Výstupní vazební člen

8.5 Fotodetektor

- realizuje převod optického signálu přenesené optické vlny na elektrický proud. K fotodetekci se nejčastěji používají různé typy polovodičových fotodiod. Proud fotodiody je přímo úměrný energii dopadajícího optického záření. Protože časový průběh energie tohoto záření je úměrný přenášenému signálu, je také proud fotodetektoru úměrný přenášenému signálu. Základními parametry fotodetektorů jsou spektrální citlivost a rychlost odezvy.

8.6 Signálový procesor

Signál přenesený optickou soustavou je deformován útlumem, disperzí a také šumem, který je přítomen ve všech sdělovacích soustavách. Jeho vliv kvantitativně vyjadřujeme poměrem signálu k šumu.

Signálový procesor má za úkol regenerovat zkreslený přenesený signál, zbavit jej šumu a převést jej do požadované výkonové úrovně i formy. U digitálních systémů je součástí signálového procesoru tzv. rozhodovací obvod, který rozliší ve sledu pulsů binární 1 od 0. Často musí signálový procesor při digitálním přenosu dekodovat signál a převést jej do originální analogové podoby.

8.7 Přijímač

- přijme signál a upraví jej na elektrický signál

- a) fotodetektor s jednoduchým PN přechodem - nepoužívá se, nízká citlivost,
- b) PIN dioda - fotodioda bez vnitřního zisku, vrstva I zvětšuje citlivost,
- c) APD - lavinová fotodioda s vnitřním ziskem, vlivem silného el.pole dochází k lavinovému vzniku volných elektronů (primárně uvolněné elektrony po dopadu fotonů se násobí), zvýšená citlivost vůči PIN.

Závěr

V této práci jsem se zabýval měřením okamžitého výkonu elektromagnetického pulsu a magneto-optickými senzory. Navrženou metodu měření jsem experimentálně realizoval. Samotné pracoviště, které jsem využil při ověřování metody, bylo sestaveno v optické laboratoři Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Pracoviště bylo testováno v několika sestaveních. Nejprve byla testována metoda měření pulsního proudu. V zapojení jsem využil optického elementu – monokrystalu. Poté jsem optický element vyměnil za dva závity optického vlákna, které byly protaženy budícími cívkami. Dosáhl jsem pulsního proudu $I = 1700\text{A}$. Na závěr byl do zapojení přidán ortokonjugální retroreflektor. Abych mohl zjistit okamžitý výkon, bylo by třeba do zapojení přidat vysokonapěťový dělič. Výsledný okamžitý výkon elektromagnetického pulsu můžeme díky tomu zjistit z hodnot pulsního proudu a napětí. Při měření jsem musel dodržovat zásady bezpečné manipulace s přípravky a veškerá měření probíhala pod odborným dohledem.

Dále jsem se v práci zabýval magneto-optickými a indukčními senzory a jejich rozbořem. V poslední části práce je zmíněn komunikační systém. Ten jsem zmínil z důvodu využití optického vlákna. Díky lepšímu pochopení problematiky optických vláken a jejich charakteristik, bylo použito jednořadové optické vlákno, které danému měření vyhovovalo nejlépe. Největší výhodou rozložených optických vláknových senzorů je možnost měřit spojitě rozložený fyzikální veličiny ve velkém prostoru. Tato výhoda vyplývá z použití optických vláken jako citlivých prvků senzoru. Distribuované optické vláknové senzory využívají v současné době rozpracované reflektometrické metody měření optických vláken, určené původně na zjištění poruch v komunikačních optických kabelech. V současnosti je nejvíc rozpracovaná a používaná optická reflektometrie v časové oblasti (OTDR). Její největší výhodou je univerzálnost a dostupnost komerčně vyráběných reflektometrů. Polarizační optická reflektometrie ve frekvenční oblasti (OFDR) jsou speciálně vyvíjené metody určené na senzorové aplikace. Jejich použití je vázáno na konstrukci speciálních reflektometrů, v porovnání s metodou OTDR však dosahuje lepších parametrů .

Seznam literatury

- [1] Doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc., Optoelektronické snímače, elektronické skriptum VUT FEKT v Brně
- [2] Jura,P. Signály a systémy, elektronické skriptum VUT FEKT v Brně
- [3] Ing. Petr Hlaváček, Skripta optoelektroniky pro VOS a SPŠ Kutná Hora
- [4] Ing. Jan Fischer, CSc., Optoelektronické senzory a videometrie, 2002 ČVUT Praha
- [5] Doc. Ing. Otakar Wilfert, Csc.,Optoelektronika,elektronické skriptum VUT FEKT v Brně
- [6] Ing. Petr Drexler, Metody měření ultrakrátkých neperiodických elektromagnetických impulsů, VUT FEKT v Brně
- [7] Drexler, P., Kaláb, P., Steinbauer, M. Inductance-free high voltage divider for extreme conditions. In *Proceedings of 16th International Conference DISEE 2006*.

Rejstřík obrázků

Obrázek 1	Vektory intenzity elektrického a magnetického pole u rovinného elektromagnetického vlnění	12
Obrázek 2	Měření Kerrova elektro-optického jevu.....	15
Obrázek 3	Polarizační dělič svazku	17
Obrázek 5	Rogowského cívka jako senzor elektrického proudu	18
Obrázek 6	Polarimetrické vyhodnocení Faradayova magneto-optického jevu.....	19
Obrázek 7	Schéma ortokonjugačního retroreflektoru	19
Obrázek 8	OKR - ortokonjugační retroreflektor	20
Obrázek 4	Principiální uspořádání metody měření okamžitého výkonu	22
Obrázek 9	Budící cívky.....	23
Obrázek 10	Experimentální pracoviště pro měření pulzního proudu s optickým elementem	24
Obrázek 11	Závity optického vlákna	24
Obrázek 12	Experimentální pracoviště pro měření pulzního proudu s optickým vláknem ...	25
Obrázek 13	Napětí fotodetektoru a Rogowského cívky.....	26
Obrázek 14	Experimentální pracoviště s OKR	26
Obrázek 15	Průběhy napětí s OKR	27
Obrázek 16	Princip efektu zesílení proudu parametrického induktoru.....	28
Obrázek 17	Příklad proudových/napěťových křivek	29
Obrázek 18	Schéma bezindukčního vysokonapěťového děliče	30
Obrázek 19	Bezindukční vysokonapěťový dělič (vlevo) založený na sériovém vyráběném epoxidovém izolátoru (vpravo)	30
Obrázek 20	Křivky z kapacitního (níže) a navrženého (výše) děliče	30
Obrázek 21	Faradayův magneto-optický jev	32
Obrázek 22	Uspořádání integrálních proudových magneto-optických senzorů s použitím speciálního optického elementu a) a s použitím optického vlákna b).....	33
Obrázek 23	Zjednodušené blokové schéma komunikačního systému	34
Obrázek 24	Blokové schéma komunikačního systému	34
Obrázek 25	Dvouvrstvé optické vlákno	35
Obrázek 26	Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu	36
Obrázek 27	Mnohonásobný odraz.....	36
Obrázek 28	Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu	38
Obrázek 29	Jednovidové vlákno	39
Obrázek 30	Výstupní vazební člen.....	39