

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

**Katedra experimentální fyziky**



# **Diplomová práce**

**Vývoj aparatury pro měření magnetooptického  
Kerrova jevu**

Autor	Bc. Dominik Sobek
Vedoucí práce	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Studijní obor	Aplikovaná fyzika
Forma studia	Prezenční
Rok	2016

Autor	Dominik Sobek
Název práce	Vývoj aparatury pro měření magnetooptického Kerrova jevu
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2016
Počet stran	64
Počet příloh	3
Jazyk	Český
Abstrakt	Magnetooptický Kerrův jev (MOKE) je experimentální metoda, která umožňuje zkoumání magnetických vlastností tenkých vrstev a povrchů. Při odrazu rovinné elektromagnetické vlny od povrchu zkoumaného materiálu dochází ke stočení roviny polarizace vlny. Stupeň stočení roviny polarizace závisí na magnetizaci tenké vrstvy, která je zpravidla úměrná aplikovanému externímu magnetickému poli. Měřením změny stočení polarizace můžeme snadno studovat magnetické vlastnosti látek. V rámci této práce byla navržena, zkonstruována a otestována měřící sestava pro provádění magnetooptických experimentů. Funkčnost celé aparatury byla vyzkoušena na několika vzorcích s různými magnetickými vlastnostmi.
Klíčová slova	Magnetooptika, Kerrův jev, aparatura, optická sestava, modul zesilovačů, bipolární zdroj, Hallova sonda, LabVIEW, multifunkční karta USB NI-6216, hysterezní smyčka, tenká vrstva

Author	Dominik Sobek
Title	Magneto-optical Kerr effect measurement apparatus development
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Year of presentation	2016
Number of pages	64
Number of appendices	3
Language	Czech
Abstract	<p>Magneto-optical Kerr effect (MOKE) is an experimental method suitable for an investigation of the thin films and surfaces magnetic properties. When electromagnetic wave is reflected from the sample surface its polarization rotates. The rotation is proportional to the magnetization which is connected with an applied magnetic field. Therefore, the surface magnetic properties can be studied by measurement of the rotation. Within this work the apparatus for magneto-optical Kerr measurements was designed, constructed and tested. The proper function of the apparatus was confirmed by measurements of several samples with different magnetic properties.</p>
Keywords	Magneto-optics, Kerr effect, apparatus, optical setup, amplifiers, modul, bipolar power supply, Hall probe, LabVIEW, multifunction data acquisition module USB NI-6216, hysteresis loop, thin layer

*Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Víta Procházky, Ph.D., a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.*

V Olomouci dne .....

.....

podpis

Chtěl bych poděkovat Mgr. Vítu Procházkovi, Ph.D., za vedení mé diplomové práce, za trpělivost, cenné rady a ochotu, kterou mi po celou dobu zpracování mé diplomové práce věnoval. Mé poděkování patří též Mgr. Michalu Dudkovi a Mgr. Leu Schlattauerovi za věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích při vypracování mé diplomové práce.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Magnetooptické jevy</b> .....	<b>7</b>
1.1 Magnetismus .....	7
1.2 Faradayův jev .....	11
1.3 Kerrův jev .....	14
1.4 Uspořádání Kerrova experimentu .....	15
<b>2 Konstrukce aparatury</b> .....	<b>18</b>
2.1 Optická sestava .....	18
<b>3 Elektronická jednotka</b> .....	<b>23</b>
3.1 Stabilizovaný symetrický lineární zdroj napětí .....	24
3.2 Operační zesilovače .....	26
3.3 Rozdílový zesilovač .....	29
3.4 Přístrojový zesilovač .....	30
3.5 Regulator intenzity osvětlení laserové diody .....	32
3.6 Elektronické schéma měření teploty .....	33
3.7 Výroba elektronické desky .....	35
<b>4 Generování magnetického pole v solenoidu</b> .....	<b>38</b>
4.1 Bipolární operační zdroj BOP a generování budicího signálu .....	39
4.2 Měření magnetického pole .....	40
<b>5 Vývoj měřicího software, detekce signálu</b> .....	<b>44</b>
5.1 NI LabVIEW .....	44
5.2 Multifunkční měřicí karta NI USB-6216 .....	45
5.3 Konfigurace analogových vstupů a výstupů AO/AI .....	46
5.4 Algoritmus měřicího systému .....	49
<b>6 Příklady měření vzorků tenkých vrstev</b> .....	<b>53</b>
<b>Závěr</b> .....	<b>56</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>57</b>
<b>Příloha A Součástky použité pro DPS</b> .....	<b>61</b>
<b>Příloha B Technické manuály k integrovaným obvodům</b> .....	<b>63</b>
<b>Příloha C Příklad textového souboru s naměřenými daty</b> .....	<b>64</b>

## Úvod

V několika posledních letech dochází k rychlému rozvoji spintronických, a dalších magneticky aktivních zařízení, které mohou sloužit jako elektronické senzory a záznamová média. Pro jejich využití v konkrétních aplikacích je nezbytná detailní znalost magnetických vlastností materiálů, ze kterých jsou tato zařízení konstruována.

Magnetooptické metody umožňují efektivně zkoumat magnetické vlastnosti tenkých magnetických vrstev a povrchů, které ve výše zmíněných aplikacích hrají klíčovou roli. Rozlišujeme několik magnetooptických jevů, které nesou jména jejich objevitelů, Zeemanův, Voigtův, Cottonův-Moutonův, Faradayův a Kerrův jev. Některá literatura označuje tyto jevy jako magnetooptickou spektroskopii.

Hlavním cílem práce je vývoj aparatury pro měření magnetooptického Kerrova jevu. Základem aparatury je nově vyvinutá elektronická jednotka, která umožňuje snadnou realizaci experimentu. Magnetování vzorku je zajištěno pomocí zdroje a cívek. Celá sestava spolu s optickou částí je připevněna na optický stůl. Celé měření je řízeno z počítače pomocí multifunkční měřicí karty od firmy National Instruments. Výsledná aparatura bude sloužit ke studiu magnetizačních vlastností tenkých vrstev.

V kapitole 1 je popsána teorie magnetooptického Kerrova jevu, měření Kerrovy rotace a důsledky, které z ní vyplývají. V kapitole 2 je uveden popis optické sestavy MOKE. Vývoj elektroniky a elektronická schémata jsou uvedena v kapitole 3. V kapitole 4 je podrobný popis buzení vnějšího magnetického pole a jeho měření pomocí Hallovovy sondy. Kapitola 5 je věnována algoritmu, který celý experiment řídí a vyhodnocuje výsledky. V poslední kapitole jsou uvedeny příklady měření hysterezních smyček tenkých vrstev s různými magnetickými vlastnostmi.

# 1 Magnetooptické jevy

V roce 1888 objevil skotský fyzik John Kerr, že pokud dopadne lineárně polarizovaná světelná vlna na pevnou látku ve vnějším magnetickém poli, změní se po odrazu na elipticky polarizovanou světelnou vlnu - Kerrova rotace. Kerrova rotace je úměrná velikosti magnetizace materiálu a je vhodná pro měření hysterezních smyček tenkých vrstev [1].

## 1.1 Magnetismus

První kvantitativní popis magnetismu byl publikován James Clerk Maxwellem v roce 1862. Z tehdejších známých zákonů a poznatků o fyzice vytvořil tzv. Maxwellovy rovnice (1.1). Tyto čtyři rovnice popisují elektromagnetismus na mikroskopické úrovni a zároveň tvoří základ klasické elektrodynamiky a optiky. Maxwellovy rovnice ve svém znění popisují zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon, zákon elektromagnetické indukce, Faradayův indukční zákon, Gaussův zákon elektrostatiky a zákon spojitosti indukčního toku [1,3]. Maxwellovi rovnice jsou zpravidla zapisovány ve tvaru

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= j + \frac{\partial D}{\partial t} & \nabla \times E &= - \frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \cdot D &= \rho & \nabla \cdot B &= 0,\end{aligned}\tag{1.1}$$

kde  $\nabla$  (nabla) je diferenciální operátor,  $H$  je intenzita magnetického pole,  $j$  je hustota vodivého proudu,  $\partial D / \partial t$  je hustota posuvného Maxwellova proudu,  $E$  je intenzita elektrického pole,  $\partial B / \partial t$  je derivace magnetické indukce,  $D$  je elektrická indukce,  $\rho$  je objemová hustota volného náboje a  $B$  je magnetická indukce.

Z pohledu kvantově-mechanické fyziky zjistíme, že každý atom je charakterizován magnetickým momentem  $\vec{\mu}_i$ , který se skládá z orbitálního pohybu elektronů po dráze kolem jádra atomu a spinu elektronů. [4].

Magnetický materiál se skládá z velkého počtu atomů, jehož výsledný magnetický projev je popsán magnetizací  $M$ . Celkovou magnetizaci můžeme vyjádřit jako vektorový součet všech magnetických momentů atomů dělený celkovým objemem materiálu  $V$  [4]

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{\mu}_i}{V}.\tag{1.2}$$



Pokud vložíme materiály rozdělené podle magnetické susceptibility (obr. 1.1) do vnějšího magnetického pole, budou mít materiály na toto pole rozdílné odezvy.

Při studiu makroskopických magnetických vlastností látek, je nutné zavést další vztahy, kterými popisujeme chování látek v magnetickém poli. Obecně můžeme všechny látky rozdělit do dvou velkých skupin, látky magneticky neuspořádané (diamagnetické, paramagnetické) a látky magneticky uspořádané (feromagnetické, antiferomagnetické a ferimagnetické) [4]. U první skupiny látek nabývá magnetizace malých hodnot, naopak u druhé skupiny značných hodnot. Obecně lze říci že až na některé výjimky, existuje lineární závislost mezi intenzitou pole  $\mathbf{H}(r)$  a magnetizací  $\mathbf{M}(r)$  v závislosti na polohovém vektoru ( $i$  u značně vysokých polí, s výjimkou oboru nízkých teplot) [6]

$$\mathbf{M}(r) = \chi_m \cdot \mathbf{H}(r). \quad (1.3)$$

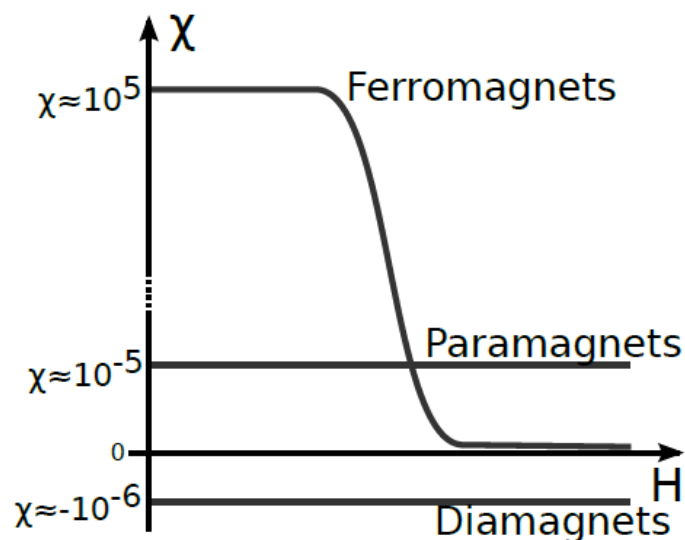
Konstantu úměrnosti  $\chi_m$  nazýváme magnetickou susceptibilitou látky. Magnetická susceptibilita je bezrozměrná veličina, která popisuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli [1].

Magnetická susceptibilita zavedená vztahem (1.3) říká, že vektor magnetizace je rovnoběžný s vektorem intenzity pole. Ovšem toto tvrzení můžeme omezit pouze na izotropní materiály. V anizotropních látkách je směr magnetizace obecně různý od směru intenzity pole. V tomto případě musíme magnetickou susceptibilitu považovat za symetrický tenzor druhého řádu a úměrnost magnetizace a magnetické intenzity má tvar [6]

$$\begin{aligned} M_x &= \chi_{m,xx}H_x + \chi_{m,xy}H_y + \chi_{m,xz}H_z, \\ M_y &= \chi_{m,yx}H_x + \chi_{m,yy}H_y + \chi_{m,yz}H_z, \\ M_z &= \chi_{m,zx}H_x + \chi_{m,zy}H_y + \chi_{m,zz}H_z, \end{aligned} \quad (1.4)$$

kde veličiny  $\chi_{m,ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) představují složky tenzoru magnetické susceptibility [6]. Na základě magnetické susceptibility můžeme rozdělit magnetické materiály do tří skupin (obr. 1.1)[4]:

- a) Diamagnetické materiály  $\chi_p < 0$ .
- b) Paramagnetické materiály  $\chi_d > 0$ .
- c) Feromagnetické, antiferomagnetické a feromagnetické látky  $\chi_f \gg 0$ .



Obrázek 1.1: Závislost intenzity magnetického pole na magnetické susceptibilitě. Převzato a upraveno [1].

*Diamagnetické materiály* vykazují malou a zápornou magnetickou susceptibilitu  $\chi_d \sim 10^{-5}$ . Ve vnějším magnetickém poli se v látce indukuje magnetický moment, který je orientován proti směru vnějšího magnetického pole. Taková látka je z magnetického pole vypuzována [1].

*Paramagnetické materiály* nesou vnitřní magnetické momenty, které spolu neinteragují. Vnitřní magnetický moment je dán přítomností nepárových elektronů. Její magnetická susceptibilita  $\chi_p$  je kladná a mění se s teplotou podle Curieho zákona,

$$\chi_p = \frac{C}{T}, \quad (1.5)$$

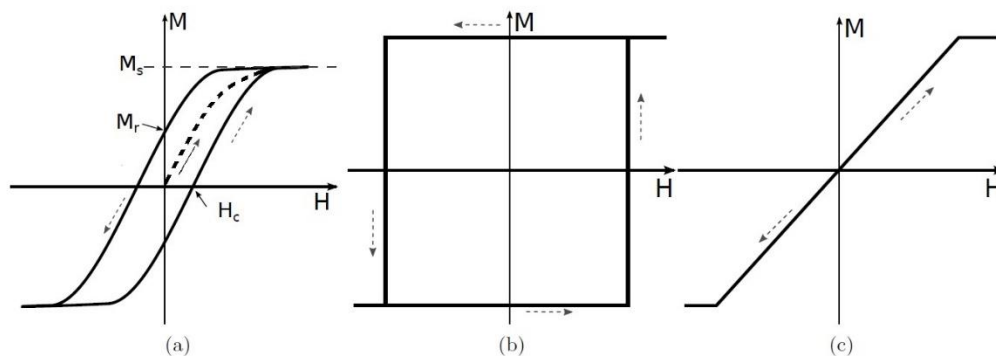
kde  $C$  je Curieho konstanta a  $T$  termodynamická teplota [1]. Vnější magnetické pole způsobí částečné uspořádání magnetických momentů – indukci magnetizace. Hodnoty paramagnetické susceptibilitivity  $\chi_p \sim 10^{-3} - 10^{-5}$  [1,4].

*Ferromagnetické materiály* vykazují magnetickou interakci mezi magnetickými momenty v materiálu. Pod určitou kritickou teplotou tyto magnetické interakce převládají – magnetické momenty jsou uspořádané. Nad kritickou teplotou převládají teplotní fluktuace a materiál se stává paramagnetickým. Magnetických interakcí je několik druhů a jejich detailní popis je nad rámec této práce. Výsledkem těchto interakcí je vznik celkové magnetické anizotropie. Celková magnetická anizotropie se

skládá z 5 příspěvků (magnetokrystalová, tvarová, magnetoelastická, indukovaná a výměnná anizotropie). Magnetokrystalová anizotropie je zodpovědná za orientaci snadné a obtížné osy magnetizace materiálu podél specifického krystalografického směru [4].

Magnetická anizotropie je zodpovědná za magnetickou energii, která je dána součtem dílčích magnetických anisotropií. Abychom docílili rovnovážného magnetického stavu, musí být splněna podmínka minimální celkové magnetické energie. Tato podmínka je splněna jedině tehdy pokud materiál rozdělíme na spontánně zmagnetované oblasti s odlišným směrem magnetizace – domény. Změna směru magnetizace mezi doménami se děje spojitě (větší počet atomových rovin). V tomto spojitém přechodu vzniká přechodová vrstva – Blochova stěna. V této vrstvě přechází vektor magnetizace ze snadného směru, který zaujímal v jedné doméně a spojitě přechází do dalšího snadného směru magnetizace v druhé doméně. Kromě Blochovy stěny existuje i Neélova stěna, která byla např. pozorována v tenkých vrstvách tenčích než 40 nm [4].

Typickým projevem feromagnetických materiálu je hysterezní smyčka (obr. 1.2a). Lineární oblast magnetizace je malá a jak víme z obr. 1.1 je susceptibilita závislá na magnetickém poli. Při magnetizaci materiálu se nejprve pohybujeme po čárkované křivce tzv. *prvotní magnetizace*. Postupně se domény a magnetické momenty uspořádávají do směru působícího vnějšího magnetického pole. Při určité hodnotě vnějšího magnetického pole jsou všechny domény uspořádány ve směru vnějšího magnetického pole – *saturační magnetizace*  $M_s$ . Při snižování magnetického pole, se nevracíme po křivce prvotní magnetizace. Při nulové hodnotě vnějšího magnetického pole pozorujeme zbytkovou – *remanentní magnetizaci*  $M_r$ . Pokud přiložíme opačné vnější magnetické pole, budeme pokračovat v tzv. demagnetizaci. Intenzita magnetického pole, při které je magnetizace nulová se nazývá *koercivní intenzita*  $H_c$ . Materiál je demagnetovaný. Příčina hystereze a koercivity je magnetokrystalová anizotropie, nečistoty v materiálu (nemagnetické prvky), dislokační poruchy a jiné. Tvary a plochy hysterezních smyček poskytují informace o vlastnostech materiálů. Podle hysterezních smyček dělíme materiály na magneticky tvrdé a měkké. Podle jejich ploch můžeme určit snadné a těžké osy magnetizace (obr. 1.2 b, c)[1,4].



Obrázek 1.2: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu (a). Tvarová nebo krystalická anizotropie mohou vést ke vzniku snadné osy magnetizace (b), nebo těžké osy magnetizace (c). Převzato a upraveno [1].

Mezi další magnetické materiály patří *anti-feromagnetika*. Tyto látky se vyznačují antiparalelní orientací magnetických momentů. Tento jev je důsledek dvou vzájemně ekvivalentních prolínajících se podmřížek. V těchto případech jsou magnetické momenty každé z podmřížek vůči sobě antiparalelní. Velikost magnetizací obou podmřížek jsou shodné. Spontánní magnetizace je nulová při jakékoliv teplotě. Opačné tvrzení platí pro další magnetické materiály *ferimagnetika*. Magnetizace je navenek různá od nuly. Tento důvod je skryt v povaze jedné z podmřížek – převládá jedna velikost magnetizace podmřížky nad druhou [1,4].

## 1.2 Faradayův jev

V roce 1846 objevil Michael Faraday, že se rovina lineárně polarizovaného světla stáčí, když prochází flintovým sklem, na které je aplikováno vnější magnetické pole. Dnes je tento fyzikální jev známý jako Faradayův efekt. Tento jev je fyzikálně vysvětlen Maxwellovými (1.1) a materiálovými rovnicemi [1,2]

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E. \quad (1.6)$$

Kde  $\varepsilon$  je permitivita,  $\varepsilon_r$  relativní permitivita vakua,  $E$  intenzita elektrického pole,  $D$  elektrická indukce,  $B$  magnetická indukce,  $\mu_0$  permeabilita vakua a  $\mu_r$  relativní permeabilita. Rovnice elektrické indukce se pro anizotropní materiály, kde  $\varepsilon$  je tenzor druhého řádu, má tvar

$$\begin{aligned}
D_x &= \varepsilon_{xx}E_x + \varepsilon_{xy}E_y + \varepsilon_{xz}E_z, \\
D_y &= \varepsilon_{yx}E_x + \varepsilon_{yy}E_y + \varepsilon_{yz}E_z, \\
D_z &= \varepsilon_{zx}E_x + \varepsilon_{zy}E_y + \varepsilon_{zz}E_z.
\end{aligned} \tag{1.7}$$

Kde veličiny  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) představují složky tenzoru permitivity. Vlastnosti těchto složek těsně souvisejí s charakterem symetrie krystalu, nebo jiného anizotropního dielektrika [6].

Pokud budeme uvažovat o interakci světla s feromagnetickým materiálem ve vnějším magnetickém poli, bude tenzor permitivity záviset na úhlové frekvenci  $\omega$  dopadajícího světla. Pokud magnetizace v ose-z vyvolá jednoosou anizotropii feromagnetického materiálu, bude tenzor permitivity závislý i na indukované magnetizaci  $M$  [1,2]

$$\varepsilon(M, \omega) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}. \tag{1.8}$$

Pro popis polarizace světla si můžeme vyjádřit elektromagnetickou vlnou pomocí rovnic, které jsou funkcí polohového vektoru a času [1,2]

$$\begin{aligned}
E(r, t) &= E_0 \exp[-i(\omega t - k \cdot r)], \\
B(r, t) &= B_0 \exp[-i(\omega t - k \cdot r)].
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Kde  $k = \omega/c$  je vlnový vektor, který udává směr šíření vlny. Pokud na tyto rovnice aplikujeme časově závislé Maxwellovy rovnice a vektor identity, dostaneme vztah [1,2]:

$$k(k \cdot E) - k^2 E + \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon E = 0. \tag{1.10}$$

Kdy pro stacionární Maxwellovu rovnici platí, že  $k \cdot E = 0$ . Pokud zavedeme, že  $k_0 = \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 k_0 = \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2$ ,  $n = k/k_0$  a dosadíme do rovnice (1.10) dostáváme vztah [1]:

$$\begin{pmatrix} n^2 - \varepsilon_{xx} & -\varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & n^2 - \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & n^2 - \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0. \tag{1.11}$$

Dále budeme předpokládat, že se světlo bude pohybovat podél osy magnetizace,  $E_z = 0$ , zjednoduší se vztah (1.11) na vztah:

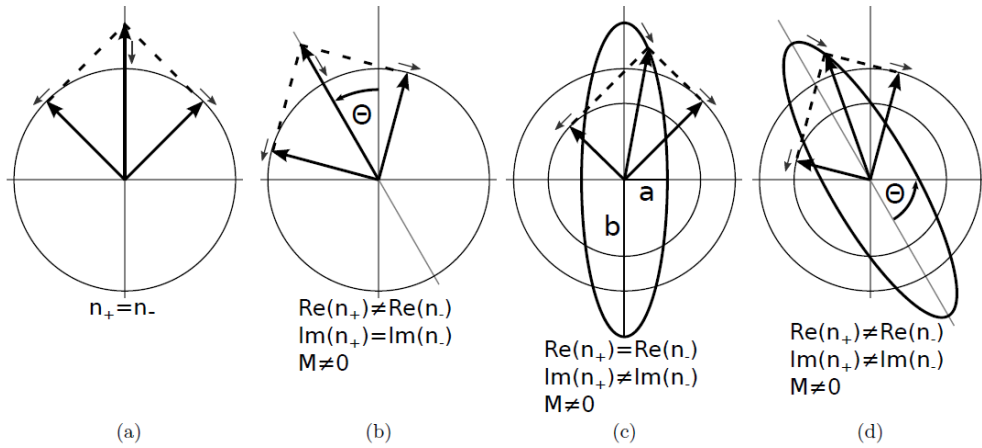
$$n_{\pm}^2 = \varepsilon_{xx} \pm \varepsilon_{xy}, \tag{1.12}$$

kde  $\pm iE_x = E_y$ .

Pro normální mody světla uvnitř materiálu platí, že mají charakter levotočivé a pravotočivé kruhově polarizované vlny s komplexními indexy lomu (1.13)  $n_+ = \sqrt{\varepsilon_+}$ ,  $n_- = \sqrt{\varepsilon_-}$ ,

$$D_+ = \varepsilon_0 \varepsilon_+ (E_x + iE_y), \quad D_- = \varepsilon_0 \varepsilon_- (E_x - iE_y). \quad (1.13)$$

Tento jev je nazýván jako magnetický kruhový dvojlom (orig. Magnetic circular dichroism)[1,2]. Na (obr. 1.3) můžeme pozorovat důsledek magnetického dvojlomu. Reálná hodnota indexu lomu popisuje rychlost světelné vlny v materiálu, zatímco imaginární část indexu lomu popisuje absorpci vlny v materiálu [1,2].



Obrázek 1.3: Zobrazení lineárně polarizované vlny pomocí dvou kruhově polarizovaných vln (a). Vznik Faradayovy rotace  $\theta$  pro rozdílné reálné složky indexu lomu a vznik anizotropie materiálu vyvolaná indukovanou magnetizací (b). Faradyova elipticita vyvolaná rozdílnou imaginární absorpcí kruhových vln (c). Faradayův efekt vyvolaný kombinací Faradayovy rotace a Faradayovy elipticity (d). Převzato a upraveno [1].

Faradayova rotace  $\Theta_F$  a elipticita  $\eta_F$  může být odvozená jako [1]

$$\Theta_F(\omega) = \frac{\pi L}{\lambda} \text{Re}(n_+ - n_-) \quad \left( = -\frac{\pi L \text{Im}(\varepsilon_{xy})}{\lambda n} \right),$$

$$\eta_F(\omega) = -\frac{\pi L}{\lambda} \text{Im}(n_+ - n_-) \quad \left( = -\frac{\pi L \text{Re}(\varepsilon_{xy})}{\lambda n} \right). \quad (1.14)$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $L$  je tloušťka materiálu. Vztah v závorkách je platný pro transparentní materiály  $\text{Re}(n) \gg \text{Im}(n)$ .

Doposud byl popisován Faradayův jev pro světlo, které prochází skrz materiál. Pokud se však dopadající světlo od materiálu odráží, jedná se o magnetooptický Kerrův jev (MOKE)[1,2].

### 1.3 Kerrův jev

Kerrův jev je kvadratický magnetooptický jev, který vzniká při dvojlomu v magnetických izotropních prostředích. Pokud vložíme izotropní materiál do magnetického pole, stane se z něj materiál anizotropní. Takový materiál má vlastnosti jako jednoosý krystal s optickou osou, jejíž směr je rovnoběžný se směrem vnějšího magnetického pole.

Předpokládejme, že světlo dopadá na materiál v kolmém směru rovnoběžně s magnetizací v z-tovém směru. Koeficient odrazu je podle Fresnela dán vztahem [1,2]

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (1.15)$$

kde  $n_1$  je index lomu prostředí ze kterého světlo přichází a  $n_2$  index lomu prostředí kde se bude šířit. Normální módy zavedené vztahem (1.14), jsou platné vně a uvnitř zkoumaného materiálu. Z předchozího výkladu je patrné, že indexy lomu mají za určitých podmínek vliv na kruhovou levotočivou a pravotočivou polarizaci světla. Pokud zkoumáme materiál v přirozené atmosféře, můžeme do vztahu (1.15) dosadit index lomu  $n_2 \sim 1$ . V souladu se vztahem (1.13) pro normální módy, můžeme vztah (1.15) upravit na vztahy [1,2]

$$\begin{aligned} r_+ &= \frac{n_+ - 1}{n_+ + 1} = r_x + ir_y & r_- &= \frac{n_- - 1}{n_- + 1} = r_x + ir_y, \\ \rightarrow r_x &= \frac{r_+ + r_-}{2} & \rightarrow r_y &= -\frac{i(r_+ - r_-)}{2}. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Lineárně polarizovaná dopadající vlna  $E_i = (E_x, 0, 0)$ , se odrazí díky nevymizelé komponentě  $r_y$  na vlnu  $E_o = (r_x E_x, r_y E_x, 0)$ . Právě tato nová komponenta  $E_y$  stáčí rovinu polarizace. Pokud budeme předpokládat malou rotaci ( $\tan \alpha \approx \alpha$ ), můžeme definovat Kerrův jev  $\Phi_k$ , jako komplexní poměr mezi oběma komponenty [1,2]

$$\Phi_k = \theta_k + i\eta_k = -\frac{r_y E_x}{r_x E_x} = \frac{i(n_+ - n_-)}{n_+ n_- - 1}. \quad (1.17)$$

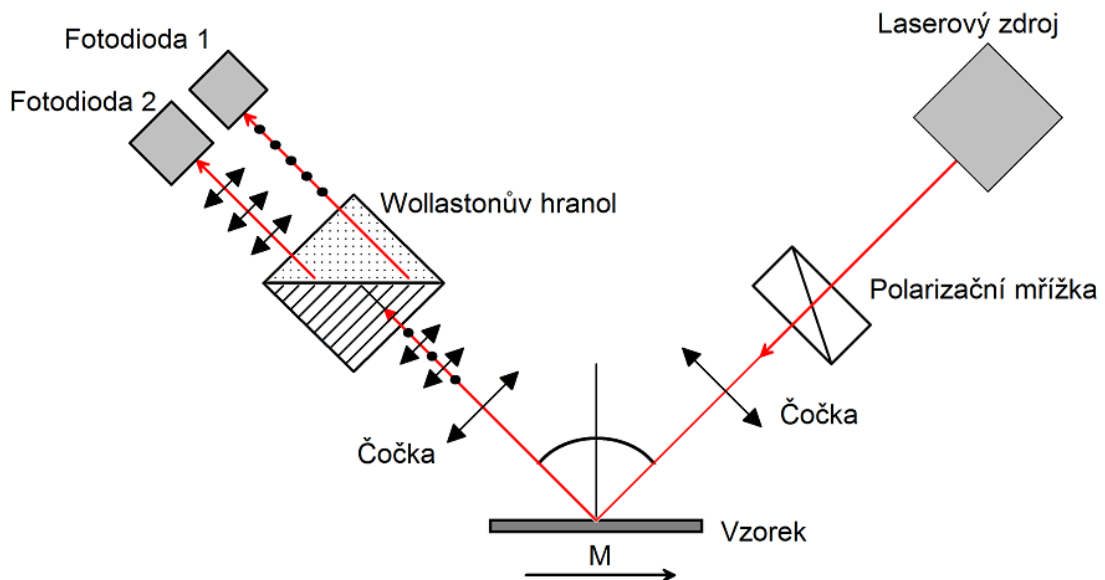
$\theta_k$  je Kerrova rotace a  $\eta_k$  je Kerrova elipticita zavedena jako amplituda odražených normálních módů. Pro materiály s  $\text{Re}(n) \gg \text{Im}(n)$  se Kerrova rotace a Kerrova elipticita zjednoduší na vztah (1.18)[1,2]

$$\theta_k = -\frac{\text{Re}(\varepsilon_{xy})}{n^2(n-1)} \quad \eta_k = -\frac{\text{Im}(\varepsilon_{xy})}{n^2(n-1)}. \quad (1.18)$$

Zajímavý je fakt, že Kerrova rotace koresponduje s Faradayovou elipticitou a naopak. Pomocí Faradyova a Kerrova jevu můžeme snadno studovat a měřit proces magnetizace. Pokud zkombinujeme měření v procházejícím a odraženém světle, můžeme odvodit celý tenzor permitivity.[1]

#### 1.4 Uspořádání Kerrova experimentu

Světelný svazek z laserové diody prochází polarizátorem, který změnil laserový svazek na lineárně polarizovaný svazek. Magnetizovaný vzorek indukuje Kerrovu rotaci  $\theta_K$  (elipticitu  $\eta_K$ ). Polarizační dělič (Wollastonův hranol) rozštěpí odražený laserový svazek na dva dílčí svazky, které nesou informaci o Kerrově rotaci. Rozštěpené svazky dopadají na fotodiody (obr. 1.4). Elektronika pomocí elektronických obvodů signál zpracuje. Signál je digitalizován a zpracován. Výsledkem měření je hysterezní smyčka. Hysterezní smyčka popisuje závislost Kerrovy rotace  $\theta_K$  na magnetické indukci [8,9].



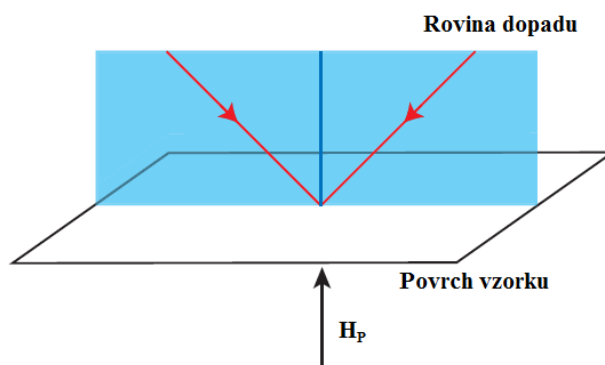
Obrázek 1.4: Longitudinální sestava pro měření Kerrova jevu.



MOKE experiment můžeme realizovat ve třech různých geometrických uspořádáních: polárním, longitudinálním (podélným) a transverzálním (příčným). V těchto geometriích je rozdílné působení směru magnetického pole na vzorek vzhledem k jeho rovině a rovině dopadu laserového záření [1,7].

### Polární geometrie

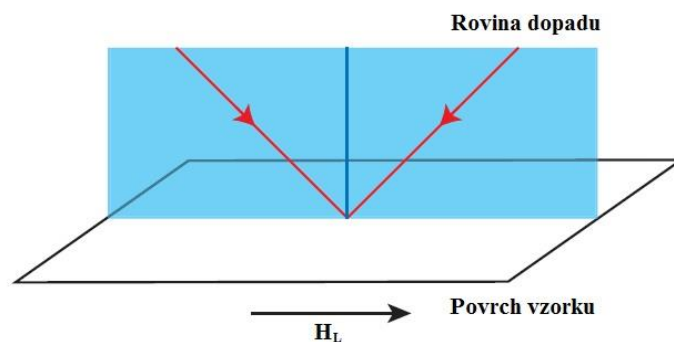
V polárním uspořádání je magnetické pole aplikováno souběžně k rovině dopadu světla na vzorek (obr. 1.5). Intenzita magnetického pole  $H_p$  působí kolmo k povrchu vzorku. Tato geometrie je citlivá na polarizaci a poskytuje informaci o Kerrově rotaci a elipticitě [7,8].



Obrázek 1.5: Polární geometrie MOKE. Převzato a upraveno[7].

### Longitudinální geometrie

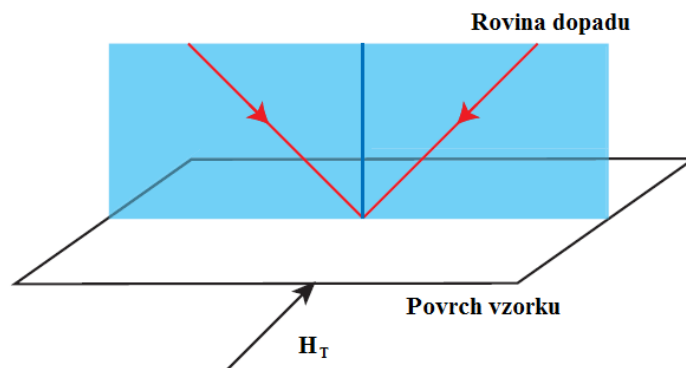
V tomto postavení je magnetické pole rovnoběžné s povrchem vzorku a rovinou dopadu (obr. 1.6). Odražené světlo je rovnoběžné se směrem intenzity magnetického pole  $H_L$ . Geometrie je taktéž citlivá na polarizaci a poskytuje informaci o Kerrově rotaci a elipticitě [7,8].



Obrázek 1.6: Longitudinální geometrie MOKE. Převzato a upraveno.[7]

## Transverzální geometrie

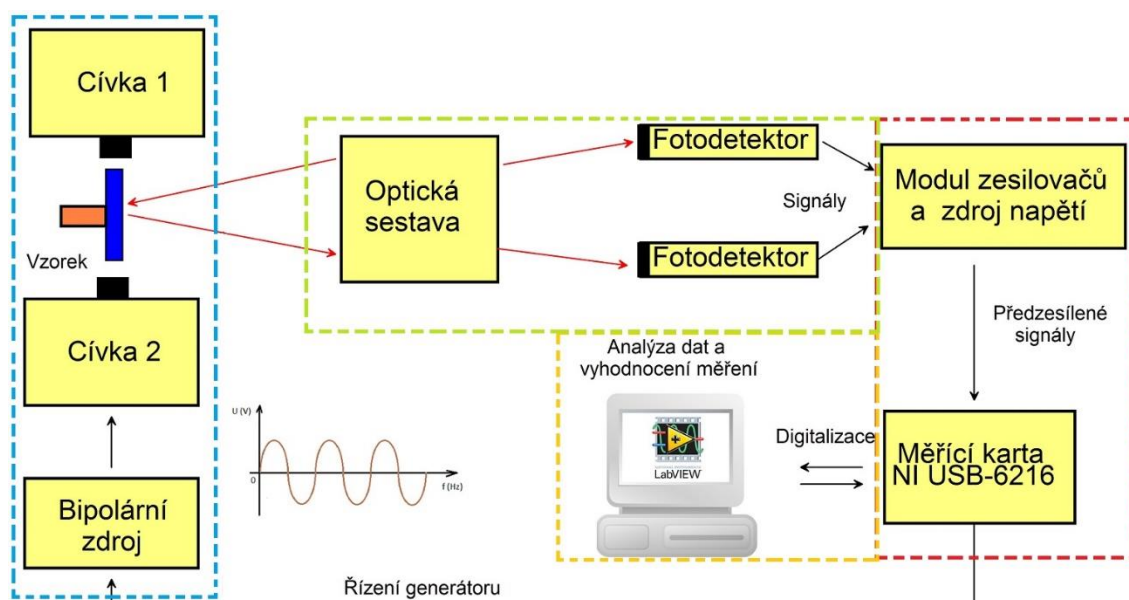
V tomto postavení je magnetické pole rovnoběžné s povrchem vzorku a kolmé na rovinu dopadu (obr. 1.7). Odražené světlo je kolmé ke směru intenzity magnetického pole  $H_T$ . Tato metoda není moc využívána, protože poskytuje slabý signál o Kerrově rotaci a elipticitě.[7,8]



Obrázek 1.7: Transverzální geometrie MOKE. Převzato a upraveno.[7]

## 2 Konstrukce aparatury

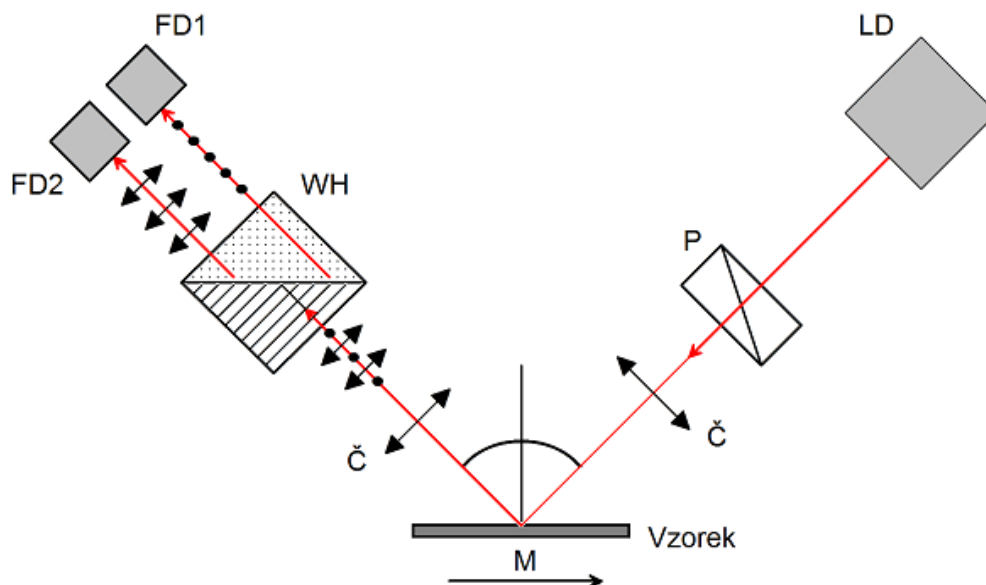
Aparatura byla vyvinuta na shodném principu, který je popsán v kapitole 1.4. V následující části je uveden popis zkonstruovaného Kerrova měřícího systému. MOKE experiment se skládá ze čtyř částí (obr. 2.1). První část tvoří blok optické sestavy s fotodetektory (zelený rámeček). Tento blok je složen z vhodných optických prvků. Červený blok obsahuje modul zesilovačů a zdroj napětí který je nutný pro provedení experimentu. Do bloku dále patří multifunkční měřicí karta, která zesílené signály digitalizuje. Především pak zesiluje signál detekovaný fotodiodami (fotodetektory). Modrý blok generuje pomocí cívek a výkonného zdroje externí magnetické pole. Softwarový žlutý blok zajišťuje plynulý chod měření a analýzu naměřených dat.



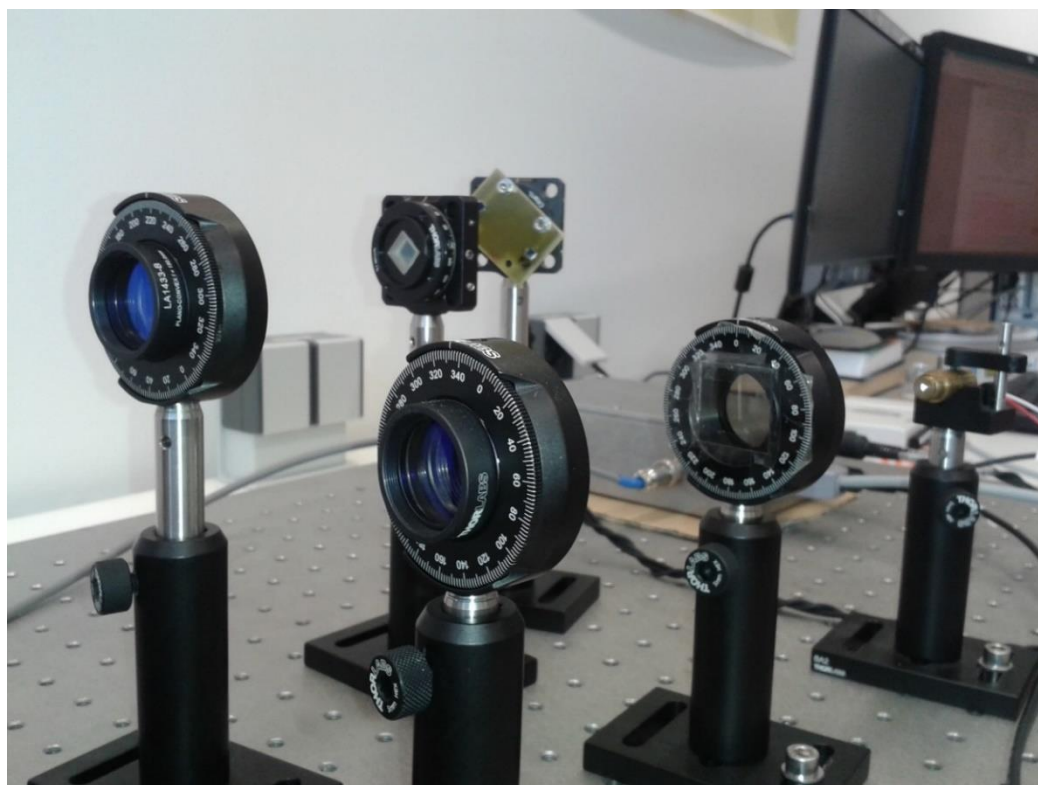
Obrázek 2.1: Blokový diagram MOKE experimentu.

### 2.1 Optická sestava

Optická část MOKE experimentu se skládá z laseru, polarizačního filtru, dvou čoček, zkoumaného vzorku umístěného mezi cívkami v magnetickém poli, děliče svazku a detektoru. Optické schéma sestavy v longitudinálním uspořádání použité v laboratoři pro měření magnetooptického Kerrova jevu je znázorněno na (obr. 2.2). Optické komponenty jsou umístěny na optickém stole a jsou ukotvené pomocí optomechanických držáků firmy Thorlabs. Toto řešení umožňuje snadnou manipulaci s jednotlivými prvky a jednoduché a rychlé justování optické trasy pro měření (obr. 2.3).



Obrázek 2.2: Schéma optické sestavy MOKE experimentu, kde LD - laserová dioda, P - polarizátor, Č – optické čočky, M - vzorek umístěný v magnetickém poli, WH – Wollastonův hranol, FD1 a FD2 jsou PIN-fotodiody.



Obrázek 2.3: Optická sestava MOKE experimentu.

## **Laser**

Jako světelný zdroj je použita laserová dioda (F-LASER 5mW) s regulovatelnou intenzitou svazku. Regulace intenzity je podrobně popsána v elektronické sekci. Dominantní vlnová délka laserového svazku je 650 nm. Výkon laserové diody je 5 mW.

## **Polarizační filtr**

Polarizační filtr (P) propouští svazek z laserové diody, pouze v jednom směru. Filtr je připevněn na objímku, kterou můžeme otáčet. V našem experimentu je použit lineárně polarizovaný filtr [10], který je nastaven tak, aby na vzorek dopadalo záření lineárně polarizované ve směru kolmém na rovinu danou směrem dopadajícího a odraženého svazku.

## **Čočky**

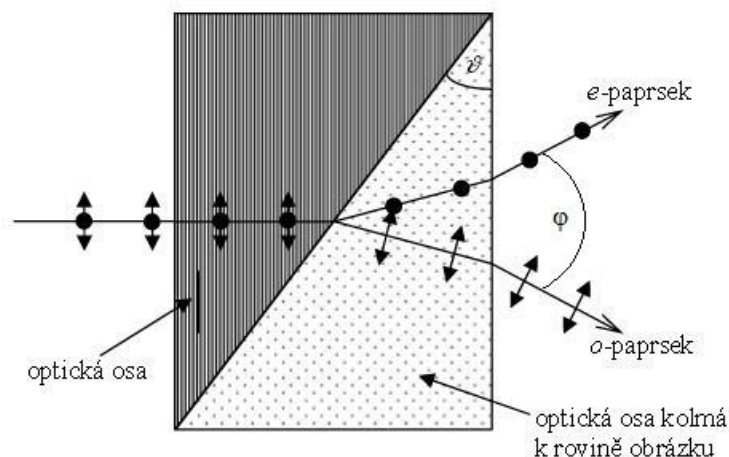
V experimentu jsou použity dvě čočky (Č) LA1433-B-ML. První čočka, která je umístěná před vzorkem, fokusuje laserový svazek na vzorek a umožňuje měnit velikost stopy svazku a tak volit velikost měřené oblasti. Druhá čočka slouží k fokusaci laserového svazku na povrch fotodetektorů. Čočky jsou plano-konvexní a jejich ohnisková vzdálenost  $f = 150$  mm. Čočky jsou navrženy pro rozsah vlnových délek od 650 nm do 1050 nm [11].

## **Vzorek**

Pro testování byl použit vzorek připravený metodou fyzikální depozicí tenké vrstvy (PVD). Vzorek se připravuje naprášením tenké vrstvy zkoumaného materiálu na povrch skla (substrát) v definované atmosféře [12].

## **Dělič svazku**

Jako dělič svazku je použit Wollastonův hranol (obr. 2.4), který rozštěpí odražený laserový svazek ze vzorku na dva dílčí svazky, které dopadají na aktivní plochu fotodetektoru. Wollastonův hranol (Thorlabs - WP10) je vyroben z kalcitu a skládá se ze dvou trojbokých hranolů [13]. Pod obrázkem 2.4 je uveden popis šíření světla Wollastonovým hranolem.

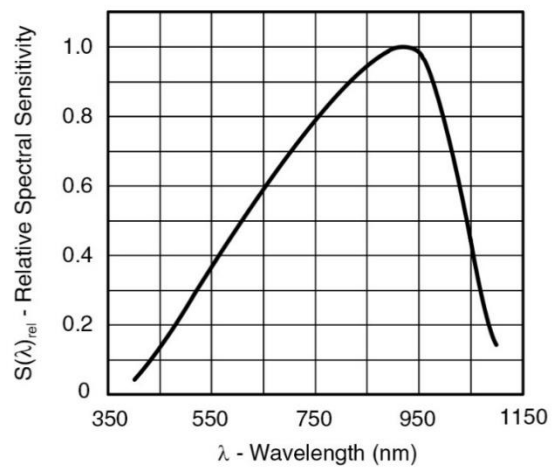


Obrázek 2.4: Průchod světla Wollastonovým hranolem a jeho dělení na řádný a mimořádný paprsek.[14].

V levé části hranolu se šíří řádný a mimořádný paprsek stejným směrem, ale s jinými rychlostmi. Na rozhraní se mimořádný paprsek (polarizovaný v levé části v rovině řezu) stává řádným paprskem s odpovídající změnou indexu lomu. Podobně se řádný paprsek stává mimořádným. Separační úhel, pod kterým oba paprsky opouští hranol je  $\varphi = 20^\circ$  [14,15].

### Fotodetektory

Pro detekci intenzity laserového svazku, který jsme Wollastonovým hranolem rozdělili na řádný a mimořádný paprsek, jsou použity fotodiody. Detektor je tvořen dvěma PIN fotodiodami BPW34, které jsou připojeny na společnou desku. Deska s PIN fotodiodami je připevněna na rotačním držáku. PIN fotodiody jsou velice citlivé, jejich aktivní oblast má plochu  $7,5 \text{ mm}^2$ , mají nízký temný proud a jsou navrženy pro viditelnou a blízkou infračervenou oblast. Jejich relativní spektrální citlivost je uvedena na (obr. 2.5). PIN fotodiody generují proud, který je přímo úměrný dopadajícímu laserovému záření. Proud je pomocí elektroniky, převeden na napětí. Tento proces je podrobněji popsán v řídicí elektronice kap. 3.2.



*Obrázek 2.5: Relativní spektrální citlivost v závislosti na vlnové délce světla. Převzato a upraveno.[16]*

### 3 Elektronická jednotka

Pro sestavovaný MOKE experiment byl navržena a sestavena elektronická jednotka (EL), která slouží ke zpracování a zesílení signálu z fotodiod a současně pracuje jako zdroj napětí pro všechny dílčí části experimentální sestavy, kterými jsou: Hallova sonda (SS49), laserová dioda a teplotní čidlo (LM35D). Elektronická jednotka obsahuje vlastní stabilizovaný zdroj napětí, tři vstupní měřicí kanály a jeden výstupní kanál. Vstupní a výstupní kanály jsou do přístroje přivedeny pomocí konektorů. Na (obr. 3.1) je ukázána elektronická jednotka bez připojených periferních senzorů a zařízení.

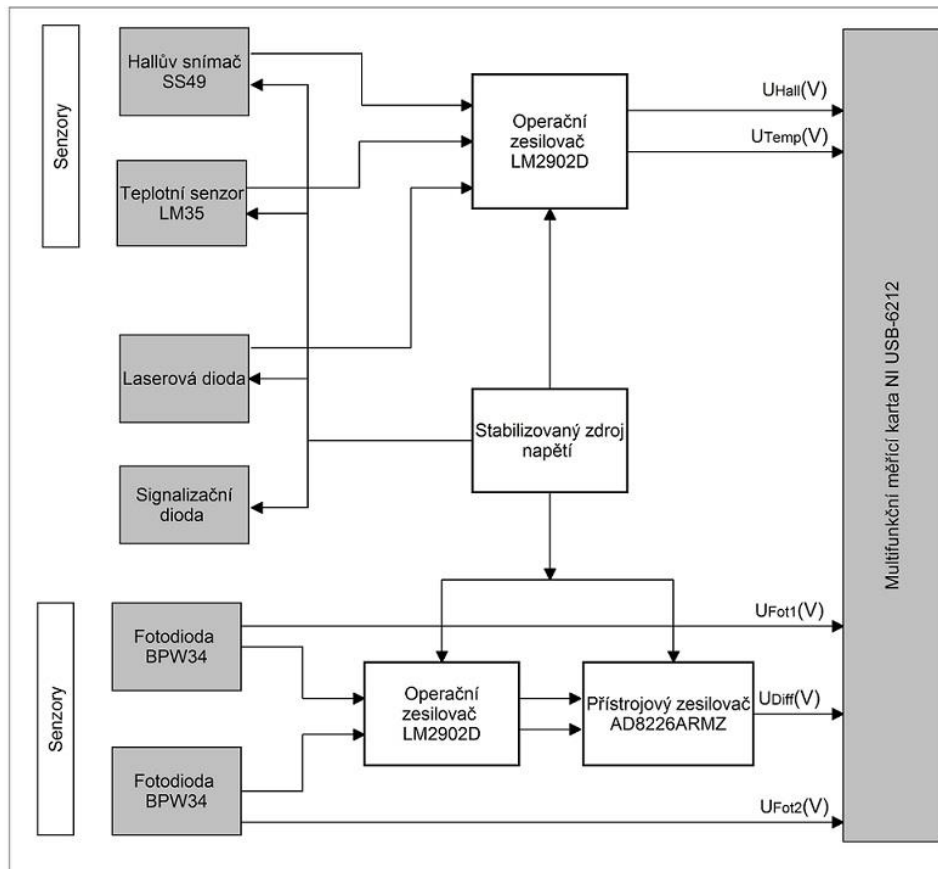


Obrázek 3.1: Elektronická jednotka MOKE experimentu.

Uvnitř řídicí elektroniky je deska plošných spojů. Na blokovém diagramu (obr. 3.2) můžeme vidět jednotlivé části desky, kterými jsou stabilizovaný zdroj napětí, dvojice čtyř-kanálových operačních zesilovačů LM2902D a přístrojový zesilovač AD8226ARMZ. Do elektronické jednotky jsou pomocí konektorů připojeny: teplotní senzor LM35D, Hallova sonda SS49 a dvojice PIN fotodiod BPW34. Stabilizovaný zdroj napájí, všechny integrované obvody na desce a vnější senzory. První operační zesilovač LM2902D zpracovává signál z PIN fotodiod, na které dopadá odražené a rozštěpené světlo ze vzorku. Signál je poté přiveden do přístrojového zesilovače, který zesiluje jejich rozdíl. Druhý zesilovač LM2902D slouží k detekci signálu z Hallové sondy, teplotního senzoru LM35D a zajišťuje regulaci intenzity laserové diody. Na výstupní konektor řídicí elektroniky je vyvedeno šest výstupů: napětí na Halově sondě  $U_{Hall}$ , napětí na jednotlivých fotodiodách  $U_{Fot1}, U_{Fot2}$ , zesílený rozdíl signálu z obou fotodiod  $U_{diff}$ ,



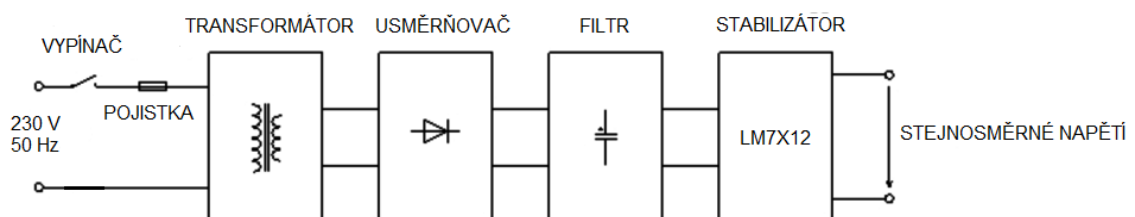
napětí na teplotním senzoru  $U_{Temp}$ , které jsou přivedeny do měřicí karty. Všechny výstupy jsou měřeny proti nulovému potenciálu elektronické jednotky. V následujícím textu jsou podrobně rozepsané jednotlivé části blokového diagramu elektronické desky.



Obrázek 3.2: Blokový diagram elektronické vývojové desky.

### 3.1 Stabilizovaný symetrický lineární zdroj napětí

Deska plošných spojů má svůj vlastní stabilizovaný lineární symetrický napájecí zdroj. Zdroj se skládá ze čtyř základních částí: transformátoru, usměrňovače, filtru a stabilizátoru. Na (obr. 3.3) je blokové schéma jedné větve symetrického zdroje.



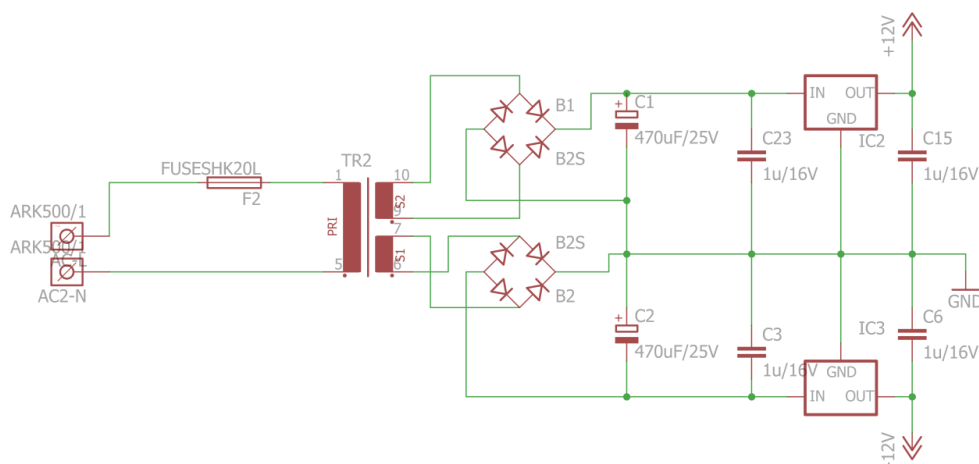
Obrázek 3.3: Blokové schéma lineárního napájecího zdroje [17].

**Síťový transformátor** transformuje vstupní střídavé napětí na nižší střídavé napětí. Na primární vinutí transformátoru EI 382 1194 je přivedeno přes kolébkový vypínač a tavnou pojistku (250V/6.3A) síťové napětí 230V/50Hz. Transformátor má dvě sekundární vinutí s výstupním napětím +15 V a -15 V. Jeho výkon je 4,5VA. Výstupní proud na každém ze sekundárních vinutí má hodnotu 150 mA. Zdroj galvanicky odděluje další obvody na vývojové desce od síťového rozvodu [18].

V návrhu jsou pro kladnou a zápornou větev napájecího zdroje použity dva **usměrňovací Graetzovy můstky** v SMD provedení. Usměrňovač přemění vstupní střídavé napětí ze sekundárního vinutí transformátoru na zvlněné stejnosměrné kladné napětí v kladné větvi a stejnosměrné záporné napětí v záporné větvi zdroje [17].

**Filtrační elektrolytický kondenzátor** hromadí náboj a dodává ho do obvodu při poklesu zvlněného vstupního napětí. Velikost filtračního kondenzátoru v kladné a záporné větvi napájecího zdroje je 470  $\mu\text{F}/25\text{ V}$  [17].

Poslední částí blokového schématu je **integrováný lineární stabilizátor**. V kladné větvi napájecího zdroje je pevný lineární stabilizátor L7812 s výstupním stejnosměrným napětím 12 V. V záporné větvi napájecího zdroje je lineární stabilizátor L7912 s výstupním stejnosměrným napětím -12 V. Oba stabilizátory mají na svém vstupu a výstupu filtrační kondenzátory. Elektronické schéma symetrického zdroje s kladným napětím +12 V , záporným napětím -12 V a společnou zemí je znázorněno na (obr. 3.4) [18].



Obrázek 3.4: Elektronické schéma symetrického lineárního napájecího zdroje.

Elektronické schéma signalizační diody, která slouží jako indikátor, zda je přístroj zapnutý nebo vypnutý je znázorněno na (obr. 3.5). Proud tekoucí diodou je omezen předřadným odporem  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$  [18].



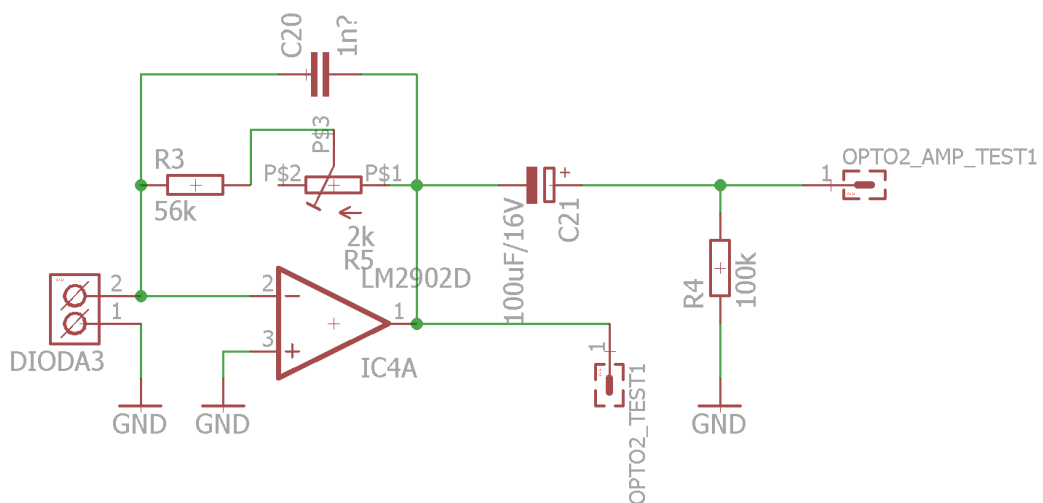
Obrázek 3.5: Signalizační dioda.

### 3.2 Operační zesilovače

Důležitou součástí elektronické jednotky jsou dva čtyř-kanálové operační zesilovače LM2902, které plní na vývojové desce několik funkcí. Dva kanály prvního operačního zesilovače jsou zapojeny jako převodník  $I/U$  a převádí proud z fotodiody na napětí [19].

Proud je generovaný PIN fotodiódou, která má katodu přivedenou na záporný vstup operačního zesilovače a anodu na společnou zem (obr. 3.6). PIN Fotodioda pracuje ve fotovoltaiickém režimu. PIN fotodioda generuje proud, který je úměrný dopadajícímu záření na její aktivní oblast. Operační zesilovač udržuje nulové napětí na diodě. Proud  $I_d$  je zápornou zpětnou vazbou přes rezistor a trimr převeden na napětí podle vztahu.

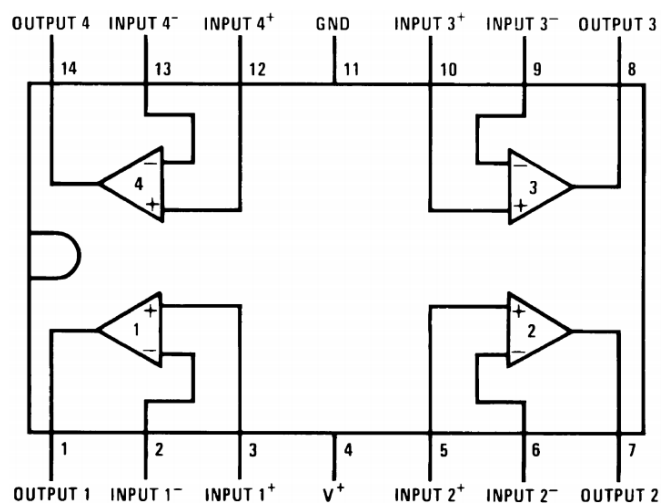
$$U_{\text{out}} = (R_3 + R_5) \times I_d \quad (3.1)$$



Obrázek 3.6: Operační zesilovač zapojený jako převodník  $I/U$ .

Dva kanály druhého operačního zesilovače jsou určeny k zesílení a zvětšení rozsahu signálů z Hallovy sondy SS49 a teplotního čidla a LM35D a poslední třetí kanál druhého operačního zesilovače je využit pro regulaci intenzity laserové diody.

Operační zesilovač LM2902 má pro každý kanál vyhrazen kladný a záporný vstupní pin a jeden výstupní pin (obr. 3.7). Na napájecí pin VCC (4) je přivedeno kladné napětí +12 V a na GND pin (11) je přivedeno záporné napětí -12 V – jedná se o symetrické napájení operačního zesilovače [18,20].



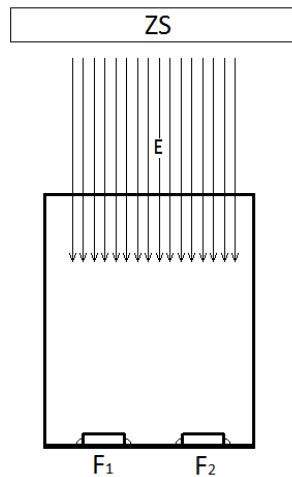
Obrázek 3.7: Vnitřní diagram operačního zesilovače LM2902. Převzato a upraveno. [20]

### Linearita kanálů operačního zesilovače

Jednotlivé kanály operačního zesilovače nemají stejné zesílení. Před kalibrací byla naměřena odchylka mezi kanály při různých hodnotách osvětlení přibližně 6 % (viz tabulka 3.1 - odchylky před kompenzací). Při zesilování signálu z fotodiody, může docházet k rozdílným hodnotám výstupního napětí a tím i ke zkreslení měření. Trimrem, který je zařazen v záporné zpětné vazbě, můžeme upravit zesílení a vyrovnat odchylku mezi kanály.

### Postup kompenzace je následující:

Na fotodiody necháme dopadat homogenně rozptýlené světlo ze světelného zdroje (obr. 3.8). Pro rozptýlení světla bylo použito pauzovacího papíru. Při nízké intenzitě světla se kompenzace provádí obtížně, protože na aktivní oblast fotodiody dopadá málo světla a na výstupu operačního zesilovače je nízké napětí. Fotodiody jsou zapojeny podle schématu na obrázku 3.6.



Obrázek 3.8: Ze světelného zdroje ZS, necháme dopadat kolmo na povrch krabice s pauzovacím papírem světelné paprsky o intenzitě  $E$ . Světlo poté dopadá na povrch fotodiody ( $F_1$  a  $F_2$ ), které jsou připojeny na kanály operačního zesilovače.

Na výstupy obou operačních zesilovačů připojíme voltmetry, kterými budeme sledovat dosažené napětí. Při zvoleném osvětlení budeme na jednom kanále operačního zesilovače ladit trimrem výstupní napětí tak, aby byly na obou voltmetrech stejné hodnoty napětí. Dosaženou kompenzaci můžeme na voltmetrech ověřit pro různá osvětlení. V (tab. 3.1) jsou uvedeny hodnoty napětí na kanálech před a po kompenzaci.

Kompenzace kanálů LM2902					
Odchyšky napětí před kompenzací			Odchyšky napětí po kompenzaci		
Kanál 1 $U_1$ (V)	Kanál 2 $U_2$ (V)	Rozdíl $ U_1 - U_2 $ (V)	Kanál 1 $U_1$ (V)	Kanál 2 $U_2$ (V)	Rozdíl $ U_1 - U_2 $ (V)
-6,82	-6,48	0,34	-7,19	-7,14	0,05
-6,25	-5,95	0,30	-5,76	-5,72	0,04
-5,39	-5,12	0,27	-4,98	-4,95	0,03
-4,16	-3,89	0,27	-3,41	-3,37	0,04
-3,68	-3,38	0,30	-2,45	-2,40	0,05
-2,58	-2,30	0,28	-1,77	-1,73	0,04

Tabulka 3.1: Hodnoty napětí na kanálech LM2902 před a po kompenzaci.

Při měření má signál z fotodiody podobu stejnosměrného napětí, jehož velikost je daná intenzitou osvětlení fotodiody. Pro samotné měření je tento signál nezajímavý. Může však způsobit saturaci diferenciálního zesilovače, proto je nutné stejnosměrný signál odstranit. Na tomto signálu je namodulovaný střídavý signál, který je způsoben změnou osvětlení fotodiody v důsledku změny aplikovaného pole v cívkách. Abychom mohli změřit užitečný střídavý signál, odstraníme jeho stejnosměrnou složku zařazením CR článku na výstup operačního  $U/I$  zesilovače [21]. Časovou konstantu  $\tau$  CR článku vypočítáme podle vztahu (3.2).

$$\tau = CR \quad (3.2)$$

Kondenzátor o kapacitě  $C = 100 \times 10^{-6}$  F a odpor  $R = 100 \times 10^3 \Omega$  vytvoří časovou konstantu  $\tau = 10$  s. Za tuto dobu  $CR$  člunek odfiltruje stejnosměrnou složku. Signál je poté přiveden na vstupy přístrojového zesilovače. Při jakékoliv změně osvětlení musíme počkat 2 – 3 násobek časové konstanty, aby došlo k odstranění stejnosměrné složky a k ustálení střídavého signálu.

### 3.3 Rozdílový zesilovač

Rozdílový zesilovač je typ elektronického zesilovače, který zesiluje rozdíl mezi dvěma vstupy. Tyto vstupy jsou obvykle značeny  $V_{in+}$  (neinvertující vstup) a  $V_{in-}$  (invertující vstup). Rozdílový zesilovač zapojený podle schématu na obr. 3.3 pracuje správně, pokud jsou poměry hodnot rezistorů přesně dodrženy. Zesílení  $A_u$  rozdílového zesilovače bude záležet na poměru odporů podle vztahu [18]

$$A_u = \frac{R_{B1}}{R_{A2}} = \frac{R_{D1}}{R_{C2}}. \quad (3.3)$$

Výstupní napětí  $V_{out}$  rozdílového zesilovače je dáno vztahem

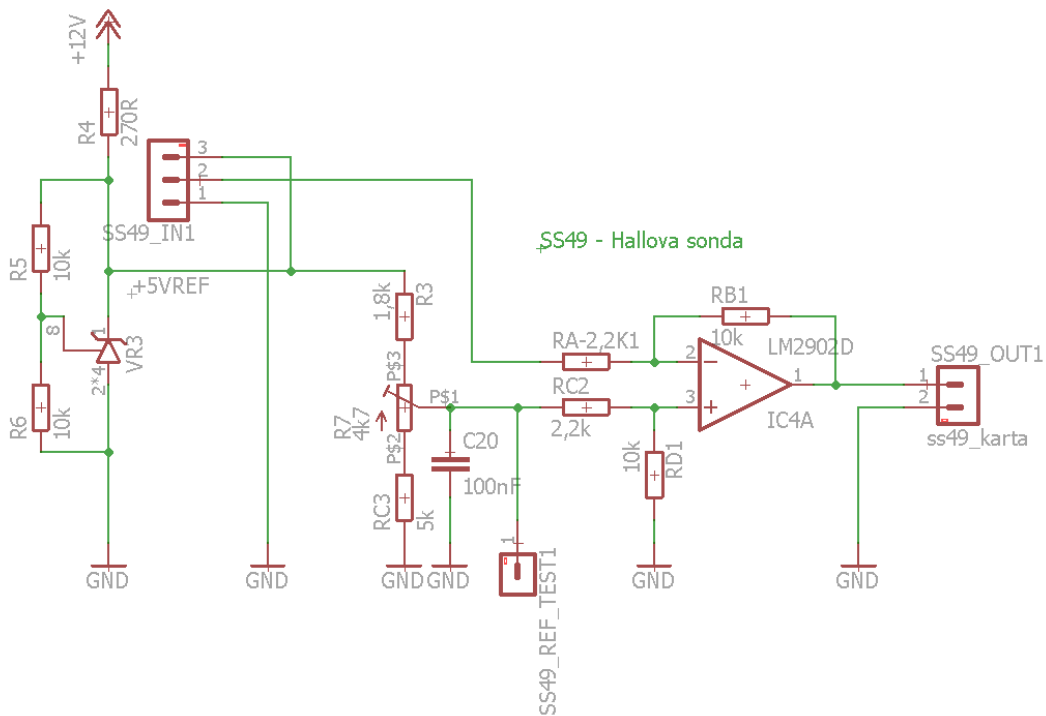
$$V_{out} = A_u(V_{in+} - V_{in-}). \quad (3.4)$$

Rozdílový zesilovač slouží k zesílení a zvětšení výstupního rozsahu napětí z Hallovy sondy, které měří magnetické pole v okolí cívek (obr. 3.9). Zvětšení výstupního rozsahu Hallovy sondy zajistí vyšší přesnost měření magnetického pole. Pomocí nastavitelné reference TL431 (VR3) a děliče napětí ( $R5$  a  $R6$ ) získáme referenční napětí 5 V. Při této hodnotě napájecího napětí byla provedena kalibrace Hallovy sondy. Hallova sonda je proporcionální. Při nulovém magnetickém poli, je na výstupu Hallovy sondy napětí 1,9 V. Toto referenční napětí  $U_{ref} = 1,9$  V je pomocí trimru nastaveno a přivedeno do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače. Pokud se bude měnit hodnota magnetického pole  $B$ , bude se měnit výstupní napětí Hallovy sondy  $U_{Hall}$ , v závislosti na kalibrační konstantě  $k$ , podle vztahu

$$U_{Hall} = U_{ref} + kB. \quad (3.5)$$

Rozdílový zesilovač toto napětí odečte od nastavené reference a zesílí podle vztahu

$$U_{out} = A_u \cdot (U_{Hall} - U_{ref}). \quad (3.6)$$

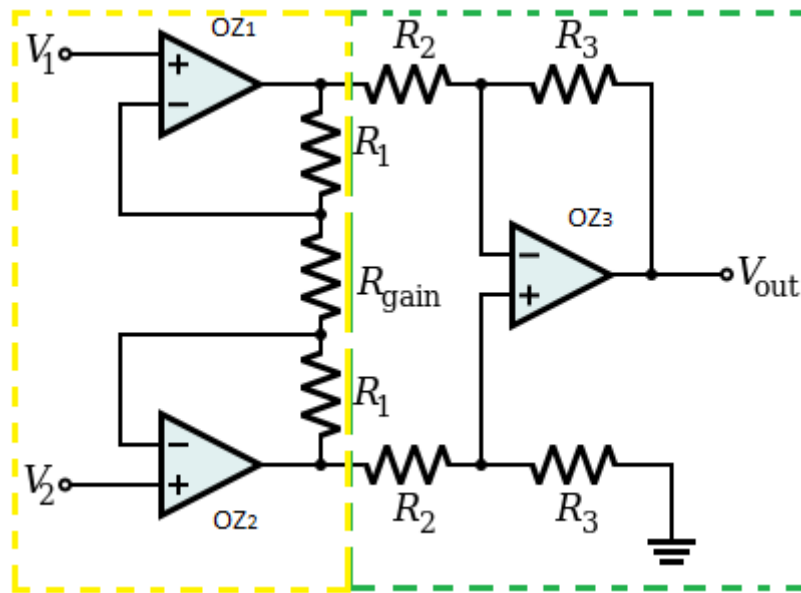


Obrázek 3.9: Schéma elektronického obvodu pro zesílení výstupního napětí z Hallovy sondy.

Odpory jsou ve schématu navrženy tak aby vstupní signál zesilovaly 4,5 krát. Ve schématu mají odpory  $R_{B1}$ ,  $R_{D1}$  hodnotu  $R_{B1} = R_{D1} = 9,99 \text{ k}\Omega$  a odpory  $R_{C2}$ ,  $R_{A2}$  hodnotu  $R_{A2} = R_{C2} = 2,21 \text{ k}\Omega$ . Signál musíme při softwarovém zpracování vydělit zesílením a pomocí kalibrační křivky převést na magnetické pole. Postup kalibrace je uveden v kapitole 4.2.

### 3.4 Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač je typ rozdílového zesilovače s uzavřenou smyčkou zpětné vazby, který zesiluje rozdíl vstupních napětí. Přístrojový zesilovač je vybaven dvěma vstupními buffery, které zajistí vysokou vstupní impedanci a neovlivní vstupní signál (obr. 3.10). Přístrojové zesilovače se proto používají především v oblasti měření a testování, protože jsou velmi přesné a stabilní [18]. Mezi důležité vlastnosti přístrojového zesilovače patří velmi nízký DC offset, nízký drift, nízký šum, vysoký zisk (většinou laditelný) a velmi vysoká vstupní impedance [18]. Elektronické schéma obecného přístrojového zesilovače je znázorněno na obr. 3.10.

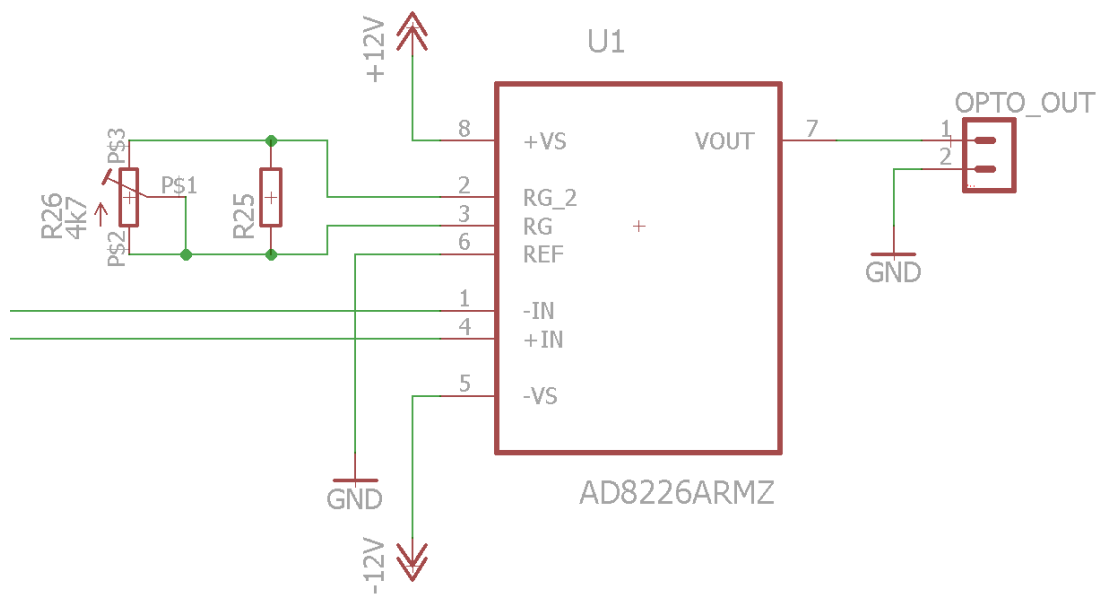


Obrázek 3.10: Schéma typického elektronického obvodu přístrojového zesilovače [22].

Schéma přístrojového zesilovače můžeme rozdělit na dvě části. V první žluté části se nachází operační zesilovače  $OZ_1$  a  $OZ_2$ . Zesilovače slouží jako vstupní buffery se zesílením, který udává odpor ( $R_1$ ) v negativní zpětné vazbě  $OZ_1$  a  $OZ_2$ . Mezi zesilovači se nachází rezistor ( $R_{\text{gain}}$ ), kterým nastavíme celkové zesílení přístrojového zesilovače. Na pravé straně je v zeleném rámečku standardní diferenciální zesilovač, jehož funkce je popsána v předchozím odstavci [18,22].

Přístrojový zesilovač je napájen symetrickým napětím. Do invertujícího a neinvertujícího vstupu (1 a 4) přístrojového zesilovače AD8226 (obr. 3.11), je přiveden signál z fotodiody upravený pomocí  $I/U$  převodníků a zbavený stejnosměrné složky  $CR$  filtrem (viz. Kapitola 3.2). Přístrojový zesilovač signál odečte a zesílí jej 495 krát. Zesílení nastavujeme kombinací odporů  $R_{25}$  a  $R_{\text{gain}}$  podle předepsaných hodnot v technickém manuálu přístrojového zesilovače. Výstupní napětí ( $V_{\text{out}}$ ) přístrojového zesilovače je úměrné Kerrově rotaci.



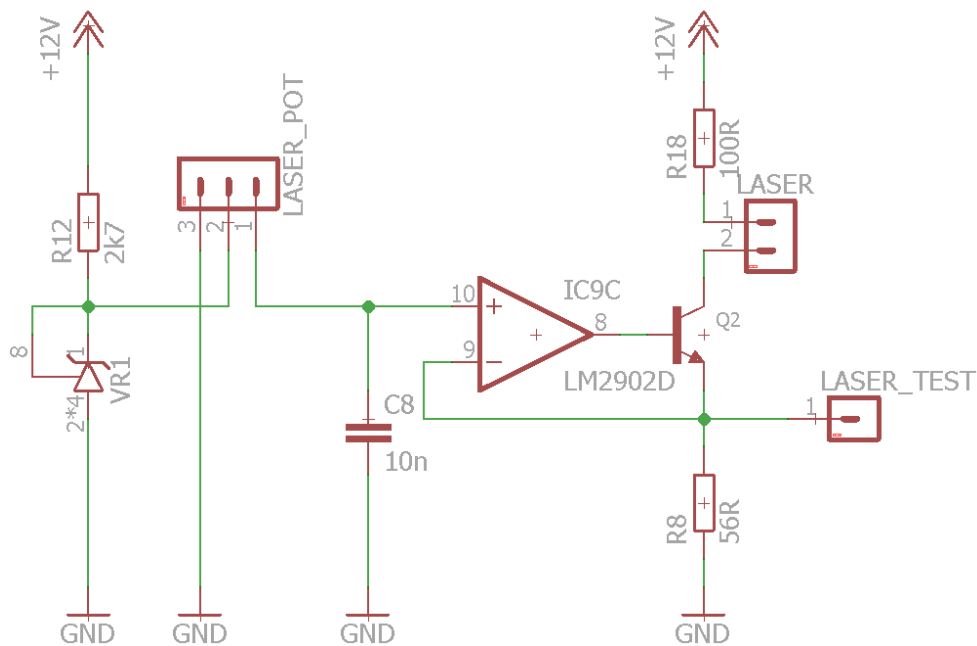


Obrázek 3.11: Schéma integrovaného elektronického obvodu přístrojového zesilovače.

### 3.5 Regulátor intenzity osvětlení laserové diody

Pro měření je výhodná možnost regulace intenzity laserového svazku, aby bylo možné snadno upravit intenzitu záření na fotodiodách na takovou úroveň, aby nedocházelo k její saturaci a současně byl dostatečně využit celý dynamický rozsah diody.

Pro regulaci intenzity je využit jeden kanál operačního zesilovače LM2902 a externí tranzistor BC817. Obvod s operačním zesilovačem a externím tranzistorem je zapojen jako proudový zdroj, který je řízen napětím, viz (obr. 3.12) [18]. Napětí 5V z reference (TL431) je regulováno potenciometrem v rozsahu od 0 do 2,5 V. Regulované napětí je přivedeno na kladný vstup operačního zesilovače. Na záporný vstup operačního zesilovače je přivedeno napětí ze snímacího odporu ( $R8$ ). Napětím na potenciometru nastavujeme napětí na odporu  $R8$ . Pokud je na odporu konstantní napětí, protéká diodou konstantní proud. Maximální proud omezíme odporem  $R8$  na  $I_{\max} = 40$  mA, který nezničí laserovou diodu.



Obrázek 3.12: Schéma elektronického obvodu pro regulaci intenzity laserové diody.

### 3.6 Elektronické schéma měření teploty

Na kanál operačního zesilovače LM2902D je přiveden signál z teplotního senzoru LM35D. Senzor má tři vodiče (+12 V,  $V_{out}$ , GND), je kalibrován ve stupních Celsia, jeho teplotní rozsah je od  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  a s konstantou  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . Operační zesilovač je zapojen jako neinvertující zesilovač a slouží k zvětšení rozsahu teplotního čidla (obr. 3.13)[18]. Do neinvertujícího vstupu přivádíme výstupní napětí z teplotního čidla ( $V_{out}$ ). Zesílení je dáno poměrem odporů a trimru v invertující větvi operačního zesilovače. Pomocí trimru můžeme doladit velikost zesílení. Výstupní napětí operačního zesilovače je dáno vztahem (3.6).

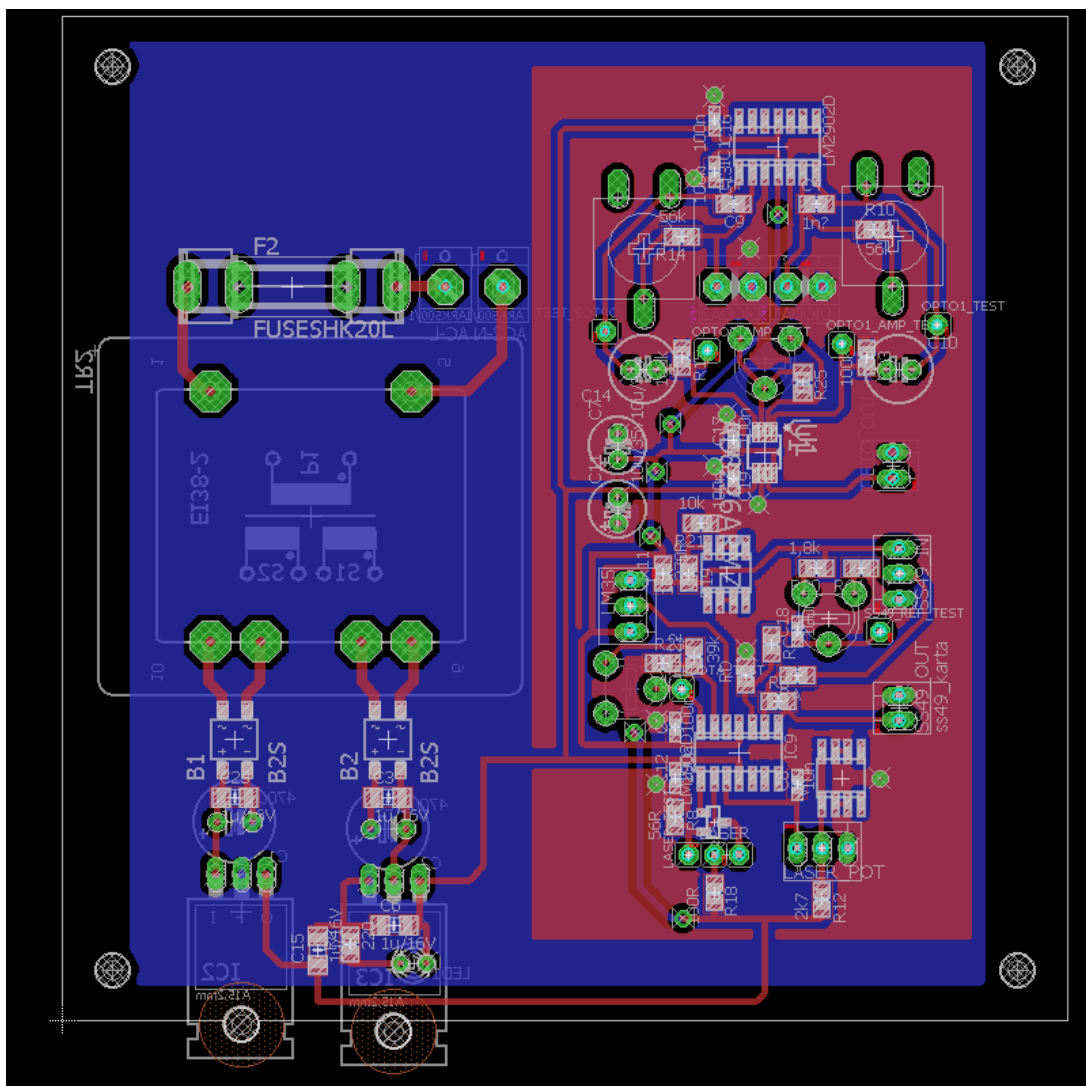
$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{22} + R_{24}}{R_{25}} \right) \quad (3.6)$$

Napětí musíme při softwarovém zpracování vydělit zesílením a pomocí měřítka převést na stupně Celsia. Měření teploty slouží ke kontrole teploty jádra cívky, které je soustavně demagnetováno.



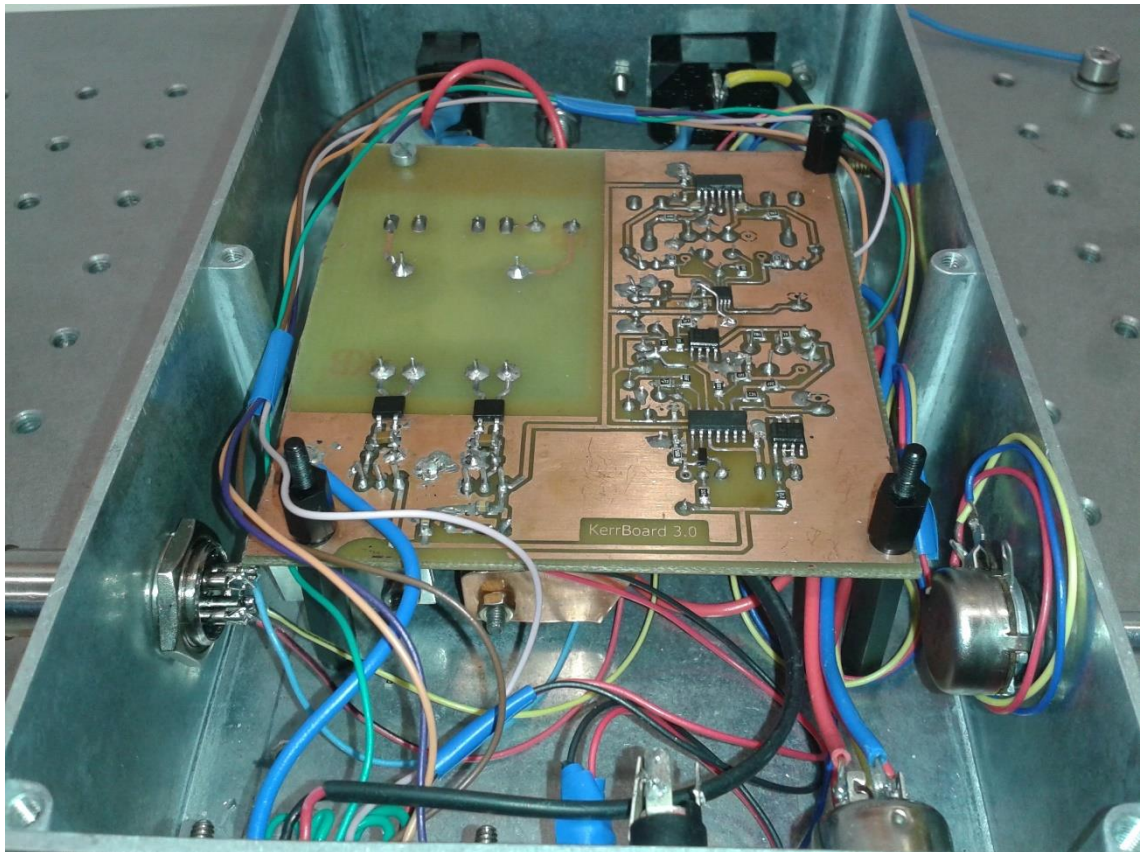


Z elektronického schématu byl vytvořen Layout (grafické rozvržení tiskové plochy (obr. 3.15). Deska plošných spojů (DPS) je oboustranná, to znamená, že jedna strana desky je osazena obvody (obr. 3.14) a druhá strana desky slouží jako nulový potenciál (zem desky). Deska plošných spojů (obr. 3.15) byla vyrobena technikou mokrého leptání a osazena (seznam součástek je uveden v příloze A). Při „oživování“ desky plošných spojů byly odzkoušeny správné funkce všech jednotlivých částí.



Obrázek 3.15: Layout elektronické jednotky.

Elektronická jednotka je znázorněna na obr. 3.16.

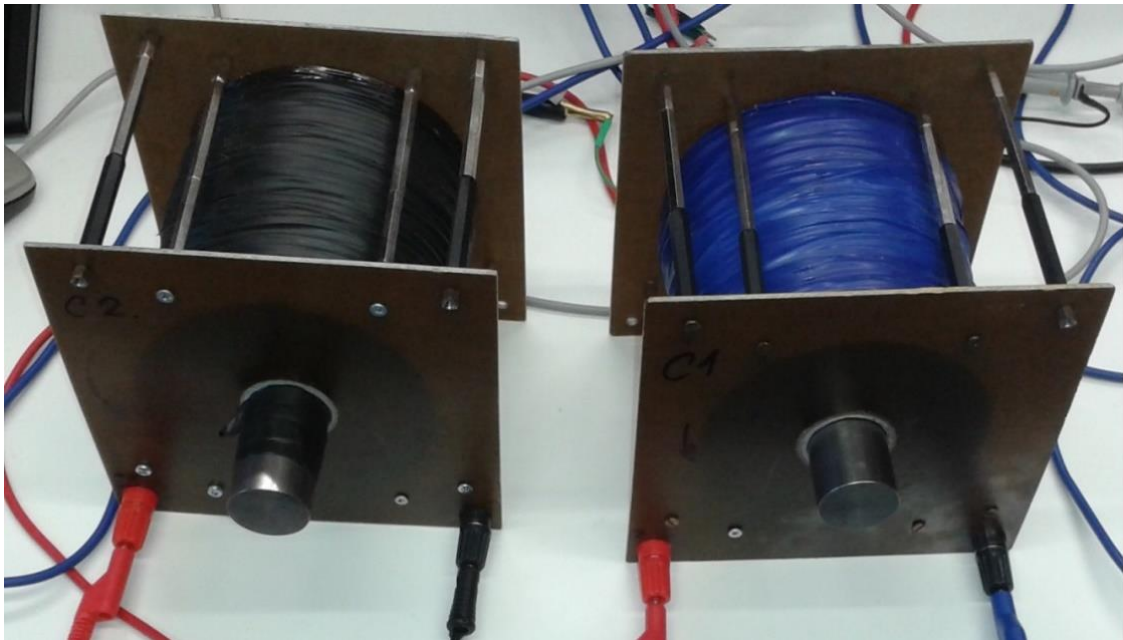


*Obrázek 3.17: Elektronická jednotka.*

## 4 Generování magnetického pole v solenoidu

Pro měření MOKE je nutné generovat střídavé magnetické pole. To je vytvářeno pomocí dvou cívek a výkonného bipolárního operačního zdroje KEPCO BOP 72-6ML-4886, který je schopný dodávat výkon až 400 W. Zdroj dodává proud do dvou robustních cívek, které jsou konstruovány tak, aby umožňovali provádění experimentů ve všech experimentálních uspořádáních, polárním, longitudinálním a transverzálním.

Cívky jsou tvořeny namotaným měděným drátem na izolační kruhové nosné kostře, která je upevněna mezi dvěma deskami (obr. 4.1). Doprostřed cívky je zasunuto feritové jádro o průměru  $d = 28$  mm. Vložené jádro by mělo být ideálně s malou remanentní magnetizací. U cívek jsme mohli stanovit jejich sériový odpor a indukčnost s jádrem a bez jádra. Parametry cívek jsou uvedeny v (tab. 4.1).



Obrázek 4.1: Cívky pro buzení magnetického pole.

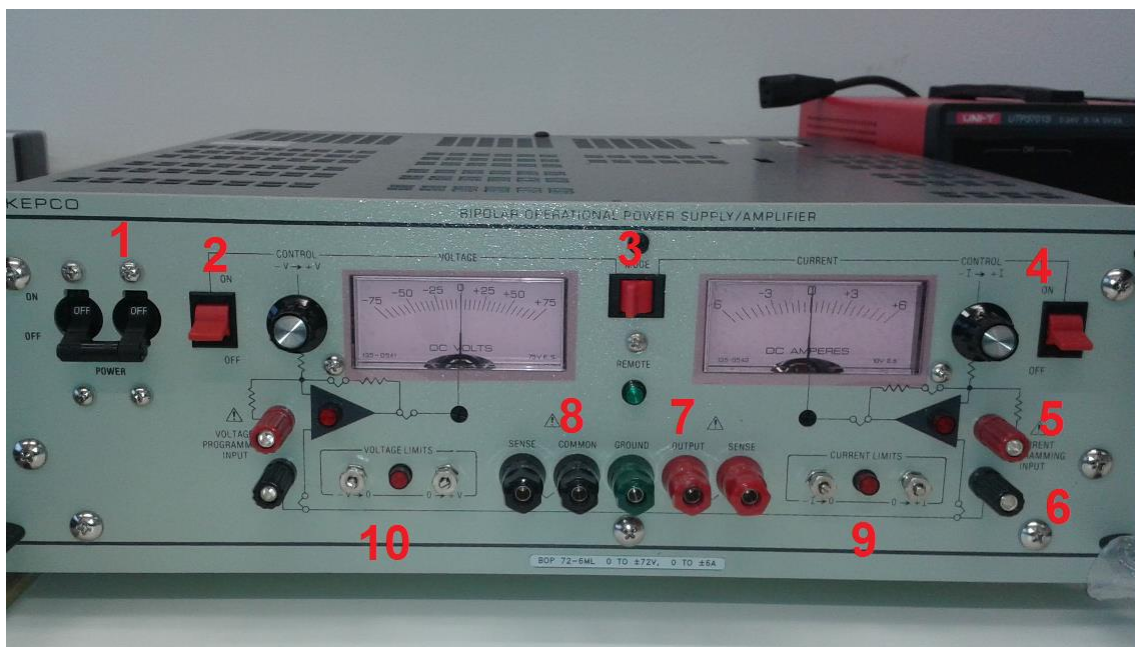
Cívka C1	Cívka C1	Cívka C2	Cívka C2	Cívka C1	Cívka C2
s jádrem	bez jádra	s jádrem	bez jádra	-	-
$L$ (mH)	$L$ (mH)	$L$ (mH)	$L$ (mH)	$R$ ( $\Omega$ )	$R$ ( $\Omega$ )
275	106	272	105	6,16	6,02

Tabulka 4.1: Parametry cívek.



## 4.1 Bipolární operační zdroj BOP a generování budícího signálu

Bipolární lineární zdroj BOP KEPCO má bipolární napěťový a proudový kanál. Můžeme být používán v režimu stejnosměrného napětí/proudu, nebo ve střídavém režimu napětí/proud (režim zesilovač). Kanály mohou být ovládány z předního panelu, nebo vzdáleně pomocí sběrnic RS232 nebo GPIB a jsou chráněny bipolárními omezovacími obvody. Maximální hodnoty kladného a záporného napětí a proudu jsou nastavovány pomocí proudových nebo napěťových pojistek. Výstup je ovládán pouze jedním režimem (napěťovým nebo proudovým, AC/DC režim, režim zesilovač). Ve standartních modelech typu M slouží k indikaci na předním panelu analogové voltmetry a ampérmetry. Na (obr. 4.2), je zobrazen přední panel bipolárního operační zdroje Kepco [23].



Obrázek 4.2: Zdroj BOP KEPCO 72-6ML.

Bipolární zdroj je pro naše účely, využit jako napětím řízený, střídavý proudový zdroj v režimu zesilovač. Zdroj do tohoto režimu nastavíme tak, že zapneme hlavní vypínač (1), přepneme páčku (2) do polohy OFF, páčku (3) překlopíme na pravou stranu pro proudový režim a páčku (4) přepneme do stavu ON. V tuto chvíli je nastaven proudový režim. Do zdířky current programming input (5) zapojíme externí vstup pro generování střídavého signálu. Na zdířku (6) přivedeme zem externího vstupu. Mezi zdířky (7) a (8) připojíme paralelně zapojené cívky. Na proudových a napěťových pojistkách (9 a 10) nastavíme maximální hodnoty, ve kterých se externí signál bude pohybovat.



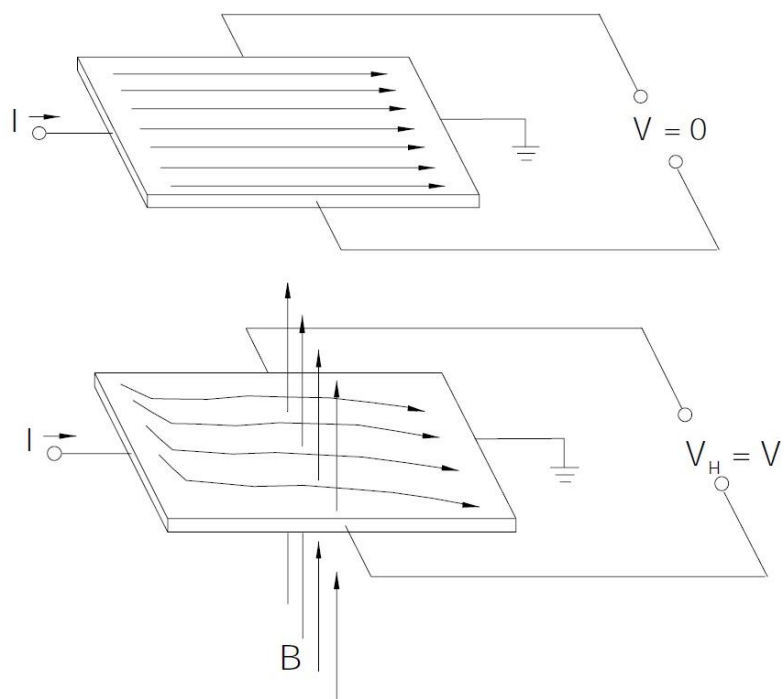
Pokud využíváme režim zesilovač (napěťový, nebo proudový režim), musíme vzít v úvahu maximální hodnoty signálu, které můžeme do zařízení vpustit. V režimu proudového zdroje, jehož limit je v rozsahu  $\pm 6$  A, má zesilovač zisk 0,6 krát vstupní signál. Maximální hodnoty, které můžeme přivést na jeho svorky je  $\pm 10$  V [23]. Soustava BOP a cívky, jsou schopné generovat maximální možné magnetické pole v rozsahu od - 350 mT do 350 mT.

## 4.2 Měření magnetického pole

Velikost intenzity magnetického pole na vzorku, je měřena pomocí Hallovy sondy (SS49) [24]. Pokud je polovodičovou destička (Hallová sonda), kterou prochází nabitá částice, které jsou nosičem elektrického proudu, vložena do magnetického pole, které je kolmé na ty to částice, vznikne na protější straně elektromotorické Hallovo napětí. Pokud Hallovou sondou prochází konstantní proud, bude výsledné Hallovo napětí  $U_{\text{Hall}}$  lineárně závislé na velikosti magnetického pole. Z teorie elektromagnetického pole a znalosti působení Lorentzovy síly, můžeme odvodit výsledný vztah pro Hallovo napětí (4.1)[26],

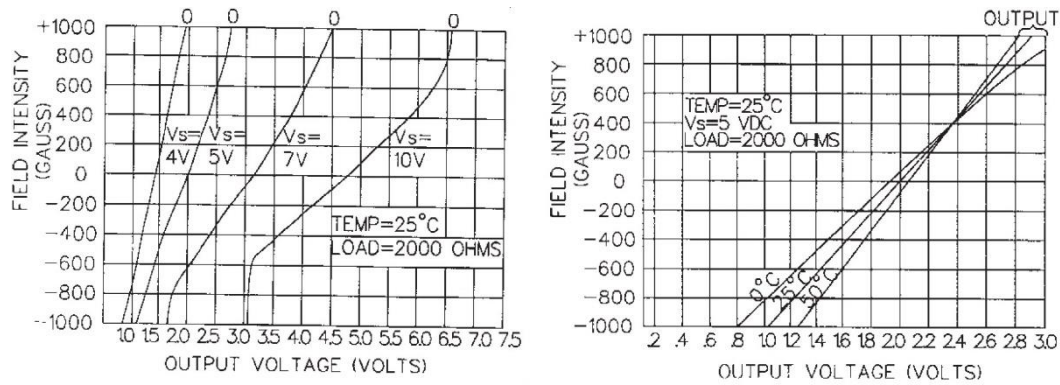
$$U_{\text{Hall}} = \mu_0 R_H l_z |\vec{j} \times \vec{H}| \quad (4.1)$$

kde  $R_H$  je Hallova konstanta,  $\mu_0$  permeabilita vaku,  $l_z$  hodnota Hallova napětí na vzdálenosti,  $\vec{j}$  proudová hustota a  $\vec{H}$  je intenzita magnetického pole. Kalibrací napětí na hodnoty intenzity magnetického pole získáme pomocí magnetometru. Hallová sonda měří na rozdíl od jiných metod intenzitu magnetického pole přímo. Na (obr. 4.3) je zobrazeno Hallovo napětí bez působení magnetického pole a při působení magnetického pole [24].



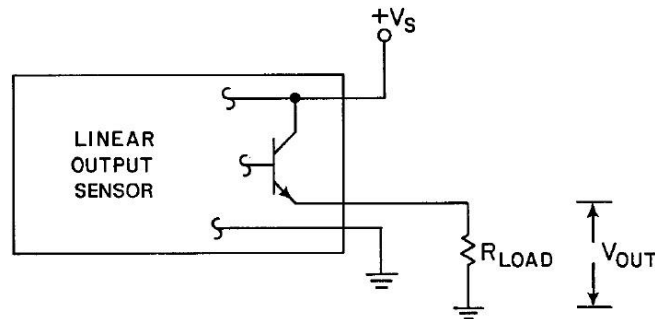
Obrázek 4.3: Princip Hallova jevu. Převzato a upraveno [25].

Hallové sondy jsou určeny pro měření magnetické indukce větší než 1 mT, v teplotních rozsazích od  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pro frekvence od 0 kHz do 30 kHz. Mají variabilní použití, které se uplatňuje v mnoha odvětvích. Jsou vyrobeny z polovodičových materiálů jako je křemík, InSb, InAs, GaAs a jiné. Typ použité polovodičové technologie způsobuje rozdílné teplotní závislosti senzorů. Další faktory, které ovlivňují teplotní závislost je způsob napájení (napětí/proud). Ukázalo se, že napěťové napájení senzoru vede k menší teplotní závislosti než u proudového napájení. Další problém Hallových sond je offset, který se samozřejmě mění s teplotou a časem. Příčina offsetu je u Hallových sond především v nerovnoměrnosti hustoty dotace, odporu kontaktů, malé chybě geometrie, nebo v důsledku mechanického napětí v kombinaci s piezoresistivním jevem. Existují teplotní a napěťové charakteristiky, které popisují vlastnosti Hallových sond (obr. 4.4) [24,25].



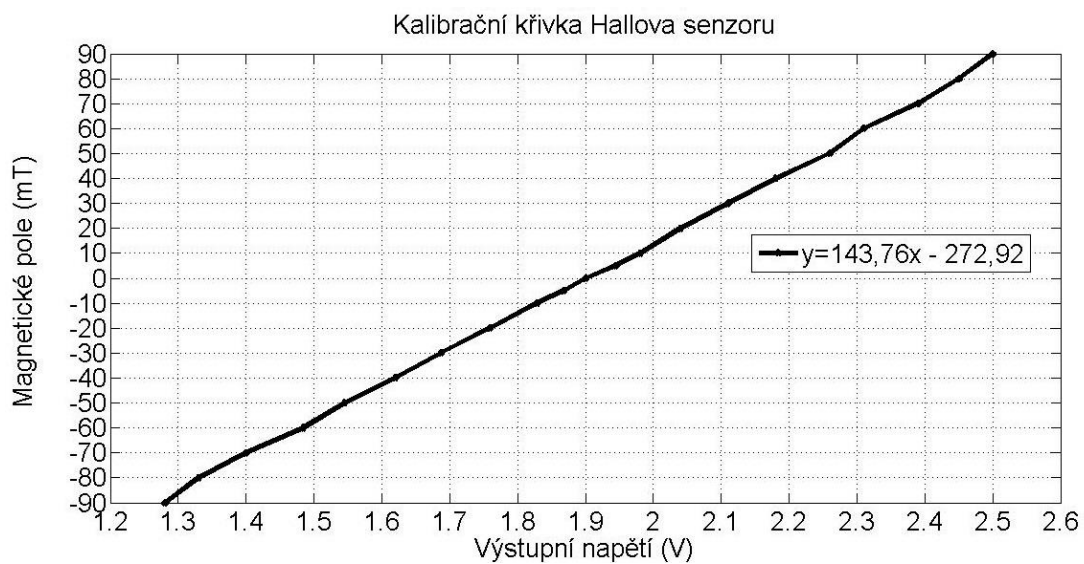
Obrázek 4.4: Závislost výstupního napětí na napájecím napětí – graf vlevo, teplotní závislost na výstupním napětí - graf vpravo [25].

Hallové sondy můžeme podle elektrického výstupu rozdělit na analogové a digitální. Z důvodu aplikace analogové Hallové sondy v experimentu, se budeme nadále zabývat pouze analogovými Hallovými sondami. V experimentu je použit Hallův senzor (SS49) společnosti Honeywell. Jedná se o lineární Hallův senzor s analogovým výstupem v zapojení s otevřeným emitorem (zdroj proudu obr. 4.5). Výstupní tranzistor generuje proud, který na zátěži  $R_{load}$  vytvoří analogové napětí, které je úměrné magnetickému poli, který senzor snímá.

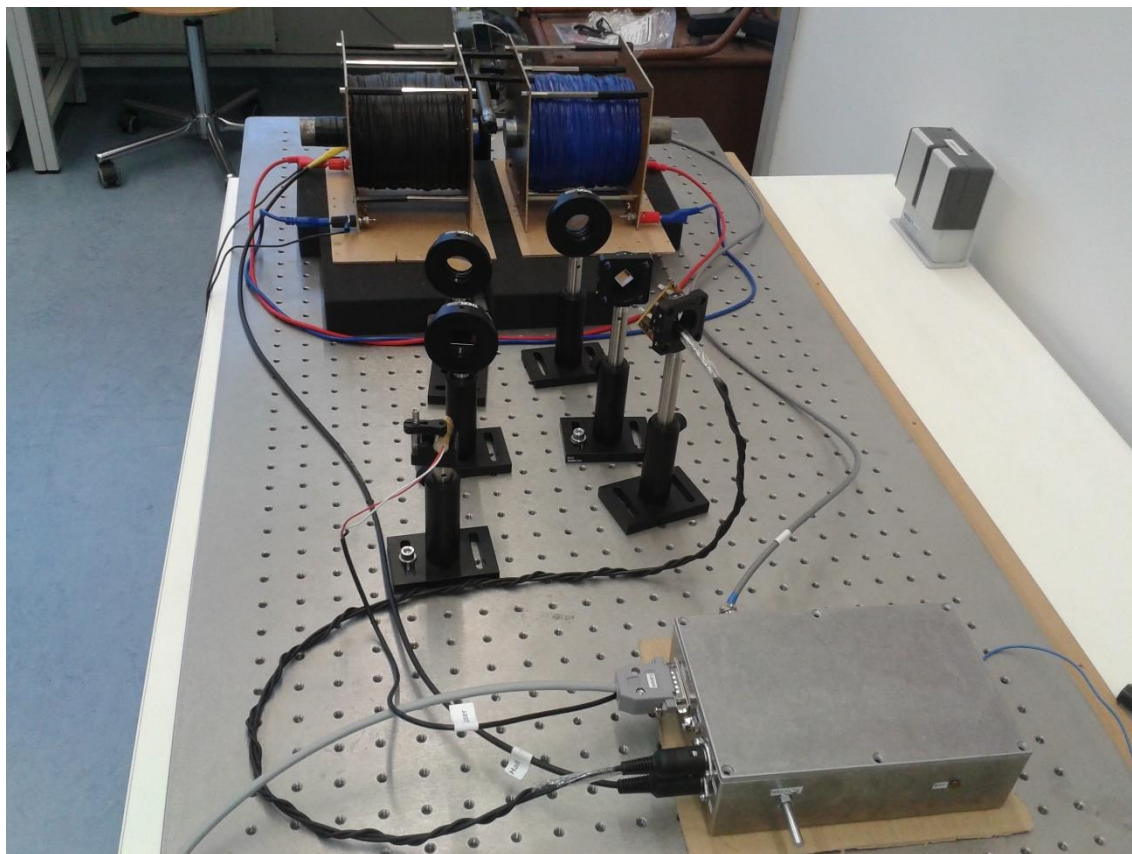


Obrázek 4.5: Analogový výstup lineárního Hallova jevu.[15]

Hallovou sondu můžeme podle technického manuálu napájet stejnosměrným zdrojem napětí v rozsahu od 4 V do 10 V, proudový odběr snímače je typicky 4 mA, výstupní napětí se pro 0 Gaussů pohybuje v rozmezí od 1,75 V do 2,25 V, pro 5 V napájení a při teplotě 25 °C. Hodnota zátěže pro kalibraci je  $R_{load} = 2000 \Omega$ . Maximální měřicí rozsah Hallova snímače je od - 1000 Gaussů do + 1000 Gaussů [25]. Kalibrace byla provedena pro různá napájecí napětí při konstantní teplotě 25 °C. Pro účely měření byly vybrány kalibrační konstanty pro napájecí napětí 5 V. Na (obr. 4.6) je zobrazena kalibrační křivka a použité kalibrační konstanty.



Obrázek 4.6: Kalibrační křivka Hallovy sondy SS49, kalibrovaná pro napájecí napětí  $V_{cc} = 5\text{ V}$  a při konstantní teplotě  $25\text{ °C}$ .



Obrázek 5.1: Sestava MOKE.

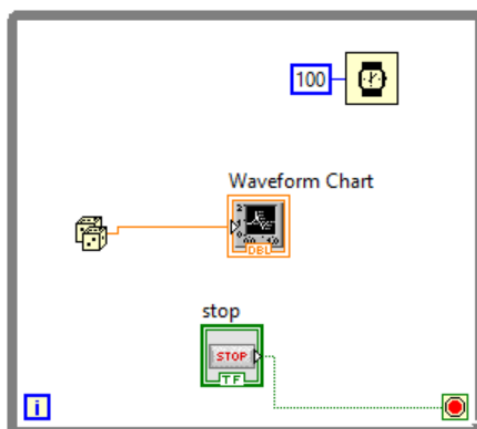
## 5 Vývoj měřicího software, detekce signálu

Experimentální sestava je řízená pomocí multifunkční měřicí karty NI USB-6216, která je naprogramovaná v prostředí LabVIEW 2013. Software pomocí měřicí karty řídí generování funkčního průběhu a následný sběr dat z elektronické jednotky. Naměřená data jsou poté analyzována a vyhodnocena. Signály, které jsou přivedeny na vstup měřicí karty, jsou ve voltech a musí se převést na správné veličiny, které senzory měří. Celé zkonstruované experimentální zařízení je zobrazeno na (obr. 5.1).

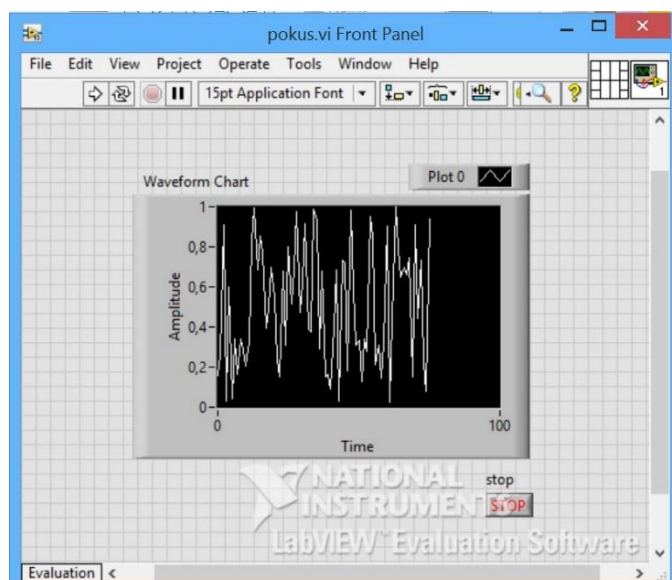
### 5.1 NI LabVIEW

NI Labview je grafické vývojové prostředí, který bylo vyvinuto firmou National Instrument. Jedná se o kvalitní vývojové prostřední, vhodné pro tvorbu aplikací, které zpracovávají data a signály pomocí měřicích modulů. Je to grafický programovací jazyk (známý také jako G jazyk), který při vykonávání programu využívá tzv. data-flow programing. Data-flow programing se vyznačuje tím, že vykoná funkční blok, nebo příkaz až poté pokud jsou na vstupech funkčního bloku nebo příkazu relevantní data. LabVIEW obsahuje širokou škálu palet pro nejrůznější vývoj aplikací. Firma National Instrument vyvíjí vlastní hardware, který je plně kompatibilní se softwarem LabVIEW. Spojení vysoce integrovaného vývojového prostředí a hardwaru, vytváří širokou škálu možností pro tvorbu aplikací, v oblastech jako je věda a inženýrství [27,28].

Vývoj kódu probíhá v okně *block diagram*, kde programátor zadává funkční bloky, kterými vytváří logický celek. Funkční bloky se spojují pomocí *wires* vodičů, které reprezentují výše zmíněný data-flow programing. *Block diagram* je spojen s tzv. čelním panelem (*front panel*), ve kterém programátor vytváří pomocí tlačítek, grafů a diagramů uživatelské prostředí (GUI). Na (obr. 5.2) a (obr. 5.3) je uveden příklad jednoduché aplikace generování náhodných čísel [27].



Obrázek 5.2: Zdrojový kód (blokový diagram) generátoru náhodných čísel.



Obrázek 5.3: Čelní panel generátoru náhodných čísel.

Programátor může takto vytvořené aplikace, spustit pouze z vývojového prostředí LabVIEW. Jestliže je potřebné využívat aplikaci i na dalších zařízeních (PC, Notebook), existuje v LabVIEW možnost vytvoření spustitelného souboru s příponou *EXE*. Detailnější popis této procedury je k nalezení na stránkách National Instruments [27,29].

## 5.2 Multifunkční měřicí karta NI USB-6216

Jak bylo uvedeno v předchozí části, firma National Instrument vyvíjí vlastní hardware. Do této oblasti patří např. multifunkční zařízení pro sběr dat (DAQ), modulární systémy pro sběr dat (DAQ), čítače/časovače, analyzátoři, osciloskopy a další. Všechny přístroje spolupracují s vývojovým prostředím pomocí tzv. přístrojových ovladačů.

Další popis se týká nastavení přístrojových ovladačů, popisu multifunkční měřicí karty a vývoj aplikace, které řídí MOKE experiment.

Pro digitalizaci signálu je v konstruované sestavě zařazena multifunkční karta NI USB-6216 od firmy National Instruments. Jedná se o měřicí kartu z M-série multifunkčních DAQ (data acquisition) modulů, viz (obr. 5.4). Karta je napájena pomocí USB kabelu z počítače. Měřicí karta nabízí možnost akvizice dat pomocí DAQ asistenta, nebo pomocí DAQmx přístrojových ovladačů. DAQ asistent poskytne uživateli rychle nastavení měřících kanálů, bez nutnosti hlubší znalosti měřicí karty. DAQmx přístrojové ovladače naopak uživateli poskytují mocnější nástroj pro vývoj aplikací.

Karta nabízí 16 analogových vstupů, 16-bitový A/D (DAC) převodník, 400 kS/s vzorkovací rychlosti, 2 analogové výstupy, 32 digitálních I/O linek, čtyři vstupní rozsahy ( $\pm 0,2$  V,  $\pm 1$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 10$  V), digitální trigrování a dva čítače/časovače [30,31].

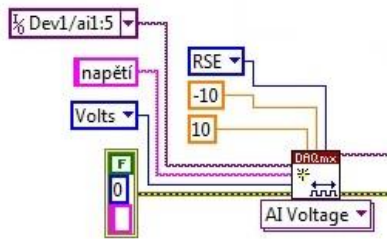


Obrázek 5.4: Multifunkční měřicí karta NI USB-6216.

### 5.3 Konfigurace analogových vstupů a výstupů AO/AI

Vstupní a výstupní analogové obvody jsou konfigurovány pomocí DAQmx přístrojových ovladačů. První blok DAQmx řetězce je **NI-DAQmx Create Virtual Channel** (obr. 5.5). Signály jsou z elektronické jednotky přivedeny na analogový vstupně/výstupní konektor měřicí karty [32].





Obrázek 5.5: NI-DAQmx Create Virtual Channel.vi.

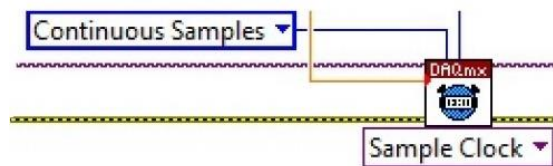
Vstupy jsou konfigurovány pro kanály AI 1 až AI 5, měřené ve voltech, pro vstupní rozsah měřicí karty + 10 V až – 10 V [32]. Všechny kanály jsou měřeny proti nulovému potenciálu elektronické jednotky.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny volitelné měřicí rozsahy multifunkční karty, s rozlišením nejmenšího bitu (LSB).

Vstupní rozsah	Rozlišení
-10 V až 10 V	320 $\mu$ V
-5 V až 5 V	160 $\mu$ V
-1 V až 1 V	32 $\mu$ V
-200 mV až 200 mV	6,4 $\mu$ V

Tabulka 5.1: Vstupní rozsahy a rozlišení podporované měřicí kartou USB-6216 [32].

V měřicí sekvenci je dále nastaven funkční blok **NI-DAQmx Timing** (obr. 5.6). Tento funkční blok nastavuje hardwarové časování pro sběr nebo generování dat. V tomto bloku je nastavený kontinuální mód sběru dat, vzorkovací frekvence (S/s) a počet vzorkovaných dat na kanál. Režim kontinuálního načítání dat nabízí neustálý sběr dat, pokud není splněna podmínka pro ukončení načítání [32].



Obrázek 5.6: NI-DAQmx Timing.vi.

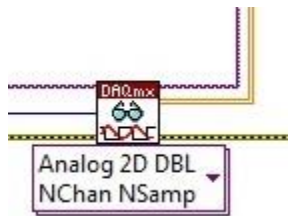


Další funkční blok spouští nastavenou úlohu - **NI-DAQmx Start Task** (obr. 5.7).



Obrázek 5.7: NI-DAQmx Start Task.vi.

**NI-DAQmx Read** funkce vyčítá data z aktuálně spuštěné úlohy (obr. 5.8). Funkční blok je možno natavit pro načítání analogových nebo digitálních dat v různých režimech. V bloku nastavujeme počet vzorků a počet kanálů, ze kterých má funkce zpracovaná data číst a počet měřených vzorků na kanál. V režimu analog 2D DBL je načteno N kanálů o N počtech vzorků. Data jsou načítána do vícerozměrného pole [32].



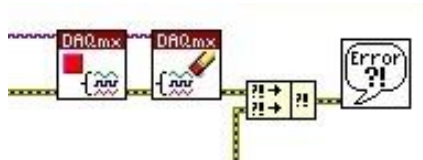
Obrázek 5.8: NI-DAQmx Read.vi.

**NI-DAQmx Read** funkce generuje data pro analogový výstup (obr. 5.9). Funkční blok opět nabízí generování analogových a digitálních dat v různých režimech. V bloku je nastavován počet vzorků, kanálů, a počet generovaných vzorků na kanál. V režimu analog waveform je vyčten 1 kanál o N počtu vzorků [32].



Obrázek 5.9: NI-DAQmx Write.vi.

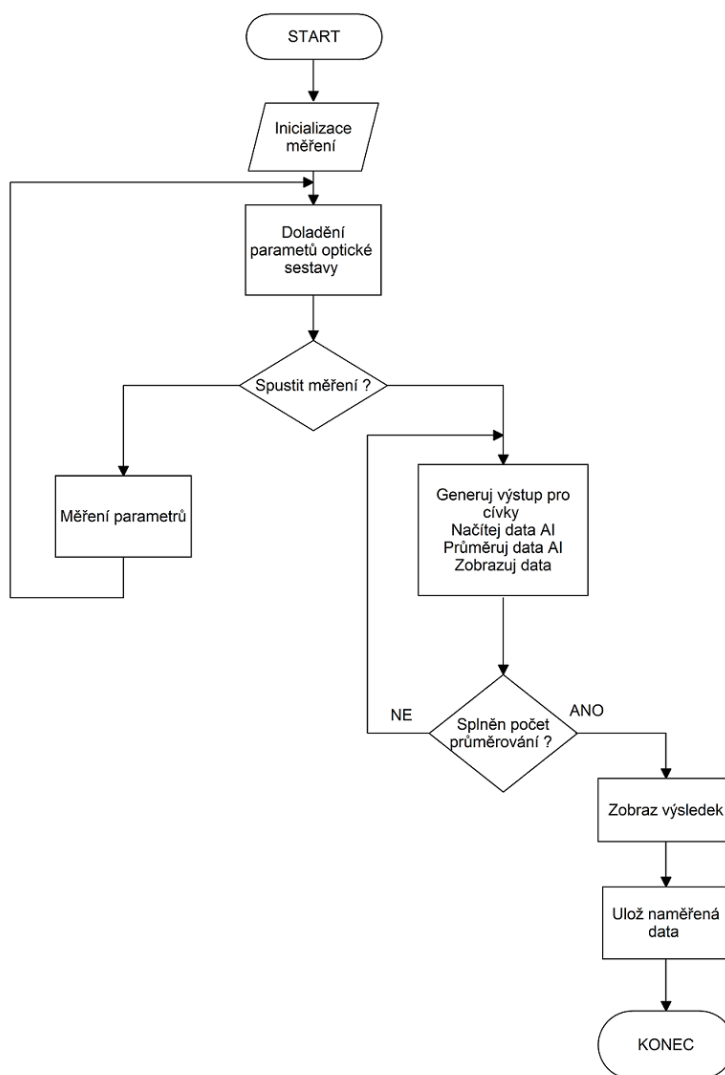
Pro ukončení měření se využívá posloupnost tří funkčních bloků **NI-DAQmx Clear Task**, **NI-DAQmx Stop Task** a **Simple Error Handler.vi**. První blok smaže data v úloze. Druhý blok ukončí úlohu a poslední blok signalizuje chybu v úloze (obr. 5.10) [32].



Obrázek 5.10: Zleva NI-DAQmx Stop Task NI-DAQmx Clear Task, Simple Error Handler.vi.

## 5.4 Algoritmus měřicího systému

Algoritmus MOKE experimentu je rozdělen na dvě části. V první části uživatel nastaví parametry měření a spustí program. Program v této fázi měří pouze hodnoty, ze senzorů, ale neprobíhá samotné měření. Uživatel může doladit nastavení optické sestavy a až poté spustit měření. Vývojový diagram na (obr. 5.11) poskytuje detailnější pohled na měřicí algoritmus.



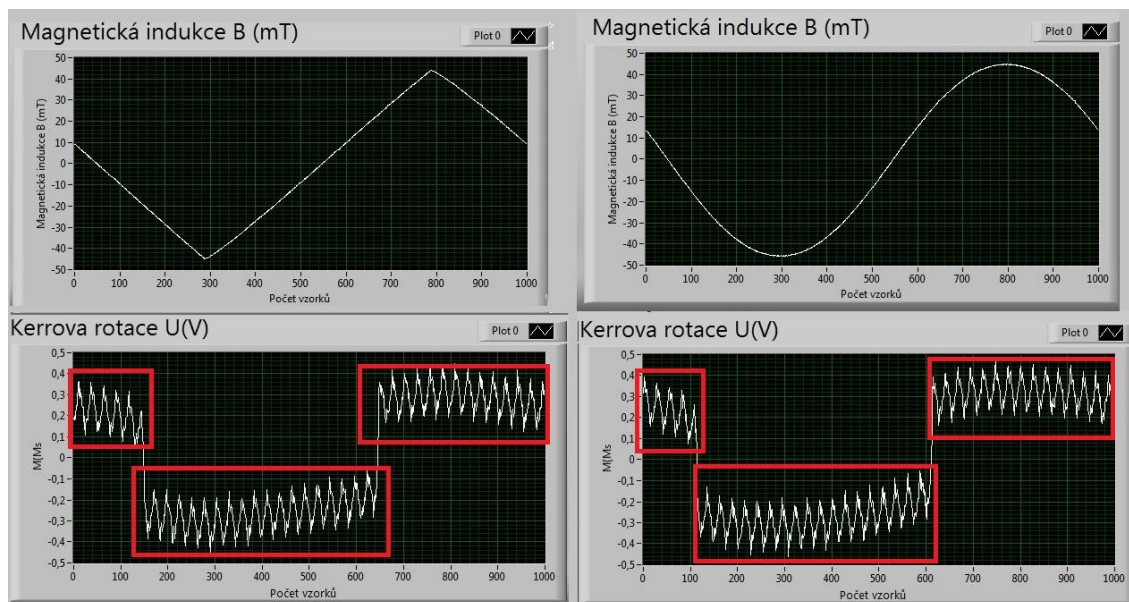
Obrázek 5.11: Vývojový diagram programové procedury v MOKE experimentu.

Při *inicializaci* měření uživatel nastaví parametry pro sinusový nebo trojúhelníkový průběh, kterým se bude generovat magnetické pole. Mezi tyto parametry patří frekvence signálu a jeho amplituda. Při nastavování amplitudy musíme brát v potaz, že maximální hodnoty napětí, které se může přivést na svorky bipolárního zdroje, je  $\pm 10$  V. Uživatel nastaví počet vzorků na periodu, které se pomocí zadané frekvence přepočítají na vzorkovací rychlost. Vzorkovací rychlost udává počet vzorků na jednu periodu. Dále se při inicializaci nastaví počet průměrování, to znamená kolik period je potřeba změřit a zprůměrovat.

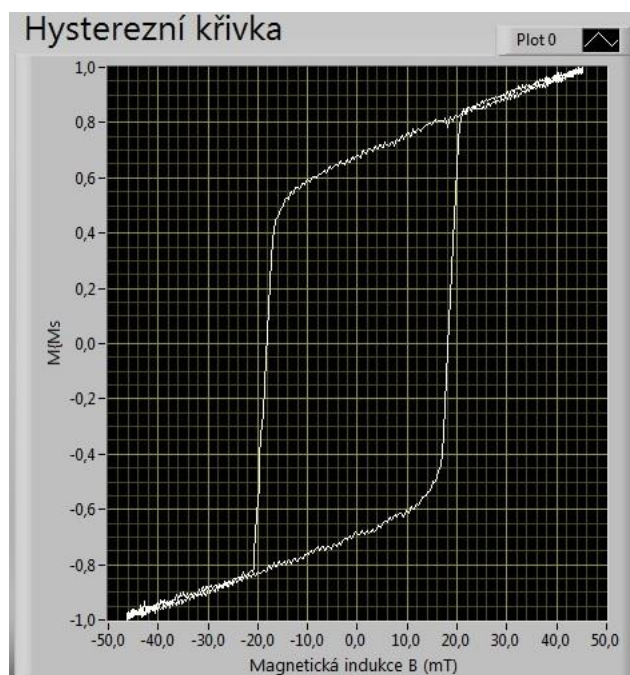
Při *ladění* může uživatel před měřením upravit optické nastavení. Během této doby lze nastavit: optimální intenzitu laserového svazku, správný poměr štěpení svazku na děliči svazku, nastavení polarizátoru, optimální odraz svazku od vzorku. Při *měření parametrů* uživatel kontroluje indikátory, které zobrazují hodnoty napětí na fotodiodách. Hodnoty napětí jsou závislé na odraznosti zkoumaného materiálu. Pro odrazné materiály pozorujeme stabilní signál Kerrovy rotace v rozmezí od 0,7 V - 1,5 V. Stabilní signál Kerrovy rotace pro méně odrazné materiály se pohybuje v rozmezí od 1,5 V - 4 V. Při měření je vhodné, aby bylo napětí na obou diodách bylo stejné.

Poté co uživatel spustí měření, začne analogový výstup generovat sinusový signál pro cívky, které vytvoří magnetické pole a zároveň je toto pole snímáno Hallovou sondou. Poté co je vzorek nepřetržitě magnetován, objeví se na výstupu diferenciálního zesilovače hodnota Kerrova napětí. Program načte zadaný počet period a poté signály zprůměruje. Výsledkem je závislost magnetické indukce  $B$  na počtu vzorků během jedné periody sinusového budícího signálu a závislost Kerrovy rotace na počtu vzorků také během jedné periody, viz (obr. 5.12). Z těchto dat je vypočtena hysterezní křivka (obr. 5.13), jako závislost rozdílového signálu diod na napětí na Hallových sondách, tedy magnetickém poli. Naměřená data se uloží do textového souboru. Ten je složen ze dvou částí, hlavičky a změřených dat. Hlavička obsahuje den a čas měření. Dále jsou pod hlavičkou údaje o počtu použitých kanálů a počtu vzorků. Ve sloupcích jsou uvedeny hodnoty jednotlivých kanálů v pořadí: Kerrovy rotace ( $M/M_s$ ), magnetického pole  $B$  (mT), fotodiody 1  $U$  (V), fotodiody 2  $U$  (V) a teploty  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Na obrázku 5.11, si můžeme všimnout, že na signálu Kerrovy rotace je namodulovaný 50 Hz síťový šum – červený rámeček (obr. 5.11). Síťový šum můžeme odstranit pomocí dostatečného počtu průměrování (50+) a optimální budící frekvence, která není násobkem šumové síťové frekvence.

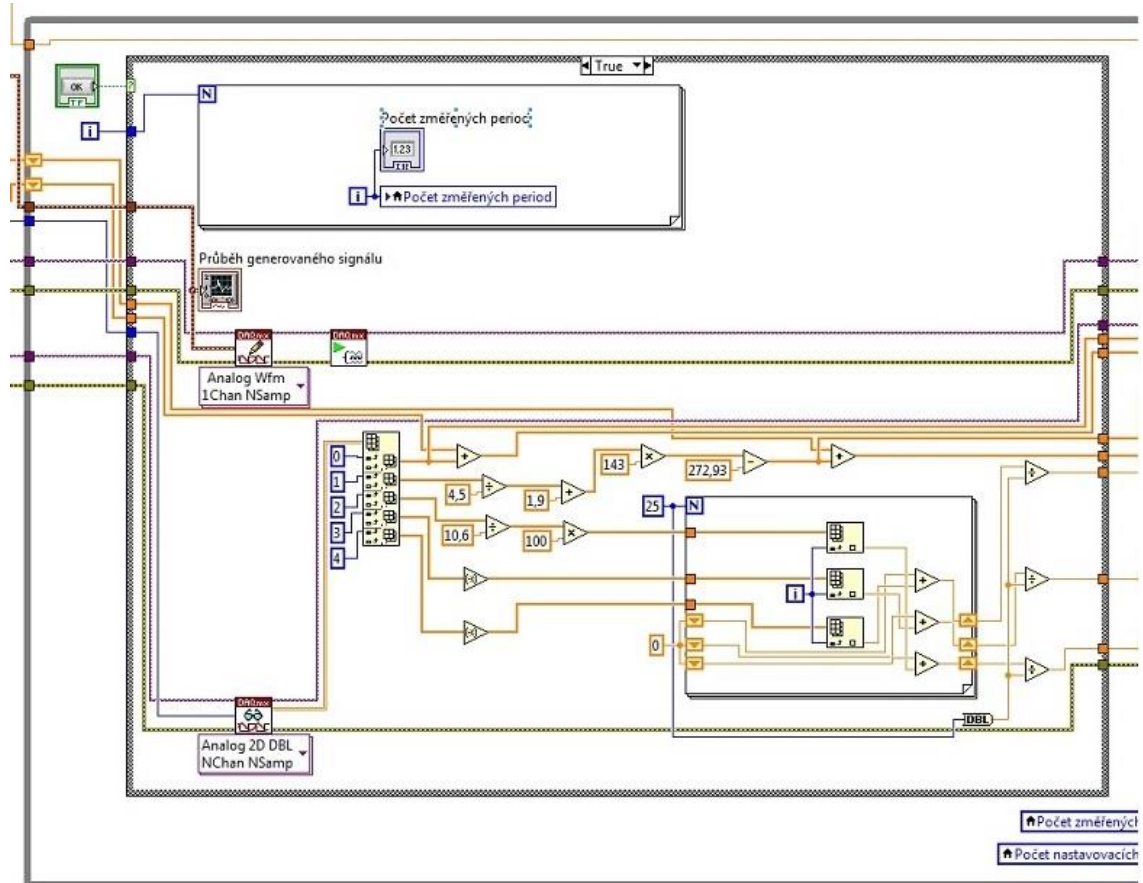


Obr 5.12: Závislost magnetické indukce a Kerrovy rotace na pilovitém a sinusovém průběhu.



Obrázek 5.13: Příklad hysterezní křivky.

Na obrázku 5.14 je část zdrojového kódu MOKE experimentu, která po spuštění měření generuje na analogový výstup zvolený sinusový nebo pilovitý průběh a načítá data z analogových vstupů, která jsou podle programových instrukcí zpracovávána.



Obrázek 5.14: Část zdrojového kódu MOKE experimentu.

## 6 Příklady měření vzorků tenkých vrstev

Na MOKE sestavě byly změřeny hysterezní křivky několika vzorků vrstev. Vzorky byly připraveny metodou naprašování. Naměřené hysterezní smyčky jsou normované vzhledem k maximální hodnotě saturační magnetizace  $M_s$ . V tabulce 6.1 je uveden popis nastavení parametrů pro měření hysterezních smyček. Grafy jsou vytvořeny z dat, které jsou po každém měření automaticky ukládány do souboru. Data byla zpracována pomocí softwaru MATLAB R2010a.

### Měřené vzorky:

Zlato (**Au**) - výška tenké vrstvy 80 nm

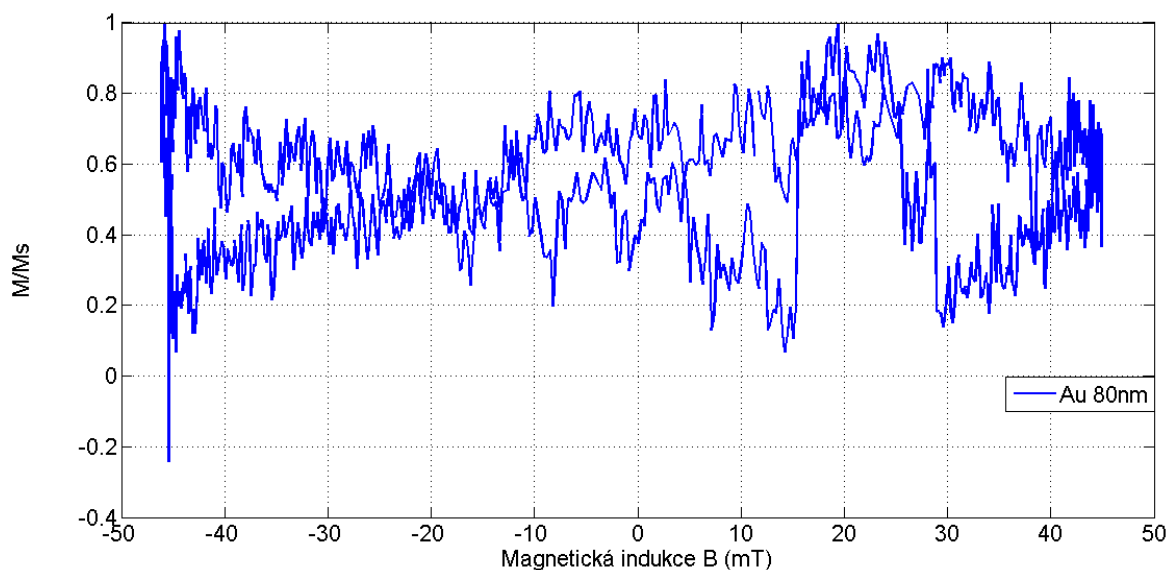
Kobalt (**Co**) - výška tenké vrstvy 70 nm

Slitina (**NiFe**) - výška tenké vrstvy 50 nm

První měření bylo provedeno na tenké vrstvě zlata. Zlato při měření nevykazovalo odezvu na magnetické pole (Kerrovu rotaci) a nevykazuje magnetické uspořádání. Měřením byl zaznamenán pouze šum (obr. 6.2).

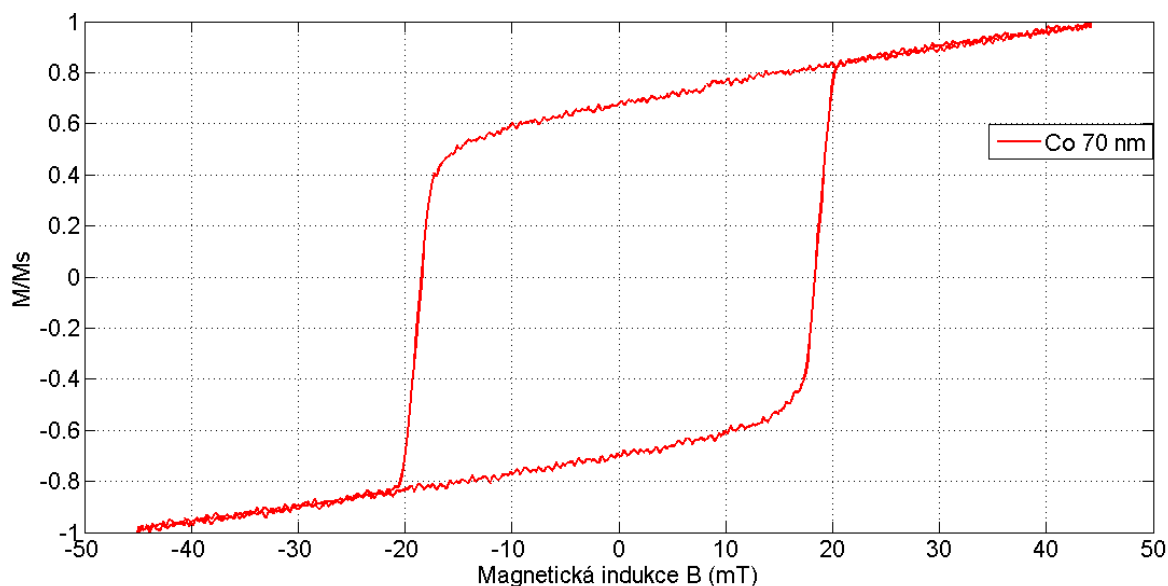
Nastavení parametrů MOKE			
Vzorek tenké vrstvy	Au 80 nm	Co 70 nm	NiFe 50 nm
Frekvence $f$ (Hz)	1,33	1,33	1,33
Amplituda $U$ (V)	1,2	1,2	1
Počet průměrování (n)	100	100	150
Počet vzorků na per.	1000	1000	1000
Typ bud. signálu	Sin.	Tri.	Sin.
Teplota $T$ (°C)	25,3	25,1	25,6
Fotodioda 1 $U$ (V)	0,79	0,72	1,13
Fotodioda 2 $U$ (V)	0,97	0,71	1,23

Tabulka 6.1: Nastavení parametrů pro měření hysterezní smyček tenkých vrstev.



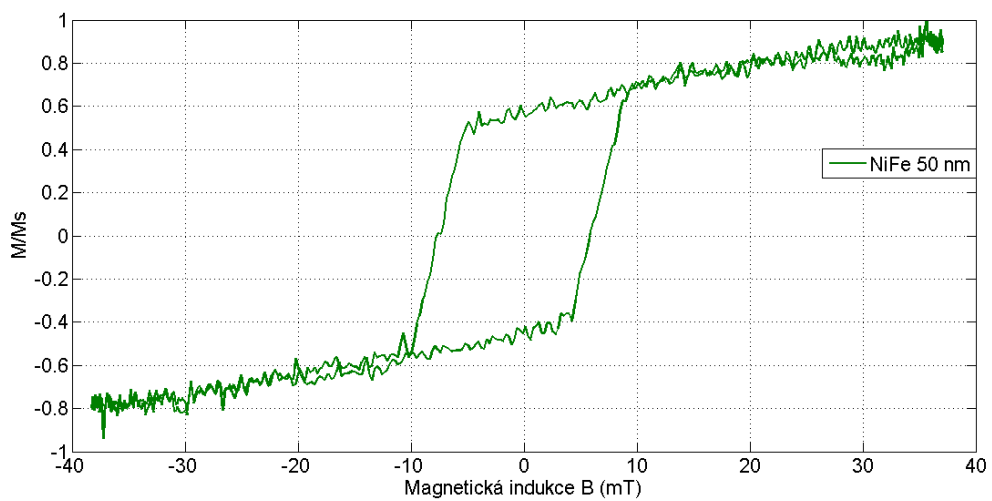
Obrázek 6.2: Měření hysterezní křivky tenké vrstvy zlata.

Další měření bylo provedeno na tenké vrstvě kobaltu. Kobalt při měření vykazoval odezvu na magnetické pole (Kerrovu rotaci) a vykazuje magnetické uspořádání. Na (obr. 6. 3) je vykreslena hysterezní křivka vrstvy kobaltu.



Obrázek 6.3: Měření hysterezní křivky tenké vrstvy kobaltu.

Poslední měření bylo provedeno na tenké vrstvě železa-niklu. Stejně jako kobalt i vrstva železo-nikl vykazoval magnetické uspořádání (obr. 6.4).



Obrázek 6.4: Měření hysterezní křivky tenké vrstvy NiFe.



## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, zkonstruovat a otestovat aparaturu pro měření magnetooptického Kerrova jevu, která může být použita v longitudinální, polární a transverzální geometrii.

Byla sestavena optická trasa experimentu pomocí optických prvků firmy Thorlabs. Optické prvky jsou namontovány na optomechanických prvcích, které zajišťují snadnou manipulaci při nastavování experimentu.

Byla navržena a sestavena elektronická jednotka pro detekci signálů ze senzorů. Elektronická jednotka pak jako celek obsluhuje všechny elektronické senzory na optickém stole. V experimentu je zařazený výkonný bipolární zdroj, který spolu s cívkami generuje externí magnetické pole. Předzpracované signály ze senzorů jsou přivedeny do multifunkční měřicí karty, která tyto signály zpracovává. V prostředí LabVIEW byl vytvořen ovládací program s uživatelským rozhraním, který slouží pro nastavování parametrů měření, akvizici a ukládání změřených dat.

Funkčnost celé sestavy byla úspěšně ověřena na několika testovacích vzorcích. Celá sestava může být využívána pro studium magnetických vlastností tenkých vrstev a povrchů.

## Literatura

- [1] SCHMIDT, Jan Frederik. *Time dependent and energy resolved measurement on magnetic films: Bachelor thesis* [online]. Konstanz/Uppsala, 2011 Uppsala Universitet. [cit. 2016-05-05]. Bachelor thesis. Uppsala Universitet.
- [2] ZEMAN, Bc.Lukáš. *Modifikácia kovových skiel pomocou tenkých magnetických vrstiev* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2016-05-05]. Diplomová. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [3] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus* [online]. 2002 [cit. 2016-05-10]. ISBN 80-200-1004-1. Dostupné z: <http://www.jaderny-prvak.8u.cz/wp-content/uploads/2013/02/Sedlak-Stoll-Elektrina-a-magnetismus.pdf>
- [4] BLUNDELL, Stephen. *Magnetism in Condensed Matter: Department of Physics University of Oxford* [online]. Oxford University Press [cit. 2016-05-06].
- [5] KOTOV, V.A a A.K ZVEZDIN. *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials: Studies in condensed matter physics* [online]. Moscow, 1997: General Physics Institute (IOF RAN) [cit. 2016-05-06].
- [6] *Kurz fyziky pro distanční studium: Fyzika - Elektrina a magnetismus* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/3\\_5#kap\\_3\\_5\\_1](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/3_5#kap_3_5_1)
- [7] DR. OAKBERG, Theodore C. Magneto-optic kerr effect: Application note.: *Photoelastic modulators* [online]. HINDS INSTRUMENTS [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/Magneto-Optic-Kerr-Effect.pdf>
- [8] EDENS, Harald E. *Construction and characterization of a magneto-optical Kerr-effect instrument for studies of ferrimagnetic GdFe films* [online]. Faculty FNWI University of Amsterdam Van der Waals-Zeeman Institute, 2002 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [https://iop.fnwi.uva.nl/cmp/docs/Goedkoop/thesis/Harald\\_report.pdf](https://iop.fnwi.uva.nl/cmp/docs/Goedkoop/thesis/Harald_report.pdf). Master thesis.

- [9] LANDOLT, Gabriel. *COPHEE and SMOKE: In-situ Surface Magneto-Optic Kerr Effect Setup for the SPin- and Angle-Resolved Photoemission Experiment COPHEE* [online]. Zurich, 2010 [cit. 2016-05-06]. Master Thesis. Institute of Physics University of Zurich
- [10] Polarizační filtr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Polarizační\\_filtr](https://cs.wikipedia.org/wiki/Polarizační_filtr)
- [11] Optical elements: Thorlabs. *Thorlabs* [online]. Thorlabs, Inc., 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6278](http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6278)
- [12] KORMUNDA, Martin. *Fyzikální metody přípravy tenkých vrstev* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: [http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/2\\_Prednaska\\_UFPTV.pdf](http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/2_Prednaska_UFPTV.pdf)
- [13] Polarization Optics: Thorlabs. *Thorlabs* [online]. Thorlabs, Inc., 2016 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=917&pn=WP10#5717](http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=917&pn=WP10#5717)
- [14] *Světlo v anizotropním prostředí: Učební text k přednášce UFY102* [online]. , 1-15 [cit.2016-04-26]. Dostupné z: [http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Svetlo\\_v\\_anizotropnim\\_prostredi.pdf](http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Svetlo_v_anizotropnim_prostredi.pdf)
- [15] PETRŽÍLKA, Dr. Václav. *Fyzikální optika*. Praha: Přírodovědecké vydavatelství, Praha, 1952
- [16] *BPW34, BPW34S: Silicon PIN Photodiode* [online]. Vishay Semiconductors. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [17] *ELUC: Blokové schéma síťového zdroje [obrázek]* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/651>

- [18] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The Art Of Electronics: The Art Of Electronics - 2nd Edition* [online]. 2nd. Cambridge University Press, 1989 [cit. 2016-04-26]. ISBN 0-521-37095-7 hardback.
- [19] OROZCO, Luiz. *Optimizing Precision Photodiode Sensor Circuit Design: Technical Article MS-2624* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/Optimizing-Precision-Photodiode-Sensor-Circuit-Design-MS-2624.pdf>
- [20] LM124-N, LM224-N LM2902-N, LM324-N: LMx24-N, LM2902-N Low-Power, Quad-Operational Amplifiers [obrázek]. *Texas Instruments* [online]. Texas [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf>
- [21] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 4.díl.* BEN-Technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-185-3.
- [22] Instrumentation amplifier: Typical instrumentation amplifier schematic [obrázek]. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Instrumentation\\_amplifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Instrumentation_amplifier)
- [23] *Operator's manual: BOP (M) (D) 100W, 200W, 400W Bipolar Power Supply* [online]. KEPCO, INC. Flushing, U.S.A, 2013 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: [http://www.mmr-tech.com/PDFs/BOP\\_Operating\\_Manual.pdf](http://www.mmr-tech.com/PDFs/BOP_Operating_Manual.pdf)
- [24] *Hall Effect Sensing and Application: MICRO SWITCH Sensing and Control* [online]. USA: Honeywell Sensing [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: <http://serge77.rocketworkshop.net/hall/hallbook.pdf>
- [25] *Solid State Sensors, Analog Position Sensors SS49/SS19 Series* [obrázek]: *Sensing and Control* [online]. Honeywell. 11 West Spring Street Freeport, Illinois 61032 [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: [http://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=50310](http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=50310)
- [26] *Squid* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/squid.pdf>

- [27] SCHLATTAUER, Bc. Leo. *Jednotný systém pro charakterizaci HW (analogový/digitální) a SW prvků používaných v MCA jaderných systémech* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2016-05-06]. Diplomová. Univerzita Palackého. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
- [28] What is LabVIEW ? *National Instruments* [online]. 2013 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.ni.com/newsletter/51141/en/>
- [29] Distributing Applications with the LabVIEW Application Builder. *National Instruments* [online]. 2013 [cit. 2016-05-06]-<http://www.ni.com/tutorial/3303/en/>
- [30] *DAQ M Series: NI USB-621x User Manual* [online]. National Instruments, 2009 [cit. 2016-05-06].
- [31] Bus-Powered M Series Multifunction DAQ for USB. *National Instruments-* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-9>
- [32] Getting Started with NI-DAQmx:: Basic Programming with NI-DAQmx. *National-Instruments-* [online]. 2007 [cit. 2016-05-06] -:<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-9>

## Příloha A Součástky použité pro DPS

Použité součástky pro výrobu DPS jsou uvedeny v tabulce A.1.

Součástky	Hodnota	Pouzdro	Popis
AC-L	ARK500/1	ARK500/1	Svorkovnice - rozteč 5mm
AC2-N	ARK500/1	ARK500/1	Svorkovnice - rozteč 5mm
B1	B2S	MBS	Surface Mount Glass Passivated Bridge Rectifiers
B2	B2S	MBS	Surface Mount Glass Passivated Bridge Rectifiers
C1	470uF/25V	E3,5-8	POLARIZED CAPACITOR, European symbol
C2	470uF/25V	E3,5-8	POLARIZED CAPACITOR, European symbol
C3	1u/16V	C1206	CAPACITOR, European symbol
C4	1n?	C0805	CAPACITOR, European symbol
C5	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C6	1u/16V	C1206	CAPACITOR, European symbol
C7	10u/35v	E2,5-6	POLARIZED CAPACITOR, European symbol
C8	10n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C9	1n?	C0805	CAPACITOR, European symbol
C10	100u	E2,5-7	TANTAL CAPACITOR, European symbol
C11	10u/35v	E2,5-6	POLARIZED CAPACITOR, European symbol
C12	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C13	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C14	100u	E2,5-7	TANTAL, European symbol
C15	1u/16V	C1206	CAPACITOR, European symbol
C16	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C17	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C18	100nF	C0603	CAPACITOR, European symbol
C19	100n	C0603	CAPACITOR, European symbol
C23	1u/16V	C1206	CAPACITOR, European symbol
DIODA1		ARK550/2	Svorkovnice - rozteč 3,5mm - dvojitá
DIODA2		ARK550/2	Svorkovnice - rozteč 3,5mm - dvojitá
F2	FUSESHK20L	SHK20L	Fuse
IC1	LM2902D	SO14	Low power quad operational amplifier
IC2	7812	78XXL	VOLTAGE REGULATOR
IC3	7912	79XXL	VOLTAGE REGULATOR
IC9	LM2902D	SO14	Low power quad operational amplifier
LASER		S1G2_JUM	Řadové konektory - koliky - 2x
LASER_PO	T	PSH02-03P	Konektory se zámkem - vidlice - 3pin
LASER_TE	ST	S1G1_JUM	Řadové konektory - koliky - 1x
LED 3.0 mm		LED3MM	LED
LM35	TO-92	PSH02-03P	Konektory se zámkem - vidlice - 3pin
OPTO1_AM	P_TEST	S1G1_JUM	Řadové konektory - koliky - 1x
OPTO1_TE	ST	S1G1_JUM	Řadové konektory - koliky - 1x
OPTO2_AM	P_TEST	S1G1_JUM	Řadové konektory - koliky - 1x
OPTO2_TE	ST	S1G1_JUM	Řadové konektory - koliky - 1x

OPTO_OUT		PSH02-02P	Konektory se zámkem - vidlice - 2pin
Q2		SOT23-R	NPN Transistor
R1	4k7	TRIMR_5X5	Trimr resistor
R2	220R	R0805	RESISTOR, European symbol
R8	56R	R0805	RESISTOR, European symbol
R10	56k	R0805	RESISTOR, European symbol
R11	270R	R0805	RESISTOR, European symbol
R12	2k7	R0805	RESISTOR, European symbol
R13	100k	R0805	RESISTOR, European symbol
R14	56k	R0805	RESISTOR, European symbol
R15	100k	R0805	RESISTOR, European symbol
R16	2k	TRIMR	Trimr resistor
R17	2k	TRIMR	Trimr resistor
R18	100R	R0805	RESISTOR, European symbol
R19	10k	R0805	RESISTOR, European symbol
R20	1,8k	R0805	RESISTOR, European symbol
R21	10k	R0805	RESISTOR, European symbol
R22	39k	R0805	RESISTOR, European symbol
R23	4k7	R0805	RESISTOR, European symbol
R24	4k7	TRIMR_5X5	Trimr resistor
R25	4k7	M0805	RESISTOR, European symbol
R26	4k7	TRIMR_5X5	Trimr resistor
RA	Value	R0805	RESISTOR, European symbol
RB	Value	R0805	RESISTOR, European symbol
RC	Value	R0805	RESISTOR, European symbol
RC1	Value	R0805	RESISTOR, European symbol
RD	Value	R0805	RESISTOR, European symbol
SS49_IN		PSH02-03P	Konektory se zámkem - vidlice - 3pin
SS49_OUT	ss49_karta	PSH02-02P	Konektory se zámkem - vidlice - 2pin
SS49_REF	_TEST	S1G1_JUM	Řadové konektory - kolíky - 1x
TEPLOTA_	TEST	S1G1_JUM	Řadové konektory - kolíky - 1x
TR2	2*15W	EI38-2	TRANSFORMER
U1	AD8226ARMZ	MSOP-8	Instrumentation Amp.
VR1	TL431	SO8	VOLTAGE REGULATOR
VR2	TL431	SO8	VOLTAGE REGULATOR

*Tabulka A.1: Seznam použitých součástek.*

## **Příloha B Technické manuály k integrovaným obvodům**

### **Kladný napěťový regulátor**

<http://www.farnell.com/datasheets/1805459.pdf>

### **Záporný napěťový stabilizátor**

<http://www.farnell.com/datasheets/1805459.pdf>

### **Čtyř-kanálový operační zesilovač LM2902D**

<http://www.farnell.com/datasheets/1877076.pdf>

### **Přístrojový zesilovač AD8226ARMZ**

<http://www.farnell.com/datasheets/1790003.pdf>

### **Teplotní senzor LM35**

<http://www.farnell.com/datasheets/1972852.pdf>

### **Hallova sonda SS49**

<http://www.farnell.com/datasheets/1676927.pdf>

### **PIN fotodioda BPW34**

<http://www.farnell.com/datasheets/1911355.pdf>

### **Laserová dioda 650 nm**

<http://www.farnell.com/datasheets/1816845.pdf>

### **Transformátor HAHN EI 382 1194**

<http://www.gme.cz/img/cache/doc/610/799/ei-transformator-do-dps-hahn-bv-ei-382-1194-2x15-datasheet-1.pdf>



