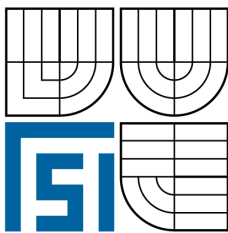


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

REALIZACE ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ROZPTYLU
ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ
VE STRUKTUŘE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

REALIZATION OF THE DEVICE FOR MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETIC WAVES
SCATTERING FROM STRUCTURE OF SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVOL BRILLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. MILOSLAV OHLÍDAL, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Brilla Pavol, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Realizace zařízení pro měření rozptylu elektromagnetického záření ve struktuře solárních článků

v anglickém jazyce:

Realization of the device for measurement of electromagnetic waves scattering from structure of solar cells

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Účinnost konverze energie slunečního záření na energii elektrickou v solárním článku lze zvýšit vhodnou volbou topografie jednotlivých rozhraní ve struktuře článku. Tato topografie významně ovlivňuje zachycení elektromagnetického (elmg) záření v účinných částech článku. Je velmi významné mít možnost experimentálně hodnotit zmíněné zachycení elmg záření pomocí rozptylu tohoto záření.

Cílem diplomové práce je realizovat zařízení pro měření úhlového rozdělení intenzity elmg záření rozptýleného ve struktuře solárních článků. Při realizaci je nutno respektovat

1. velkou anizotropii rozptylu elmg záření,
2. nutnost pracovat v blízké infračervené oblasti spektra elmg záření,
3. možnost rozšířit třídu měřených typů povrchů.

Obsah diplomové práce navazuje na výsledky projektu „Analýza optických vlastností solárních článků“ (ev. č. FT-TA3/142). Bude řešen v rámci projektu „Barevné solární články s vysokou účinností pro architektonické aplikace“ (FRTI1/168) ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je realizovat zařízení pro měření úhlového rozdělení intenzity elmg záření rozptýleného ve struktuře solárních článků. Při realizaci je nutno respektovat

1. velkou anizotropii rozptylu elmg záření,
2. nutnost pracovat v blízké infračervené oblasti spektra elmg záření,
3. možnost rozšířit třídu měřených typů povrchů.

Seznam odborné literatury:

OGILVY, J. A.: Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces. 1.edition, Bristol: Institute of Physics Publishing, 1991. 277 s. ISBN 0-7503-0063-9.

BORN, Max and WOLF, Emil: Principles of Optics. 7th. (expanded) edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 952 s. ISBN 0-521-64222-1.

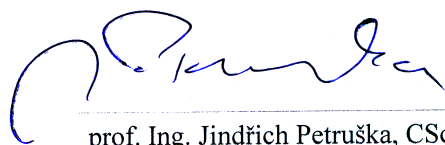
GLÉZL,Štefan, KAMARÁD, Josef, SLIMÁK, Ivan: Přesná mechanika. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992. 720 s.

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 26.11.2009





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá princípom, konštrukčným návrhom a realizáciou originálneho zariadenia pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia v štruktúre solárnych článkov. Nadväzuje na výsledky predchádzajúceho projektu "Analýza optických vlastností solárnych článkov"(ev.č.FT-TA3/142), a ako aj na znalosti získané diplomovou prácou Ing. Vladimíra Gründlinga, ktorá bola vypracovaná v rámci tohto projektu. Predmetom zmienenej diplomovej práce bola realizácia zariadenia pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia v oblasti viditeľného spektra. Účelom predkladanej práce je inovácia predchádzajúceho zariadenia tak, aby bolo možné pomocou neho študovať rozptyl elektromagnetického žiarenia aj v blízkej infračervenej oblasti spektra. To nám umožňuje zhodnotiť vplyv zadného rozhrania aktívnej časti solárneho článku na rozptyl využiteľného elektromagnetického žiarenia, to znamená na účinnosť konverzie slnečnej energie na energiu elektrickú. Za týmto účelom bolo potrebné upraviť zariadenie tak, aby sme mohli zmeniť zdroj žiarenia a detektor z dôvodu priepustnosti kremíkovej doštičky pre blízku oblasť infražiarenia. Táto diplomová práca je riešená v rámci projektu „Barevné solární články s vysokou účinností pro architektonické aplikace“ (FRTI1/168) v spolupráci s firmou Solartec s.r.o.

Kľúčové slová: rozptyl elektromagnetického žiarenia v blízkej infračervenej oblasti, topografia povrchu, solárny článok

Abstract

The master thesis discusses the principles, design and realization of the original device for measuring of the electromagnetic radiation scattering in the structure of solar cells. It follows the results of a previous project "Analýza optických vlastností solárnych článkov"(ev.č.FT-TA3/142) and as well as knowledge gained from Ing. Vladimír Gründling's master thesis, which has been done under this project. The subject of this thesis was to make a device for measuring of the electromagnetic radiation scattering in the visible spectrum. The aim of this work is an innovation of the previous device, so that the electromagnetic radiation scattering in the near infrared spectrum can be studied. This makes the possibility to qualify the influence of the rear surface of an active part of solar cell on electromagnetic radiation scattering, i.e., on the conversion efficiency of solar energy into electric. For this reasons it was necessary to modify the device, so that we can change the radiation source and detector because of the transparency of silicon wafers for the near infrared area. The work is supported by the project „Barevné solární články s vysokou účinností pro architektonické aplikace“ (FRTI1/168) in cooperation with Solartec s.r.o.

Keywords: scattering of electromagnetic waves in near infrared area, surface topography, solar cell

Bibliografická citácia:

Brilla, P. *Realizace zařízení pro měření rozptylu elektromagnetického záření ve struktuře solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracoval samostatne pod odborným vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím uvedenej literatúry.
Pavol Brilla, Brno, 2010

Pod'akovanie

Za podporu, neoceniteľné rady a trpezlivosť ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. RNDr. Miloslavovi Ohlídalovi, CSc., Ing. Radomírovi Malinovi, PhD., a tiež ostatným ľuďom, ktorí sa o vznik tejto práce pričinili.

Obsah

1	Úvod	13
2	Fotovoltaika	15
2.1	Fotovoltaický článok	15
2.2	Fotoelektrický jav	15
2.3	Fotovoltaický článok na báze kremíku	16
3	Rozptyl elektromagnetického žiarenia na rovinných povrchoch	19
3.0.1	Hladký rovinný povrch nekonečných rozmerov	20
3.0.2	Hladký rovinný povrch konečných rozmerov	21
3.0.3	Drsný rovinný povrch	21
3.1	Rozptyl žiarenia na povrchoch solárnych článkov	22
3.2	Metódy merania rozptylu žiarenia na rovinných povrchoch	23
3.2.1	Integrálne meranie	23
3.2.2	Rastrovacie meranie	24
4	Návrh zariadenia	25
4.1	Súčasti zariadenia	27
4.1.1	Lasery Thorlabs	27
4.1.2	Detektor Hamamatsu G10899-03K	28
5	Konštrukčné riešenie	31
5.1	Stolček	32
5.2	Uloženie stolčeka	32
5.3	Pohyb detektoru	34
5.3.1	Pohyb ramena detektoru	34
5.3.2	Pohyb vodiaceho prstenca	34

5.4	Rotácia konštrukcie	35
5.5	Odtienenie konštrukcie	37
6	Záver	39
7	Literatúra a odkazy	41
8	Použité skratky a symboly	43
A	Fotodokumentácia	45
B	Výkresová dokumentácia	53
C	Obsah priloženého CD	55

1 Úvod

V poslednom čase sa stretávame s veľkým rozmachom využívania alternatívnych zdrojov energie. Jednou z možných alternatív, je využívanie solárnej energie pomocou solárnych článkov. Vzhľadom k tomu, že Slnko zásobuje našu planétu výkonom približne $1,744 \cdot 10^{14}$ kW na osvetlenú časť Zeme, bolo by dobré sa naučiť túto energiu premeniť na nami použiteľnú - elektrickú. Avšak súčasne priemyselne vyrábané kremíkové fotovoltaické články majú účinnosť okolo 15%. Navyše napriek neustálemu znižovaniu spotreby jednotlivých zariadení je ich stále viac, a preto sa nedarí ani znižovať celkové prevádzkové náklady týchto zariadení.

Dopadajúci slnečný lúč odovzdáva svoju energiu iba čiastočne, väčšina energie sa rozptyluje späť nevyužitá. Vhodnou voľbou topografie povrchu solárneho článku je možné zvýšiť účinnosť konverzie svetelnej energie na elektrickú viacnásobnými rozptylmi na povrch dopadajúceho žiarenia. Vo viditeľnej oblasti, kde je kremík nepriehľadný, je z tohto hľadiska dôležitá len topografia horného rozhrania. V blízkej infračervenej oblasti elektromagnetického žiarenia (kde je kremík priesvitný) dochádza k absorpcii tohto žiarenia v štruktúre solárneho článku. Je teda vhodné sa zaoberať topografiou spodného rozhrania. Nami navrhovaný prístroj slúži práve k meraniu rozptylu elektromagnetického žiarenia na hornom ako aj spodnom rozhraní solárneho článku.

Cieľom tejto diplomovej práce je zhodnotiť predchádzajúci návrh zariadenia pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia a po potrebných úpravách ho realizovať tak, aby bolo možné merať, ako odrazivosť solárneho článku, tak aj jeho priepustnosť. Zariadenie bude pracovať s takto pripravenými vzorkami o ploche niekoľkých centimetroch štvorcových. Aj keď predkladané zariadenie je konštruované hlavne za účelom merania rozptylu elektromagnetického žiarenia na solárnych článkoch, je možné ho použiť aj pre štúdium rozptylu na iných povrchoch.

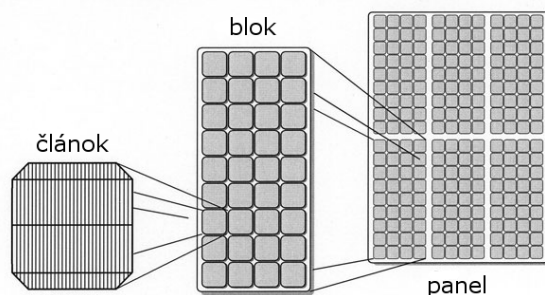
V prvých kapitolách je stručne popísaná teória, z ktorej vychádza podstata meracej metódy. Následuje zhodnotenie návrhu, jeho úpravy a samotná realizácia zariadenia. Súčasťou práce je aj výkresová dokumentácia uvedená v prílohách.

2 Fotovoltaika

Základnou jednotkou pre súčasné netermické solárne panely je fotovoltaický článok. V tejto kapitole si načrtne základné rysy tejto elementárnej stavebnej bunky solárneho systému pre produkciu elektrickej energie.

2.1 Fotovoltaický článok

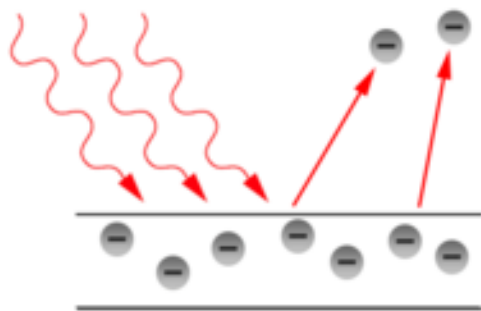
Najväčšie percento dnes priemyselne využívaných článkov používa princíp polovodičového PN prechodu v kremíkových doštičkách. Energia odovzdaná slnečným lúčom je priamo premenená na energiu elektrickú, vďaka využívaniu fotoelektrického javu. Prvé pokusy s fotovoltaiickými článkami patria francúzskemu fyzikovi Alexandre-Edmondovi Becquerelovi, ktorý vyše polstoročie pred Einsteinom vypozeroval (1839), že určité materiály generovali malé množstvo elektrického prúdu, keď boli vystavené účinkom svetla, a snažil sa tento jav popísať. Prvé skúšky článkov, ktorých základom bolo selénium, vykonal Heinrich Hertz v roku 1870.



Obr. 2.1: Stavba solárneho panelu

2.2 Fotoelektrický jav

Tento jav je založený na fyzikálnom procese čiastočnej absorpcie slnečného žiarenia látkou, ktorá pri takto pohltenej energii uvoľňuje elektróny. V prípade vonkajšieho fotoelektrického javu sa jedná o uvoľňovanie elektrónov do okolia. V prípade vnútorného javu tieto elektróny zostávajú ako vodivé vo vnútri látky. Vonkajší fotoelektrický jav plne popísal až Einstein



Obr. 2.2: Náčrt fotoelektrického javu [2]

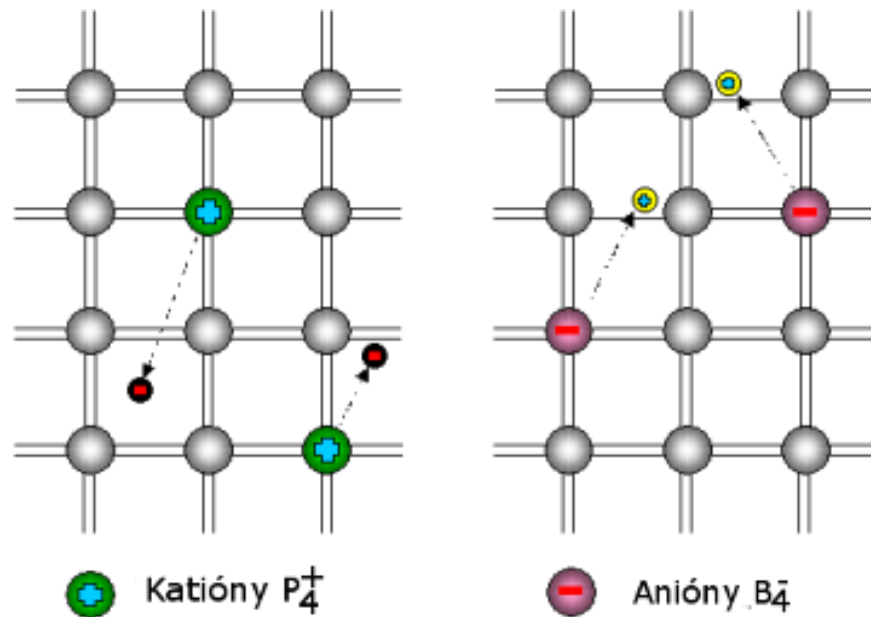
fotoelektrickým zákonom, keď predpokladal, že slnečné žiarenie nie je iba obyčajným vlnením, ale je možné si ho predstaviť ako prúd energetických kvánt - fotónov. Popis tohto javu Einstein sformuloval do rovnice:

$$h \cdot f = \Phi + E_{k,max} \quad (2.1)$$

kde $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ je Planckova konštanta, f je frekvencia žiarenia ktoré dopadá na povrch látky, Φ je výstupná práca potrebná na uvoľnenie elektrónu z väzby a $E_{k,max}$ zvyšková energia, ktorá sa prejaví ako kinetická energia elektrónu.

2.3 Fotovoltaický článok na báze kremíku

Základom tohto článku je polovodičový prvok kremík, ktorý je znečistený pomocou vhodných prvkov. V prvom prípade ide o prvok z III.A skupiny Mendelejevovej periodickej tabuľky prvkov, ktorý nedokáže obsadiť všetky kovalentné väzby v mriežke kremíku (P oblasť PN prechodu). V prípade druhom ide o prvok z V.A skupiny Mendelejevovej periodickej tabuľky prvkov, ktorému po obsadení všetkých väzieb s okolitými atómami kremíku ostáva slabo viazaný valečný elektrón (N oblasť PN prechodu) (obr. 2.3). Medzi týmito dvomi oblasťami vzniká elektrické pole. PN prechod je oblasťou s ochudobneným voľným nábojom. Pokiaľ do oblasti PN prechodu dopadne elektromagnetické žiarenie a budú splnené podmienky uvedené nižšie, môže dôjsť k interakcii fotónu s elektrónom. Vzniknutý pár elektrón - diera je elektrickým poľom rozdelený tak, že každá z častíc je presunutá na stranu majoritných nosičov.



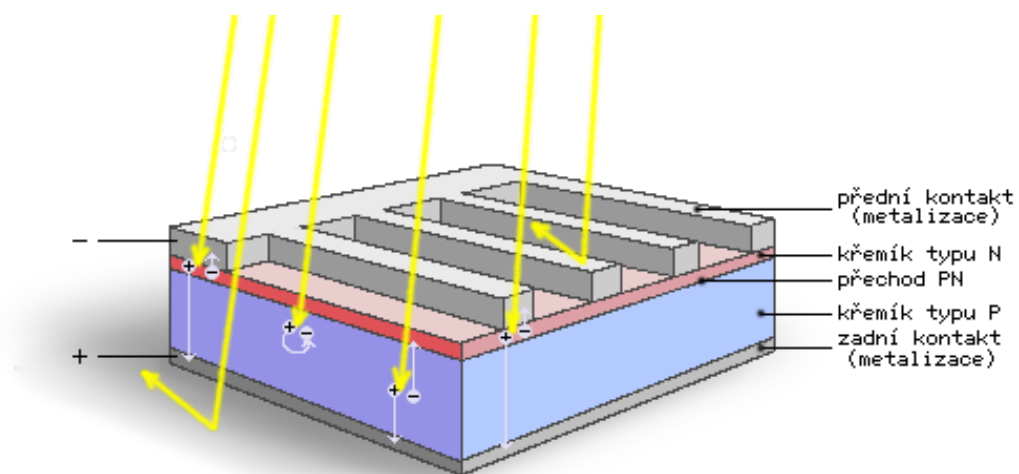
Obr. 2.3: Kremík s P/N prímiesami [6]

Podmienka pre vznik voľného páru vyplýva z rovnice fotoelektrického javu. Fotón musí mať minimálnu frekvenciu takú, aby jeho energia umožnila slabo viazanému elektrónu prekonať potencialnu bariéru Φ .

Na základe vzťahu:

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

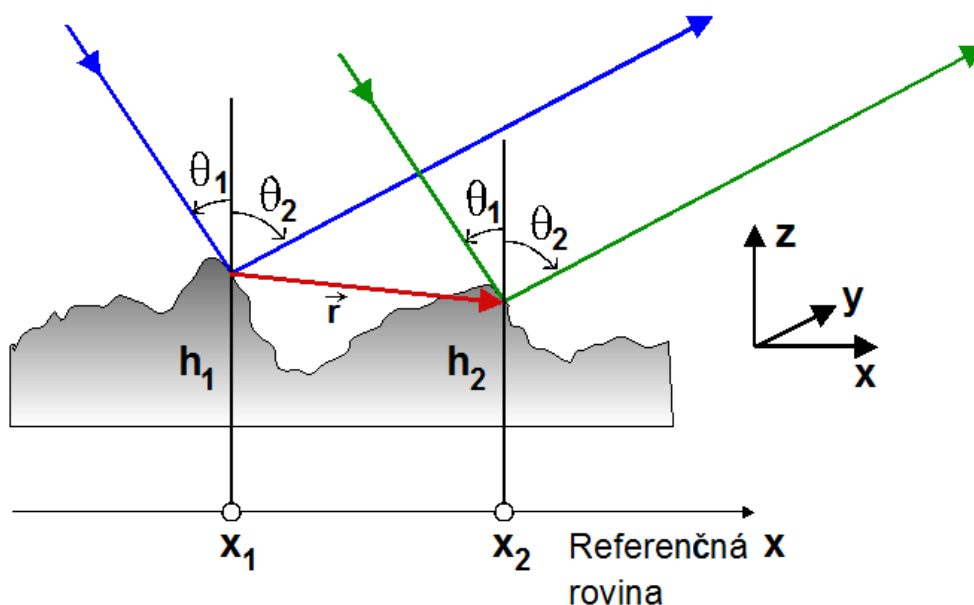
medzi vlnovou dĺžkou(λ), frekvenciou(f) a rýchlosťou šírenia žiarenia v danom prostredí a rovnice (2.1) vieme určiť maximálnu vlnovú dĺžku žiarenia, ktoré bude mať dostatok energie na prekonanie potenciálovej bariéry elektrónu. Pre kremík existuje medzná vlnová dĺžka $\lambda_0 = 1,03 \cdot 10^{-6} m$. Energia žiarenia s väčšou vlnovou dĺžkou ako λ_0 nebude foto-voltaickým článkom konvertovaná na energiu elektrickú.



Obr. 2.4: Fotoelektrický jav na solárnom článku [6]

3 Rozptyl elektromagnetického žiarenia na rovinných povrchoch

Na základe rozptylu žiarenia na povrchu dokážeme kvantitatívne určiť drsnosť povrchu. V tejto kapitole si uvedieme niektoré základné pojmy a vzťahy, ktoré sa vzťahujú k fyzikálnej podstate nášho prístroja. Podrobnejšie poznatky z danej tematiky je možné si prečítať v [3]. Máme daný všeobecný povrch, na ktorom budeme študovať stupeň drsnosti v rámci vlnovej optiky na základe javu interferencie.



Obr. 3.1: Všeobecný povrch a dva náhodne zvolené lúče žiarenia[3]

Nech na študovaný povrch dopadá rovinná monochromatická vlna pod uhlom dopadu θ_1 . Komplexná amplitúda tejto vlny je:

$$u(P) = U_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}},$$

kde U_0 je amplitúda vlny; \vec{k} je vlnový vektor veľkosti $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; \vec{r} je polohový vektor bodu pozorovania P. Výrazu $\vec{k} \cdot \vec{r}$ hovoríme fáza vlny.

Z tejto vlny vyberiem náhodne dva lúče (viz 3.1) a určíme fázový posun ($\Delta\Phi$) týchto lúčov v smere pozorovania určenom uhlom θ_2 .

$$\Delta\Phi = (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)\vec{r}$$

Je možné odvodiť:

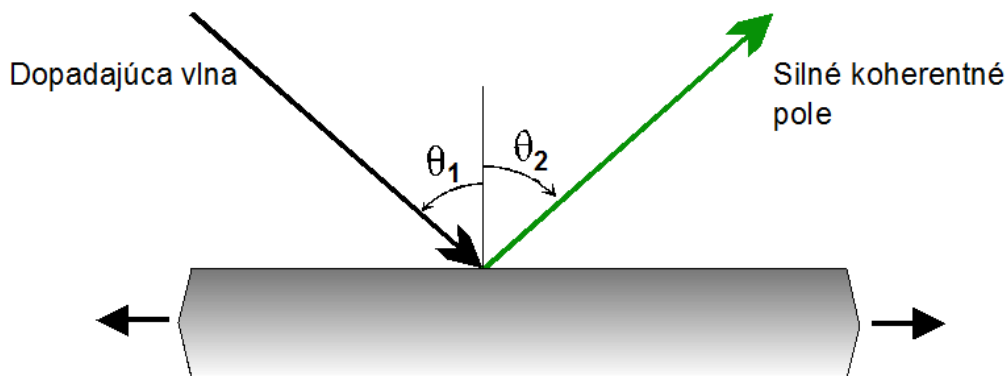
$$\Delta\Phi = k[(h_1 - h_2)(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) + (x_2 - x_1)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)], \quad (3.1)$$

kde h_1, h_2 sú výšky bodov rozptylu lúčov na povrchu (výška rozptylových centier) a x_1, x_2 sú súradnice týchto bodov.

Na základe hodnoty $\Delta\Phi$ v rámci jednej periódy vzniká takzvaná konštruktívna ($\Delta\Phi \ll \pi$) prípadne deštruktívna ($\Delta\Phi \sim \pi$) interferencia. Z hľadiska rozptylu elektromagnetického žiarenia drsnosť nie je vlastnou charakteristikou povrchu. Táto vlastnosť závisí, ako vyplýva z rovnice (3.1), od použitej vlnovej dĺžky žiarenia (λ), ako aj od uhla dopadajúcej vlny (θ_1) a uhlu pozorovania (θ_2).

Na základe rozboru vzťahu (3.1) urobíme kvalitatívny rozbor vplyvu drsnosti povrchu na rozptyl elektromagnetického žiarenia na tomto povrchu.

3.0.1 Hladký rovinný povrch nekonečných rozmerov



Obr. 3.2: Rozptyl vlny na hladkom rovinnom povrchu nekonečných rozmerov [3]

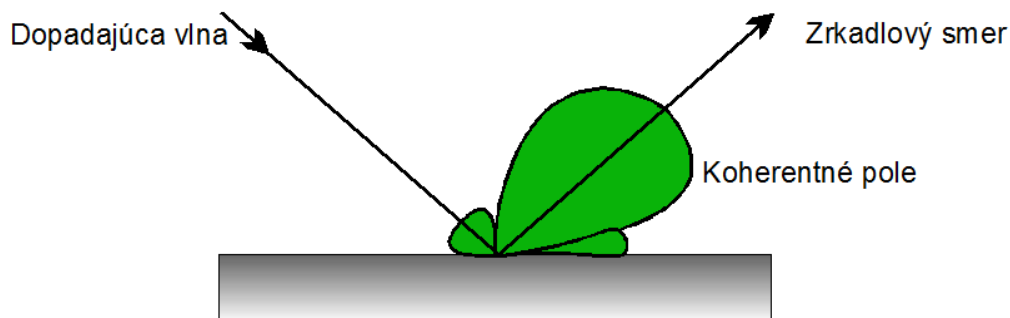
Z rovnice (3.1) je zrejmé, že v tomto prípade $h_1 = h_2$ z čoho vyplýva:

$$\Delta\Phi = k(x_2 - x_1)(\sin\theta_1 - \sin\theta_2),$$

pretože je možné $(x_2 - x_1) \rightarrow \infty$, je viditeľné, že konštruktívna interferencia vzniká iba pre $\sin\theta_1 - \sin\theta_2 = 0 \Rightarrow \theta_1 = \theta_2$. Pre všetky ostatné prípady ($\theta_1 \neq \theta_2$) nastáva deštruktívna interferencia. Teda celková energia dopadajúcej vlny sa roptýli do zrkadlového smeru (3.2).

3.0.2 Hladký rovinný povrch konečných rozmerov

Ak je rozsah $(x_2 - x_1)$ obmedzený (čím je tento rozsah menší, tým viac je to viditeľné) môže byť podmienka $\Delta\Phi = 0$ splnená aj pre $\theta_1 \sim \theta_2$.

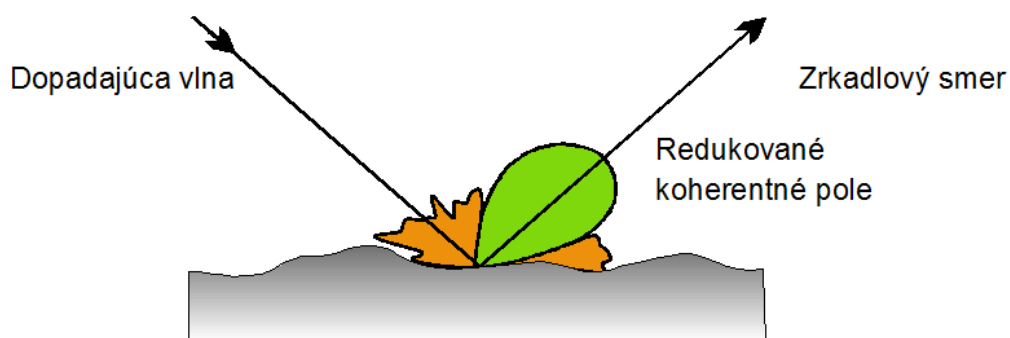


Obr. 3.3: Rozptyl vlny na hladkom rovinnom povrchu konečných rozmerov [3]

Takže konštruktívna interferencia vzniká nielen v zrkadlovom smere, ale aj v smeroch blízkom zrkadlovému, týmto spôsobom vzniká lalok rozptýlenej energie (3.3).

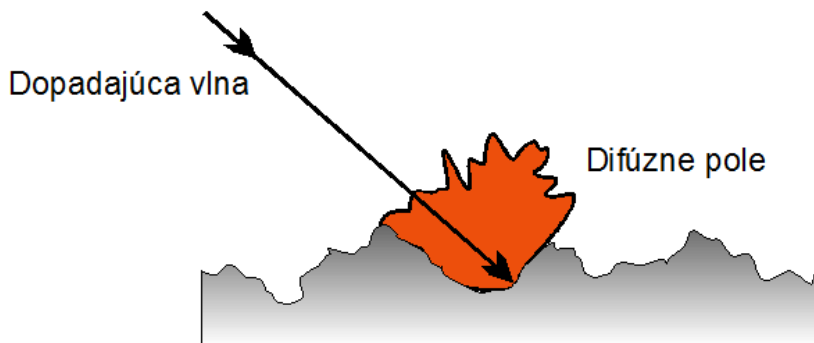
3.0.3 Drsný rovinný povrch

Jedná sa o prípad, keď $h_1 \neq h_2$. V tomto prípade sa uplatňuje aj prvý člen pravej strany rovnice (3.1). Tento výraz spôsobuje, že $\Delta\Phi \neq 0$ (a to aj v prípade $\theta_1 = \theta_2$). Teda energia elektromagnetickej vlny rozptýlená do zrkadlového smeru je menšia ako v prípade hladkého povrchu(3.4) a rozptyľuje sa aj do smerov $\theta_1 \neq \theta_2$.

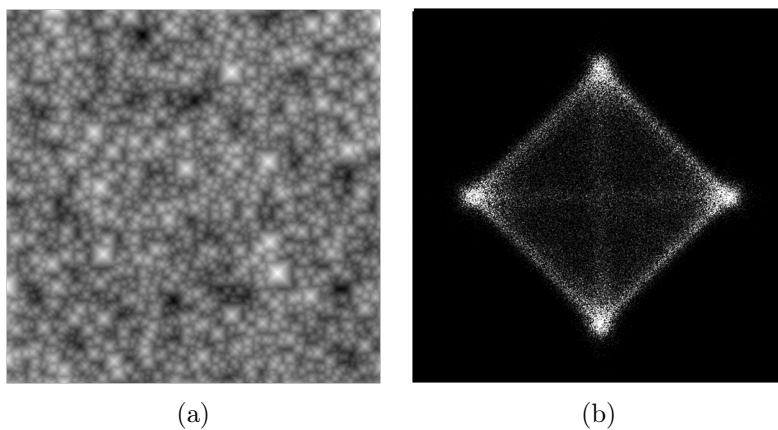


Obr. 3.4: Rozptyl vlny na málo drsnom povrchu [3]

Pre veľmi drsný povrch sa rozptyľuje vlna do všetkých smerov prakticky rovnako (3.5).



Obr. 3.5: Rozptyl vlny na veľmi drsnom povrchu [3]



Obr. 3.6: a) Počítačovo simulovaný povrch solárneho článku b) Rozptylový obraz tohto povrchu vypočítaný v rámci skalárnej Kirchoffovej teórie rozptylu.

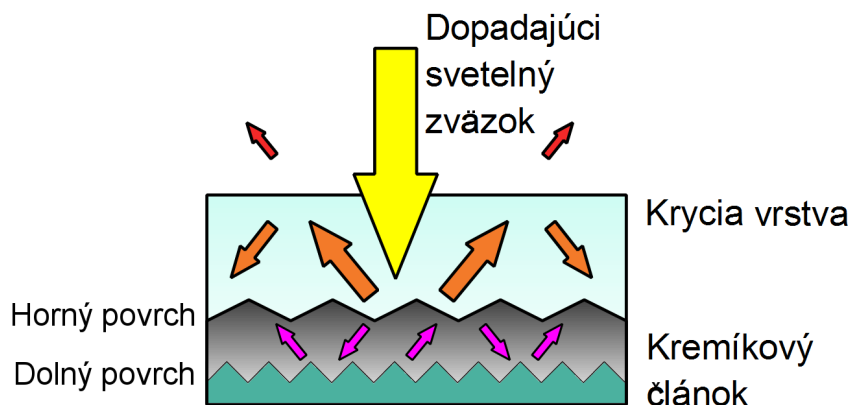
So súhlasom doc. M. Ohlídala

Pri presných výpočtoch uhlového rozdelenia intenzity rozptýlenej vlny je nutné používať exaktné teórie rozptylu, napríklad skalárnu Kirchoffovu teóriu rozptylu. V takomto prípade môžeme nájsť kvantitatívny vzťah medzi topografiou rozptýľujúceho povrchu a zmieným uhlovým rozdelením intenzity rozptýlenej vlny. Ako príklad uveďme rozptylový obrazec na počítačovo simulovanom, alkalicky leptanom povrchu solárneho článku (3.6)

3.1 Rozptyl žiarenia na povrchoch solárnych článkov

Vhodnou voľbou topografie povrchu solárneho článku je možné zvýšiť rozptyl elektromagnetického žiarenia tak, aby nastávali viacnásobné rozptyly na povrchoch a týmto spôsobom dochádzalo k čo najväčšiemu odovzdaniu a premene solárnej energie na elektrickú.

Správanie sa dopadajúceho žiarenia na solárny článok a následný rozptyl žiarenia na povrchoch je znázornený na obr. 3.7, ktorý je hrubou schémou rezom solárneho článku.



Obr. 3.7: Schéma roptylu na povrchu vzorku

3.2 Metódy merania rozptylu žiarenia na rovinných povrchoch

Na základe spôsobu zisťovania rozptýleného žiarenia na povrchu rozlišujeme dve základné skupiny metód:

- Integrálne meranie rozptylu
- Rastrovacie meranie rozptylu

3.2.1 Integrálne meranie

Tento typ merania sa používa pre potreby zisťovania pomeru odrazené a rozptýleného žiarenia bez potreby presnej znalosti priestorového rozloženia intenzity. Príkladom prístroja pre tento typ merania je elipsoid, ktorého vnútorný povrch je reflexný a má dva otvory. Meranie prebieha spôsobom:

1. skúmaný povrch je umiestnený v jednom z ohnísk elipsoidu
2. je osvetľovaný cez jeden otvor
3. druhý otvor obsahuje senzor pre zistenie množstva odrazeného žiarenia

4. difúzna časť sa odráža od reflexných stien a kumuluje sa v druhom ohnisku, kde je detektor pre zistenie množstva rozptýleného svetla

Takto dokážeme určiť pomer odrazeného, rozptýleného a pohlteneho žiarenia.

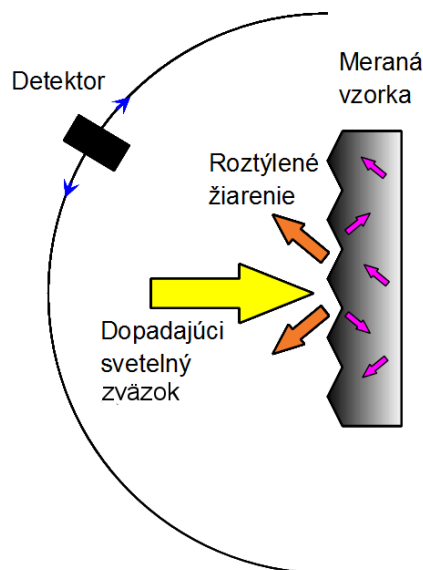
3.2.2 Rastrovacie meranie

Rastrovacie merania uskutočňujeme vtedy, keď požadujeme uhlové rozloženie intenzity rozptýleného žiarenia. Z dôvodu potreby uhlového rozloženia je potrebné získať informácie z každého bodu vhodne zvolenej plochy nad skúmaným povrchom. Práve túto metódu bude využívať aj prístroj, ktorého realizácia je zadaním tejto diplomovej práce. Zariadení pre rastrovaciu meraciu metódu povrchov je niekoľko, avšak nespĺňajú všetky požiadavky, ktoré si kladie Ústav fyzikálneho inžinýrství FSI VUT v Brně na daný typ prístroja. Tieto požiadavky sú obsahom nasledujúcej kapitoly.

4 Návrh zariadenia

Scatterometer (slovensky rozptylometer) je prístroj zostrojený primárne pre skúmanie elektromagnetického žiarenia rozptýleného na povrchu meranej vzorky. Takto získané a preskúmané pole dáva predstavu o uhlovom rozložení jeho intenzít. Z neho potom určujeme vhodnosť topografie povrchu daného materiálu pre výrobu solárnych článkov. Topografia priemyselne vyrábaných kremíkových povrchov alkalickým leptaním je komplikovaný systém pyramidiek náhodných veľkostí, ktoré sú náhodne rozmiestnené na povrchu solárneho článku.

Vzhľadom k tomu, že sa elektromagnetické žiarenie rozptyľuje všetkými smermi od povrchov meranej vzorky, je potrebné zabezpečiť zozbieranie dát z čo najväčšej uhlovej oblasti nad vzorkou. Za týmto účelom bola zvolená meracia plochou hemisféra nad rovinou povrchu vzorky. Pre zber dát na tejto hemisfére bol zvolený pohyblivý detektor, ktorý sa pohybuje po poludníkoch (4.1) a spracované data posiela do PC.



Obr. 4.1: Princíp pohybu nad rovinou vzorky

Aby toto zariadenie principiálne fungovalo, musia byť splnené niektoré základné predpoklady a požiadavky [1]:

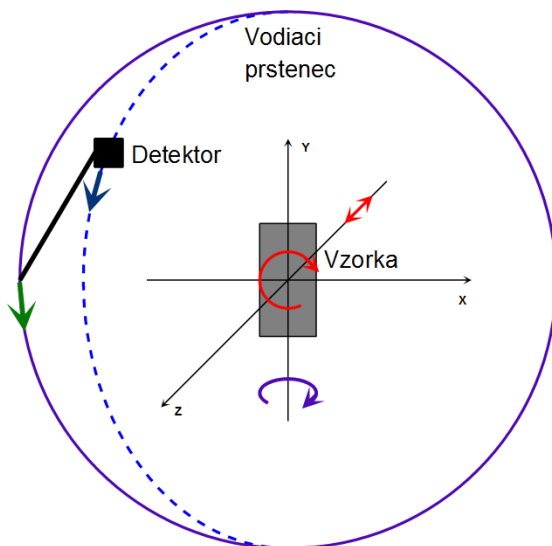
- bodové (rastrovacie) meranie uhlového rozdelenia intenzity rozptýleného svetla nad meranou vzorkou

- možnosť osvetlenia koherentným kolimovaným zdrojom žiarenia
- možnosť šikmého dopadu žiarenia na strednú rovinu vzorky
- možnosť merania žiarením o rôznych vlnových dĺžkach
- prípadné ďalšie úpravy zdroja žiarenia
- rotácia vzorky okolo kolmice vedenej k strednej rovine jej povrchu
- možnosť merania rôzne hrubých vzoriek

Všetky tieto požiadavky spĺňa už pôvodný prístroj, avšak jeho konštrukcia je zložitá a pri realizácii riešenia sa zistilo, že určité konštrukčné prvky zasahujú do priestoru hemisféry a tým znižujú meraciu plochu. Preto ďalšie požiadavky na nový prístroj sú:

- zjednodušenie konštrukcie,
- odstránenie pohonov, ktorých činnosť bola málo využívaná (nahradenie manuálnym nastavením),
- odstránenie čo najväčšieho množstva prvkov z meraného priestoru nad vzorkou,
- rozšírenie spektrálneho oboru do blízkej infračervenej oblasti spektra.

V prípade splnenia všetkých týchto podmienok získame veľmi univerzálny prístroj, vhodný k experimentálnemu skúmaniu podľa potrieb a požiadaviek zadavateľa.



Obr. 4.2: Riešenie pohybu nad rovinnou vzorkou

Z vyššie uvedených podmienok na výmenu svetelného zdroja vyplýva základná konštrukčná požiadavka na zariadenie, a to, že svetlo sa šíri vo vodorovnom smere a dopadá na vzorku, ktorá je umiestnená vertikálne. Žiarič je umiestnený mimo samotného prístroja a dá sa jednoducho zameniť, či upraviť chod lúča pridanou optickou sústavou. Preto, aby svetlo dopadalo vždy kolmo (prípadne pod daným uhlom), je nutné vyriešiť natočenie a vysunutie vzorky do požadovanej polohy (obr. 4.2). Natočenie sa deje okolo osi otáčania z . Ak chceme premerať rozptýľové pole pre dopadajúce žiarenie pod definovaným uhlom je nutné, aby bolo možné otáčať celou sústavou okolo osi y (obr. 4.2).

Aby bola manipulovateľnosť čo najjednoduchšia, vytvorená konštrukcia by mala zabezpečovať celý systém premerania, ako aj umožniť nastavenie vzorky pred meraním. Zdroj žiarenia má byť pevne daný na optickej lavici z dôvodu možnej modulácie svetelného zdroja. Pre premeranie celej hemisféry nad vzorkou bol zvolený pohyb detektora (umiestnený na ramene) po poludníkoch, to znamená že detektor najprv prejde poludníkom hemisféry, potom sa pootočí o určený počet krokov motora a prejde ďalším poludníkom. Postup sa opakuje pokiaľ nie je premeraná celá hemisféra nad vzorkou. Je pravdou, že takto vznikajú duplicitné hodnoty pre meranie v okolí vrcholu hemisféry, avšak môžeme tieto hodnoty pri spracovávaní nameraných hodnôt spriemerovať.

4.1 Súčasti zariadenia

4.1.1 Lasery Thorlabs

Pre účely tohto zariadenia boli zakúpené dva lasery (obr. 4.3), ktorých základne parametry sú uvedené v tab. 4.1.

Laser LDM635 vyžaruje červené žiarenie vo viditeľnej oblasti a bude používaný pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia len na prednej strane solárneho článku a zároveň bude slúžiť na zameriavanie vzorku pre meranie infražiarením. Laser LDM1550 vyžaruje v blízkej infračervenej oblasti spektra, to znamená možnosť premeravania ako rozptylu na prednom rozhraní, tak aj rozptylu na zadnom rozhraní. Pri práci s LDM1550 musíme dbať na zvýšenú bezpečnosť, keďže jeho žiarenie nie je pre ľudské oko viditeľné, avšak je nebezpečné.

Typ laseru	LDM635	LDM1550
Menovitá vlnová dĺžka	635 nm	1550 nm
Rozsah vlnových dĺžok	625 – 645 nm	1520 – 1580 nm
Rozmery lúča	3.0x5.0 mm	2.6x3.0 mm
Výkon	4 mW	4 mW
Krátkodobá stabilita (po 30 min)	0.01 %	
Dlhodobá stabilita (po 24h)	0.1 %	
Pracovná teplota	10 – 40°C	
Skladovacia teplota	5 – 50°C	
Napájanie (je súčasťou)	Vstup: 240 V Výstup: 9 V pri 0,66 A	

Tabuľka 4.1: Parametry laserov Thorlabs [8]

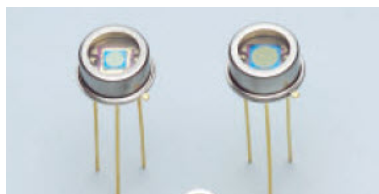


Obr. 4.3: Vonkajší kryt je pre oba lasery rovnaký, lišia sa v použitej dióde [8]

4.1.2 Detektor Hamamatsu G10899-03K

Pro naše účely vhodné charakteristiky použitého detektoru G10899-03K sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

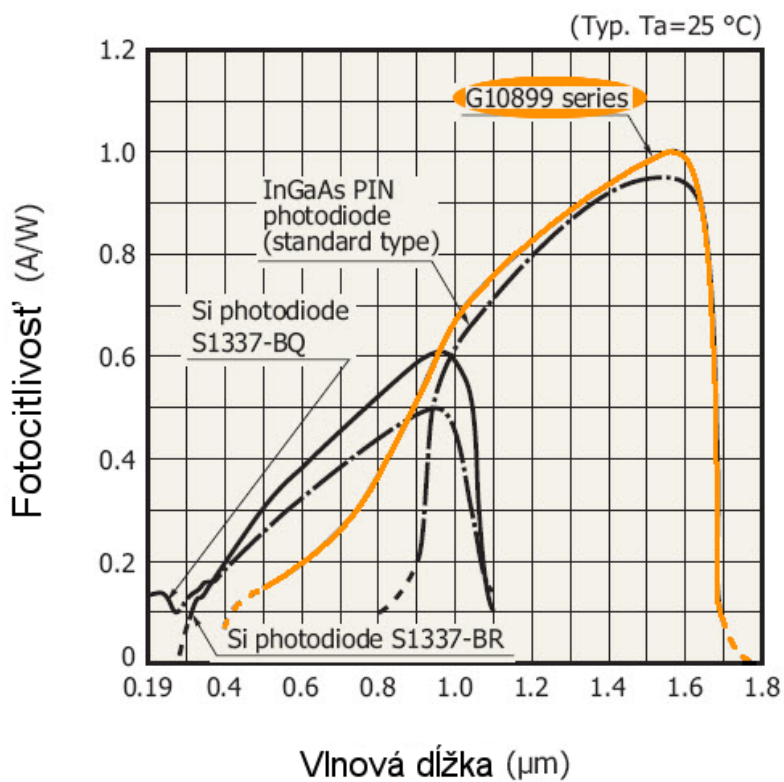
Jedným z najdôležitejších parametrov (4.2) je relatívne veľká aktívna plocha, ktorá je nutná pre zníženie koherenčnej zrnitosti. Táto zrnitosť sa prejavuje ako náhodne rozdelené oblasti veľkej a malej intenzity rozptýlenej vlny od povrchu vzorky. Charakteristika fotocitlivosti je uvedená na nasledujúcom obrázku 4.5.



Obr. 4.4: Detektory G10899-02K a G10899-03K [7]

Parameter	Symbol	Podm.	Min.	Typ.	Max.	Jedn.
Material okienka	borokremičitanové sklo					
Aktivná plocha	–	-	-	∅3	-	mm
Záverne napätie	V_R max	-	-	2	-	V
Priepustný prúd	I_f	-	-	10	-	mA
Rozsah spektrálnej citlivosti	λ	-	-	500 – 1700	-	nm
Maximum citlivosti	λ_p	-	-	1550	-	nm
Fotocitlivosť	S	$\lambda=650\text{ nm}$ $\lambda=\lambda_p$	0,15 0,85	0,22 1,00	-	$\frac{A}{W}$
Prúd za temna	I_D	$V_R=1\text{ V}$	-	15	75	nA
Cut-off frekvencia	f_C	$V_R=1\text{ V}$ $R_L=50\ \Omega$	-	5	-	MHz
Hraničná kapacita	C_t	$V_R=1\text{ V}$ $f=1\text{ MHz}$	-	600	-	pF
Odpoorvý bočník	R_{sh}	$V_R=10\text{ mV}$	-	10	-	MΩ
Pracovná teplota	T_{opr}		-40	-	+85	°C
Skladovacia teplota	T_{stg}		-55	-	+125	°C

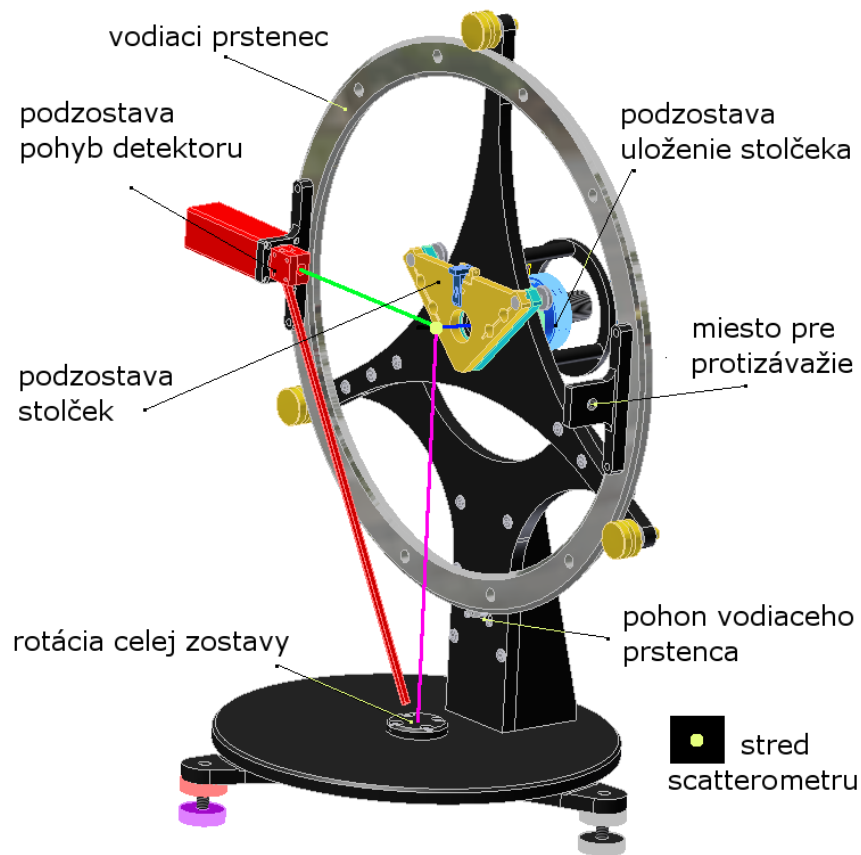
Tabuľka 4.2: Parametry fotodiódy hamamatsu [7]



Obr. 4.5: Citlivosť detektoru v závislosti na vlnovej dĺžke [7]

5 Konštrukčné riešenie

V tejto kapitole, ktorá popisuje samotnú konštrukčnú realizáciu zariadenia pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia na povrchoch solárnych článkov, si ukážeme konštrukčné riešenie celku (obr. 5.1), aj riešenie jednotlivých podzostav scatterometru.



Obr. 5.1: Schéma Scatterometru

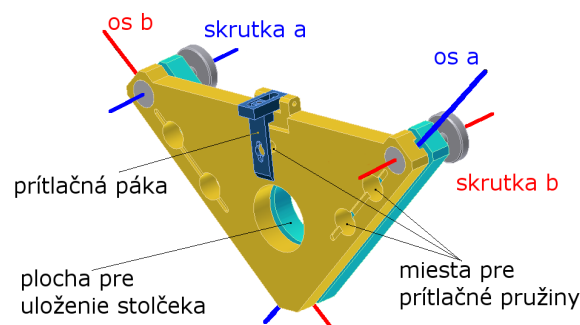
Stredom scatterometru nazývame miesto, kde sa pretínajú os rotácie vzorky, os rotácie ramena s detektorom a os rotácie celého prístroja. Práve do tohto bodu sa bude nastavovať rovina povrchu meranej vzorky.

5.1 Stolček

Základné požiadavky kladené na stolček sú nasledujúce:

- opakovateľné a polohovo definované uchytenie vzorky
- rýchly a ľahký spôsob uchytenia
- schopnosť jemného nastavenia kolmosti povrchu na os žiariča

Na základe vyššie uvedeného sme pristúpili k dvojdielnej konštrukcii stolčeka ako je vidieť na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Perspektívny pohľad na stolček

Samotná vzorka leží na nastaviteľnej časti stolčeka, ktorý umožňuje nastavovať orientáciu povrchu v dvoch osiach rotácie (a,b) pomocou dvoch skrutiiek. Týmto spôsobom je možné nastavovať náklon po zlomkoch stupňa. Rýchly spôsob uchytenia je realizovaný vďaka prítlačnému ramienku, pričom prítlak je volený pružinkou tak, aby uchytenie bolo dostatočne tuhé a zároveň nepoškodzoval meranú vzorku.

5.2 Uloženie stolčeka

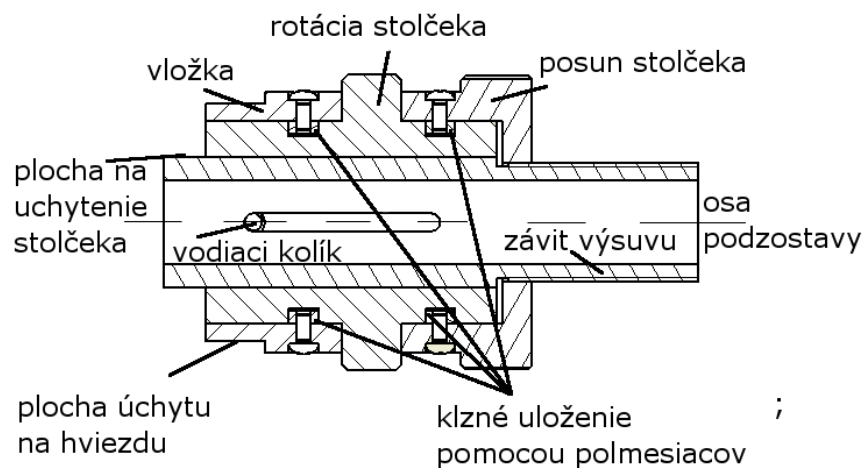
Očakované vlastnosti tejto podzostavy:

- priechodnosť stredú uložnia
- precízny posuv v smere normály stolčeka
- rotácia okolo normály stolčeka
- posuv a rotácia musia byť navzájom nezávislé



Obr. 5.3: Perspektívny pohľad na uloženie stolčeka

Stolček je nasadený na podzostavu - uloženie stolčeka. Táto časť zostavy umožňuje posuv stolčeka dopredu a dozadu, vďaka čomu dokážeme nastaviť polohu pre rôzne hrubé vzorky. Tak, aby bola zachovaná poloha meraného povrchu voči stredu scatterometra. Zároveň sme schopný nezávisle rotovať sústavou okolo osi, ktorá je v smere chodu lúča. Celý tento jemnomechanický systém je uložený pomocou nepohyblivého krúžku do nosnej hviezdy.



Obr. 5.4: Schéma uloženia stolčeka

5.3 Pohyb detektoru

Požiadavky na pohyb detektoru sú popísané v kapitole 4. Uvedme ich stručný prehľad:

- premeranie celej hemisféry nad vzorkou
- krok o veľkosti zrovateľnom s aktívnou plochou detektoru
- pohyb bez kolízií

Pre daný prístup k riešeniu bolo nutné navrhnuť rameno s detektorom o dvoch stupňoch voľnosti, jeden umožňujúci otáčanie okolo osy kolmej (osa z) na rovinu vzorky a ďalší dovoľujúci rotáciu okolo osy ležiacej v rovine vzorky (osa x), ako je vidieť na obr. 4.2. Konštrukčne boli tieto dva pohyby od seba separované dvoma nezávislými pohonami.

5.3.1 Pohyb ramena detektoru

Požadované sú tieto vlastnosti:

- tuhosť sústavy detektor - rameno
- ľahká konštrukcia a malý zotrvačný moment

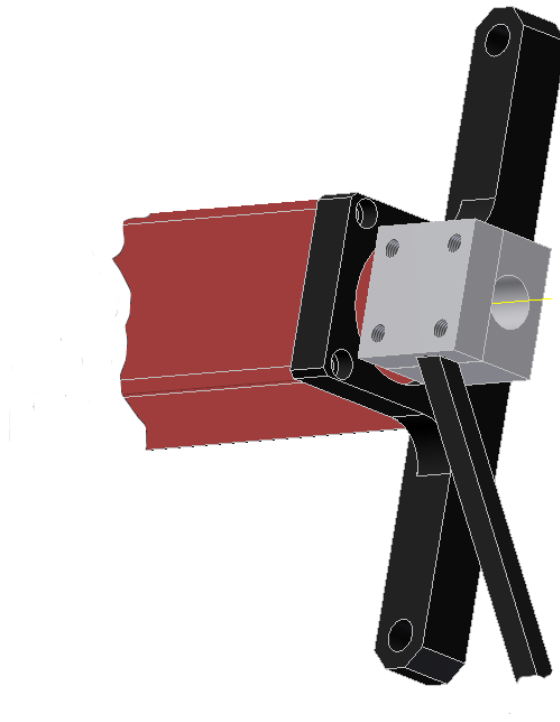
Práve z tohto dôvodu bol zvolený pohon jednosmerným motor ASC34AK-N10 s planétovou prevodovkou [9]. Z dôvodu požiadavku na ľahkú hmotnosť nosiča detektora a na jeho vysokú tuhosť bol zvolený štvorhranný dutý profil z kompozitového materiálu vystuženého uhlikovými vláknami.

5.3.2 Pohyb vodiaceho prstenca

Aby bolo umožnené premeranie celého uhlového priestoru nad vzorkou, je potrebné zaistiť rotáciu okolo osi z (obr. 4.2). Na dané uloženie sú kladené nasledujúce nároky:

- osa vodiaceho prstenca totožná s osou uloženia stolčeka
- čelo vodiaceho prstenca v rovine xy rovnobežnej s rovinou vzorky

Tento pohyb je zaručený pomocou uloženia vodiaceho prstenca na hviezdu pomocou troch kladiek. V dolnej časti hviezdy sú to dve centrické kladky, ktoré nesú váhu vodiaceho prstenca a tretia excentrická kladka v hornom vrchole hviezdy vymedzuje rovinu kolmú



Obr. 5.5: Uchytenie motoru a ramienka s diódou

na os uloženie stolčeka. Táto kladka zároveň zabezpečuje kompenzáciu vôlei v uložení vodiaceho prstenca.

Z dôvodu uloženia pohonu ramena na obvod prstenca, bolo nutné tento prstenec vyvážiť tak (obr. 5.7), aby nedochádzalo k zbytočnému preťažovaniu použitého krokového motoru PK223PB [10].

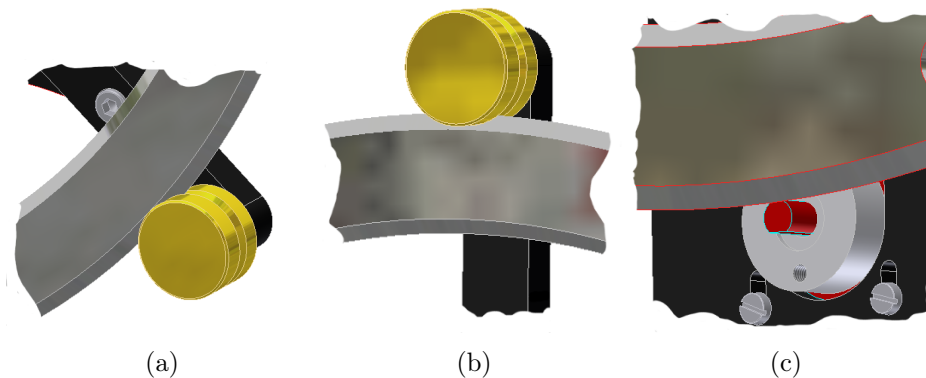
Zamedzenie prenosu vibrácií z motorčeku na vodiaci prstenec zabezpečíme použitím polyamidového pastorčeku.

5.4 Rotácia konštrukcie

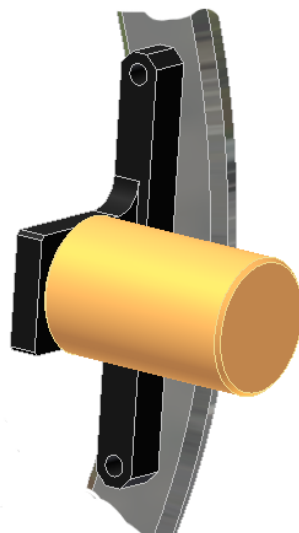
Posledné dva požiadavky na základnú konštrukciu prístroja sú:

- možnosť zmeny uhlu dopadajúceho lúča
- meranie vzorku na priepustnosť

Z dôvodu možnosti použitia veľkých stacionárnych laserov v laboratóriu koherenčnej optiky Ústavu fyzikálneho inžinýrství FSI VUT v Brně a merania rozptylu elektromagnet-



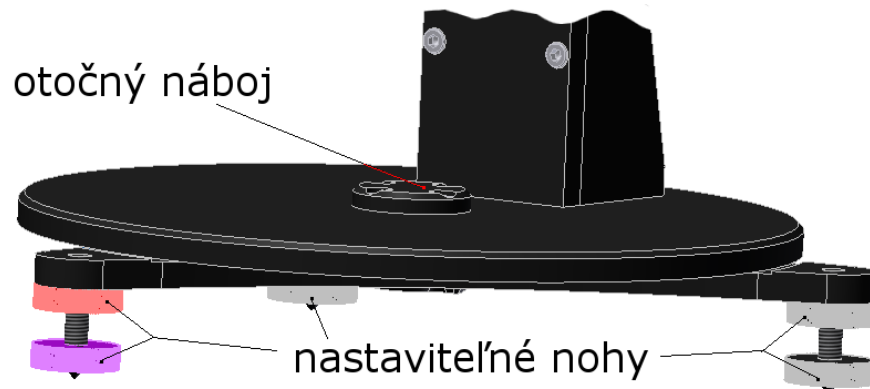
Obr. 5.6: Uloženie vodiaceho prstenca a) centrickou kladkou // b) excentrickou kladkou c) pohon pre vodiaci prstenec



Obr. 5.7: Pohľad na protizávažie

ického žiarenia pod rôznymi uhlami dopadu je nutné, aby bola konštrukcia otočná okolo osi y (obr. 4.2). Táto požiadavka bola riešená umiestnením točny na základňu scatterometru (obr. 5.8). Os rotácie leží v rovine študovanej vzorky tak, aby lúč žiarenia dopadal vždy na rovnaku oblasť vzorky a to aj pri zmene uhlu dopadajúceho lúča.

Točna poskytuje možnosť nastaviť nami zvolený uhol dopadu lúču na vzorku. Na jej okraji je vyrytá stupnica po 5° až do maximálnej hodnoty 60° .



Obr. 5.8: Rotácia konštrukcie pre zmenu uhla dopadajúceho lúča

5.5 Odtienenie konštrukcie

Vzhľadom nato, že sa jedná o optický prístroj, ktorý meria intenzitu rozptýleného svetla vo viditeľnej aj blízkej infračervenej oblasti, je nutné aby táto meracia sústava bola oddelená od možných vonkajších svetelných zdrojov. Zároveň budeme používať laser s infračerveným žiarením, ktoré je pre ľudské oko neviditeľné. Vzhľadom k tomu, že nie je možné u meranej vzorky predpokladať, ktorým smerom a akou intenzitou bude toto žiarenie rozptylovať, je vhodné, aby táto sústava bola od zvyšku miestnosti maximálne opticky izolovaná.

6 Záver

Súčasné priemyselne vyrábané kremíkové fotovoltaické články majú účinnosť okolo 15%. Vhodnou voľbou topografie povrchu solárneho článku je možné zvýšiť účinnosť konverzie svetelnej energie na elektrickú, a to viacnásobnými rozptylmi žiarenia dopadajúceho na povrch. Experimentálne overovanie závislosti rozptylu svetla na topografii povrchu poskytuje možnosť optimalizácie povrchov solárnych článkov. Scatterometer (rozptylometer) pracuje na princípe rastrovacieho merania rozptylu elektromagnetického žiarenia, to znamená, že meria uhlové rozloženie intenzity elektromagnetického žiarenia rozptýleného na rozhraní skúmanej vzorky.

Cieľom tejto diplomovej práce bolo opísať princíp, konštrukčný návrh a realizáciu originálneho zariadenia pre meranie rozptylu elektromagnetického žiarenia v štruktúre solárnych článkov. Pri návrhu som nadväzoval na predchádzajúci projekt Ing. Vladimíra Gründlinga, popísaný v jeho diplomovej práci, ktorá bola vypracovaná v rámci projektu "Analýza optických vlastností solárnych článkov"(ev.č.FT-TA3/142). Základné požiadavky kladené na všeobecný rozptylometer Ústavu fyzikálneho inžinýrství FSI VUT v Brně spĺňa už pôvodný prístroj, avšak jeho konštrukcia je zložitá a počas meraní sa zistilo, že určité konštrukčné prvky zasahujú do priestoru hemisféry, a tým znižujú meraciu plochu. Zároveň boli rešpektované všetky nové požiadavky kladené na toto originálne zariadenie.

Účelom tejto práce teda bola inovácia predchádzajúceho zariadenia tak, aby bolo možné pomocou neho študovať rozptyl elektromagnetického žiarenia aj v blízkej infračervenej oblasti spektra, s ohľadom na veľkú anizotropiu rozptylu elektromagnetického žiarenia. Rozšírenie pracovnej oblasti spektra nám umožňuje zhodnotiť vplyv zadného rozhrania aktívnej časti solárneho článku na rozptyl využiteľného žiarenia, to znamená na účinnosť konverzie slnečnej energie na energiu elektrickú. Rovnako bolo nutné zabezpečiť možnosť rozšírenia triedy meraných typov povrchov aj na iné ako solárne články.

Ako zdroj žiarenia boli zvolené dva lasery, ktoré sú navzájom zameniteľné. Sú uložené v nehybnom stojane na optickej lavici. Laser s diódou vyžarujúcou červené svetlo vo viditeľnej oblasti, slúži okrem samotného zdroja na meranie, aj ako zameriavač pre meranie laserom s diódou pre blízke infračervené žiarenie. Bol vybraný detektor, ktorý je citlivý na žiarenie vo viditeľnej aj v blízkej infračervenej oblasti. Rozdelením manipulácie, teda nezávislým nastavovaním rovnobežnosti povrchu vzorky s vodiacim prstencom na stolčeku a pritom samostatným ovládaním natočenia a priblíženia stolčeka so vzorkou,

dokážeme v budúcnosti navrhnuť a skonštruovať, pre každú novú triedu meraných vzorkou, vhodný stolček podľa potrieb zadavateľa, a to bez potreby ďalších úprav prístroja.

Pri realizácii scatterometru bola vytvorená kompaktná zostava, ktorá je zároveň prenosná a umožňuje používanie aj veľkých stacionárnych laserov Laboratória koherenčnej optiky. Vďaka čiastočnej modularite zariadenia bude mať uplatnenie aj pri riešení iných úloh založených na princípe rozptylovania žiarenia pre Ústav fyzikálneho inžinýrství FSI VUT v Brně. Ďalšie kroky, by mali viesť k samostatnému softwarovému riešeniu pre tento prístroj.

Diplomová práca bola riešená v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky s registračným číslom FRTI1/168 „Barevné solární články s vysokou účinností pro architektonické aplikace“ v spolupráci s firmou Solartec s.r.o., Rožnov nad Radhoštěm.

7 Literatúra a odkazy

- [1] GRÜNDLING, V.: *Návrh a realizace zařízení pro měření rozptylu světla na povrchích solárních článků*, Diplomová práce, FSI, VUT v Brně, 2008
- [2] HALLIDAY, D., RESNIK, R., WALKER, J.: *Fyzika, část 5: Moderní fyzika, kap. ší*, VUT v Brně, nakladatelství Vutium 199 s, 2000
- [3] OGILVY, J.A.: *Theory of Wave scattering from random Rough Surfaces*, 1.edition, Bristol: Institut of Physics Publishing, 277 s., 1991
- [4] GLÉZL, Š., KAMARÁD, J., SLIMÁK, I.: *Přesná mechanika*, 1.vyd, Bratislava: Alfa, 720 s., 1992
- [5] BORN, M., WOLF, E.: *Principles of Optics*, 7th (expanded) edition, Cambridge: Cambridge University Press, 952 s., 2005
- [6] SOLARTEC:, <http://www.solartec.cz/cs.html>, 1993 – 2010 [cit. 2010-05-25]
- [7] INGAAS PIN PHOTODIODES, SHORT WAVELENGTH ENHANCED TYPE , HAMAMATSU:, <http://sales.hamamatsu.com/index.php?id=13224155&language=1&undefined>, [cit. 2010-05-25]
- [8] LDM SERIES LASER DIODE MODULES:, http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=1219, 1999 – 2010 [cit. 2010-05-25]
- [9] TYPE WITH 24 V DC (ASC SERIES): ASC34AK-N10:, http://www.oriental-motor.co.uk/uk/sites/produkt_4.php?id=4&idser=82&idpr=2271&sgid=, 2006 [cit. 2010-05-25]
- [10] PK223PB, 2-PHASE STEPPING MOTOR:, <http://catalog.orientalmotor.com/item/stepping-motors--1068/pk-series-stepping-motors/pk223pb?&seo=110>, 2010 [cit. 2010-05-25]
- [11] HEPCOMOTION - THE COMPLETE LINEAR SOLUTION:, <http://www.hepcmotion.com/fr/t%C3%891%C3%89chargement-pg-21-get-542>, [cit. 2010-05-25]

8 Použité skratky a symboly

$E_{k,max}$	J	Kinetická energia fotónu
Φ	J	potenciálová bariera elektrónu
f	Hz	frekvencia žiarenia
v	$\frac{m}{s}$	rychlosť šírenia elektromagnetického žiarenia v danom prostredí
λ	m	vlnová dĺžka elektromagnetického žiarenia
h	$J \cdot s$ / $eV \cdot s$	Planckova konštanta
$\Delta\Phi$	–	fázový posun
k	$\frac{1}{m}$	veľkosť vlnového vektora
r	m	veľkosť polohového vektora
θ_1	°	uhol dopadajúceho žiarenia
θ_2	°	uhol pozorovania rozptylu žiarenia
h_1	m	výška rozptyľového centra lúču 1
h_2	m	výška rozptyľového centra lúču 2
x_1	m	súradnica rozptyľového centra lúču 1
x_2	m	súradnica rozptyľového centra lúču 2

A Fotodokumentácia



Obr. A.1: Predný pohľad



Obr. A.2: Predný pohľad



Obr. A.3: Predno-bočný pohľad



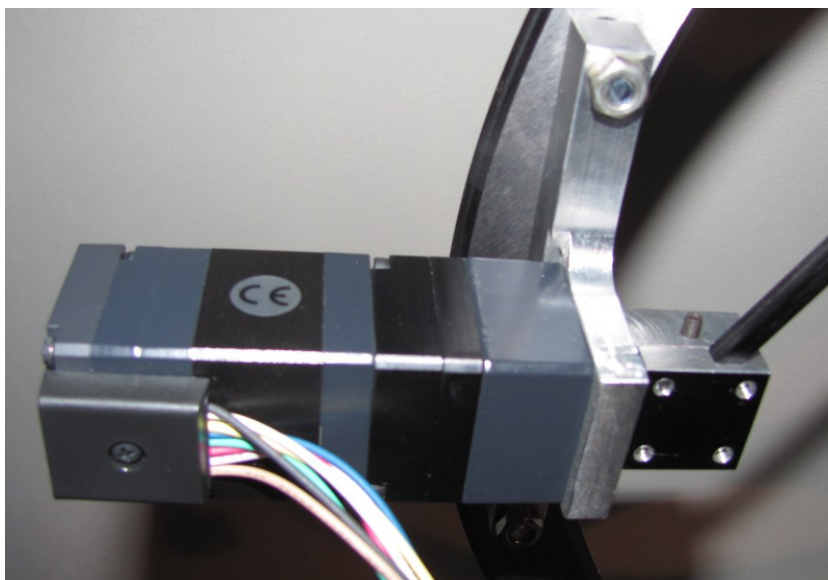
Obr. A.4: Zadno-bočný pohľad



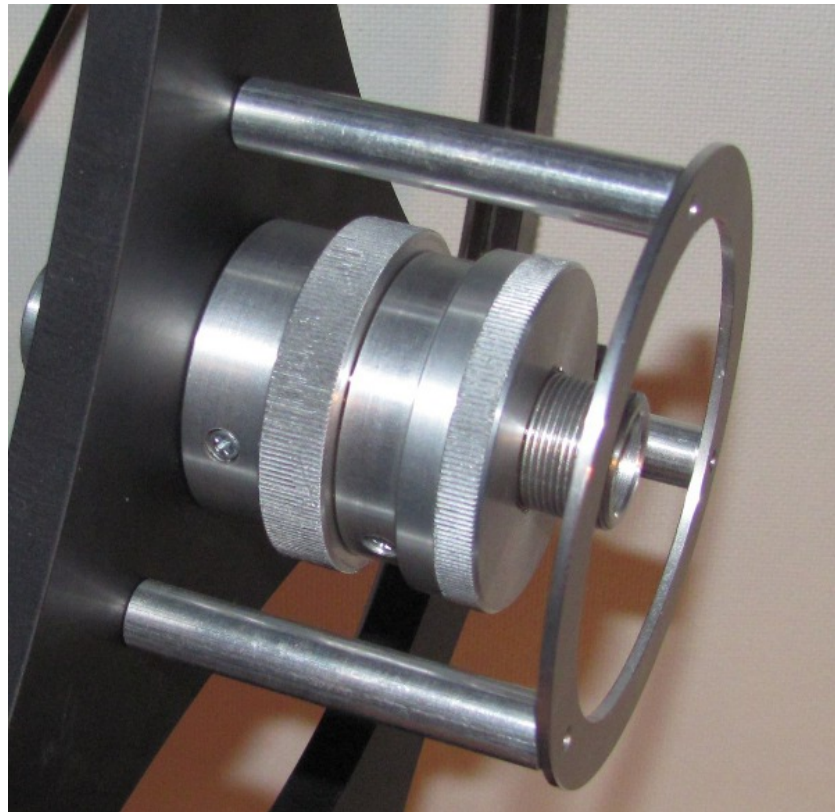
Obr. A.5: Zadný pohľad



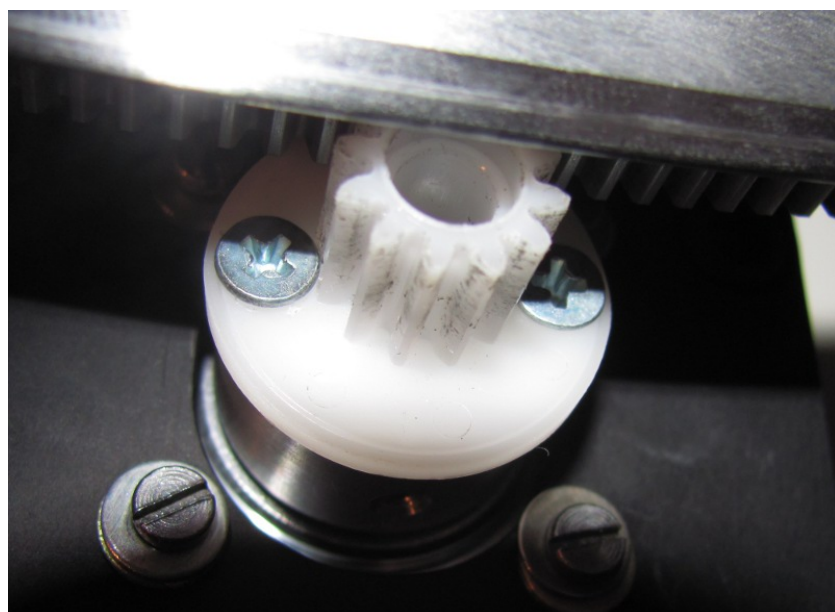
Obr. A.6: Detail excentrickej kladky



Obr. A.7: Detail motoru a uloženia ramena



Obr. A.8: Detail uloženia stolčeka



Obr. A.9: Detail na pastorek

B Výkresová dokumentácia

Výkresová dokumentácia je uložená v zložke na konci tejto diplomovej práce.

C Obsah priloženého CD

Priložené CD obsahuje:

- fotografická dokumentácia
- výkresová dokumentácia
- elektronická verzia diplomovej práce