

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Magisterský studijní obor Mikroelektronika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pracoviště pro testování solárních
článků metodou LBIC

2008

Tomáš Harašta

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	TEORETICKÁ ČÁST	5
2.1	SOLÁRNÍ ČLÁNKY	5
2.1.1	Fotoelektrický jev	5
2.1.2	Fotovoltaický jev	5
2.1.3	Jak funguje křemíkový solární článek	6
2.1.4	Spektrální citlivost solárních článků	7
2.1.5	Druhy solárních článků	10
2.1.6	Materiály pro solární články	11
2.2	PORUCHY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	12
2.2.1	Poruchy obecně	12
2.2.2	Poruchy solárních článků	12
2.2.3	Metody používané k popisu solárních krystalických článků	12
2.2.4	Měření solárních článků	13
2.2.5	Ampér-Voltové charakteristiky solárního článku	14
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	15
3.1	LBIC	15
3.1.1	Výhody LBIC	15
3.1.2	Možnosti metody	15
3.1.3	Rozložení pracoviště	16
3.1.4	Řešení pohyblivé části	16
3.1.5	Řešení optické části	18
3.1.6	Řešení části měření	19
3.2	ETAPY ZPRACOVÁNÍ	20
3.2.1	Nová měřicí metoda	20
3.2.2	Přechod na novější verzi měřicí karty	20
3.2.3	Signály pro ovládání krokových motorků plotteru	21
3.2.4	Vytvoření programu pro praktické ověření	22
3.3	TEDIA UDAQ 1416AS	22
3.3.1	Instalace modulu	22
3.3.2	Rozmístění a zapojení konektorů	22
3.3.3	Signály důležité pro měření	23
3.3.4	Knihovna TEDIA_DAQ01	24
3.3.5	Číselné formáty	24
3.3.6	Číselné kódy	24
3.4	PROGRAM	26
3.4.1	Provedení	26
3.4.2	Zavedení knihovny TEDIA_DAQ01	26
3.4.3	Použité funkce z knihovny TEDIA_DAQ01	26
3.4.4	Ukázka formátu funkce Td_Start_Acquisition	26
3.4.5	Vývojový diagram pro blokové měření	27
3.4.6	Vývojový diagram celého programu	28

3.4.7	<i>Filosofie rychlého měření</i>	28
3.4.8	<i>Princip funkce programu</i>	29
3.4.9	<i>Ukázka části programu</i>	29
3.4.10	<i>Podrobný popis uživatelského prostředí pro rychlou metodu LBIC</i>	30
3.5	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	32
3.5.1	<i>První naměřená data – pomalá metoda LBIC</i>	32
3.5.2	<i>Doba měření</i>	33
3.5.3	<i>Kontrast naměřených dat</i>	34
3.5.4	<i>Chyby</i>	37
3.5.5	<i>Šum</i>	39
3.5.6	<i>Výsledky rychlého skenování</i>	41
4	ZÁVĚR	42
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43

1 ÚVOD

Touto diplomovou prací navazuji na svoji bakalářskou práci. Výsledkem bakalářské práce byl program pro diagnostiku a testování solárních článků metodou LBIC (Light Beam Induced Current). Tento program pracuje spolehlivě, avšak praxe a testy prokázaly některé nedostatky. Vyřešení některých nedostatků a hledání nových postupů je úkolem této práce.

Jedním z hlavních nedostatků programu byla nízká efektivita při skenování solárních článků. Změření solárního článku s nejlepším rozlišením trvá několik hodin. Tato doba je příliš velká. Navíc bylo nutné vyřešit mnoho malých problémů které se týkají zpracování dat a přestupu na novější verzi měřicí karty. Proto mezi hlavní úkoly práce patří nalezení nového postupu měření a ověření výsledků při praktickém měření.

Problematikou solárních článků jsem se začal zajímat především v souvislosti s ekologií. Sluneční světlo je vhodnou alternativu obnovitelných zdrojů energie. Dnes díky stále aktuálnějšímu problému globálního oteplování a stále více diskutovanému ekologickému přístupu je nutné hledat nové směry v energetice. Solární články jsou jedna cesta kterou se lze ubírat.

Při výrobě a vývoji solárních článků je snaha dosáhnout co největší účinnosti. S tím souvisí také technologické postupy a jejich aplikace při výrobě. Nejdůležitějším kritériem je testování vyrobených solárních článků a následná zpětná vazba do výroby. Existuje celá řada metod testování, přičemž každá metoda má své výhody a nedostatky. Jednou z metod je právě LBIC. Podstatou této metody je skenování solárního článku světelným svazkem a následné měření odezvy. Výstup měření je v grafické podobě ve formě bitmapy. Díky tomuto zobrazení jsou snadno viditelné vady ve struktuře solárního článku. V případě použití různých vlnových délek světelného paprsku lze provést diagnostiku ve různých vrstvách.

Velmi důležité pro celou metodu je vzájemná komunikace mezi jednotlivými částmi měřicího pracoviště. V podstatě se celé pracoviště spojuje v programu, který koordinuje jednotlivé děje. Pro vytvoření programu jsem zvolil programovací jazyk C++ v prostředí Builder6 od firmy Borland. Tento softwarový přístup umožňuje dobré provázání jednotlivých zařízení a prostředí windows.

Konečným výstupem této práce by měl být zcela funkční program.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Solární články

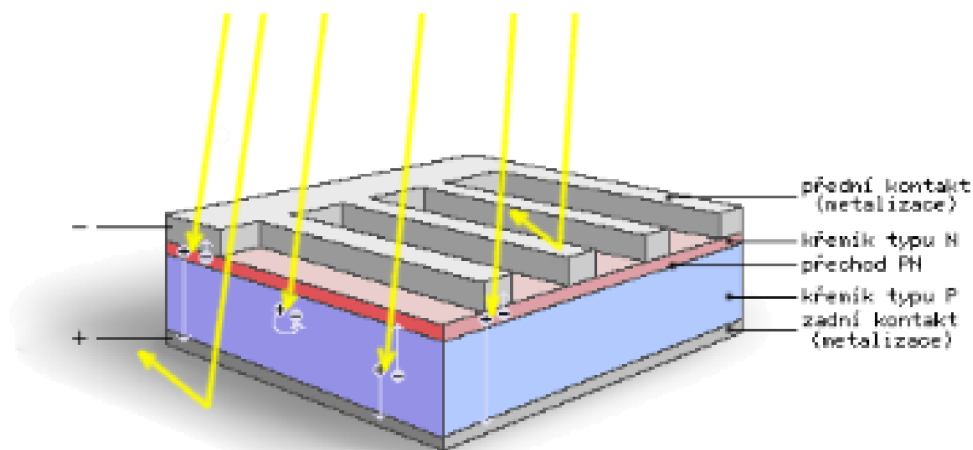
2.1.1 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev objevil Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839. Později ho dokázal objasnit až Albert Einstein v roce 1905, v roce 1922 za tuto práci obdržel Nobelovu cenu za fyziku. Princip spočívá v tom, že při dodání určitého kvanta energie do látky elektrony tuto látku opustí. Jedná se o vnější fotoelektrický jev. [8]

2.1.2 Fotovoltaický jev

V případě fotovoltického jevu se jedná o takzvaně vnitřní fotoelektrický jev, kdy dodáním energie ve formě kvanta se elektron uvolní z látky, ale pouze se z něj stane volný elektron v látce.

Vzájemným působením slunečního záření a hmoty dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů, v polovodiči pak vznikají volné elektrické náboje (elektron-díra), které jsou už jako elektrická energie odváděny ze solárního článku přes regulátor dobíjení do akumulátoru nebo ke spotřebiči. [8]



Obr. 1 Struktura solárního článku [8]

2.1.3 Jak funguje křemíkový solární článek

Křemík má stejnou krystalovou strukturu jako diamant. Na rozdíl od diamantu však není průhledný, absorbuje světlo o vlnové délce kratší než přibližně 1 mikrometr (fotony o větší energii než zhruba 1,1 elektronvltu), to jest část infračerveného, celé viditelné a ultrafialové spektrum. Absorbuje tedy větší část celého slunečního spektra. To je znázorněno na obrázku 3, kde vidíme spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou, spolu s absorpční hranou křemíku.

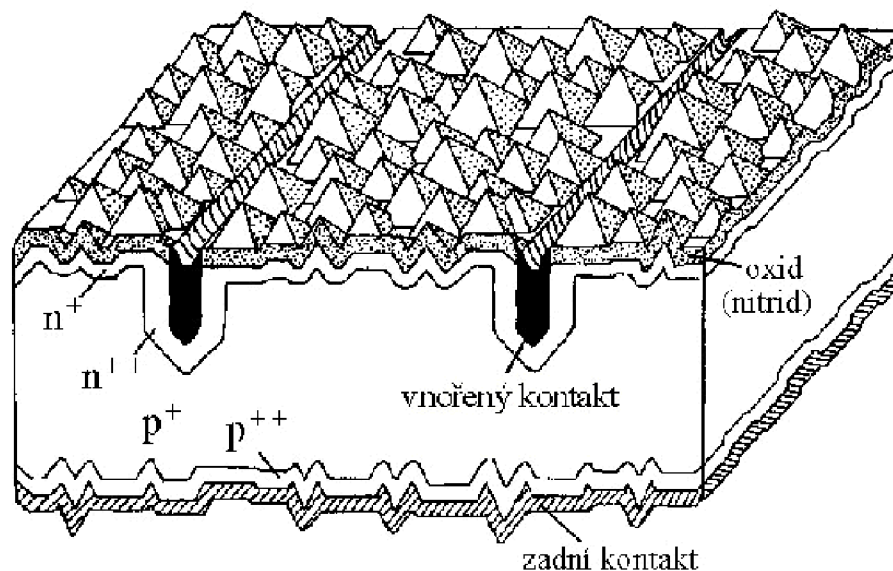
Dopadá-li na křemík foton o energii menší než 1,1 elektronvltů, projde křemíkem a není absorbován. Když je jeho energie větší než 1,1 elektronvltů (tato energie odpovídá šířce zakázaného pásu a tedy absorpční hraně křemíku) pak je tento foton absorbován a v polovodiči vznikne jeden volný elektron a jedna volná díra. Energetický rozdíl mezi energií dopadajícího fotonu a šířkou zakázaného pásu se přeměňuje na teplo. Hlavním důvodem, proč teoretická účinnost jednoduchého článku v planární konfiguraci příliš nepřesáhne 30%, je neabsorbování celého slunečního spektra. U více energetického záření, které má menší vlnovou délku, se zmenšuje hloubka vniku.

Aby sluneční článek sloužil jako zdroj proudu, musí v něm nastat rozdělení elektronů a děr. Sluneční článek není homogenní polovodič, ale skládá se z části mající elektronovou vodivost (materiál typu n, například křemík s příměsí fosforu) a části mající děrovou vodivost (materiál typu p, například křemík s příměsí boru).

Na přechodu p-n dojde k oddělení díry a elektronu a na přírodních kontaktech vznikne napětí (v případě křemíku 0,5-0,6 V) a připojíme-li ke kontaktům spotřebič, protéká jím elektrický proud. Ten je přímo úměrný počtu absorbovaných fotonů a tedy i ploše celého slunečního článku.

Fotovoltaický sluneční článek je tedy polovodičová dioda (přechod p-n), mající velkou plochu (decimetry čtvereční), spodní celoplošný kovový kontakt (reflektor) a vrchní kovový kontakt (mřížku, hřeben), zabírající velmi malou plochu (4-8% plochy článku), aby nestínil.

Skutečná struktura je mnohem složitější, jak je vidět na obrázku 2. Tato struktura má napomoci co nejvíce minimalizovat všechny možné ztráty (reflexe světla, rekombinace nosičů proudu) a zajistit co největší účinnost přeměny sluneční energie v energii elektrickou. Teoretická účinnost v případě článku z krystalického křemíku je okolo 30%. Vyšší teoretickou účinnosti lze dosáhnout u článků složených z různých materiálů s různou absorpční hranou nebo koncentrací světla, která zvyšuje (logaritmičky) získané napětí.



Obr. 2 Schematické znázornění struktury křemíkového solárního článku se zanořenými kontakty na přední straně. Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení „light trapping“ efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině <100>. Vrstva oxidu, případně nitridu křemíku je použita pro pasivaci povrchu křemíku a pro snížení reflexních ztrát. Zadní kontakt (Al) funguje jako zpětný reflektor. [12]

Sluneční články se spojují sériově a paralelně do slunečních panelů, které již dávají požadované napětí a stejnosměrný proud. Malý konvertor umožňuje připojení na standardní střídavou síť 220V. [12]

2.1.4 Spektrální citlivost solárních článků

Fotovoltaické články nedovedou přeměnit v elektrickou energii veškeré dopadající světlo. Účinnost komerčně vyráběných článků bývá kolem patnácti procent.

Každý foton je nosičem malého množství energie. Ve slunečním spektru je četnost fotonů o určité energii rozložena nesterjnoměrně. Podle grafu je vidět, že například fotonů žlutého světla přichází od slunce mnohem více než fotonů červeného světla. Na vodorovné ose grafu je vlnová délka - čím je vlnová délka kratší, tím mají fotony vyšší energii. Světlo na grafu vlevo má vyšší energii než světlo na grafu vpravo.

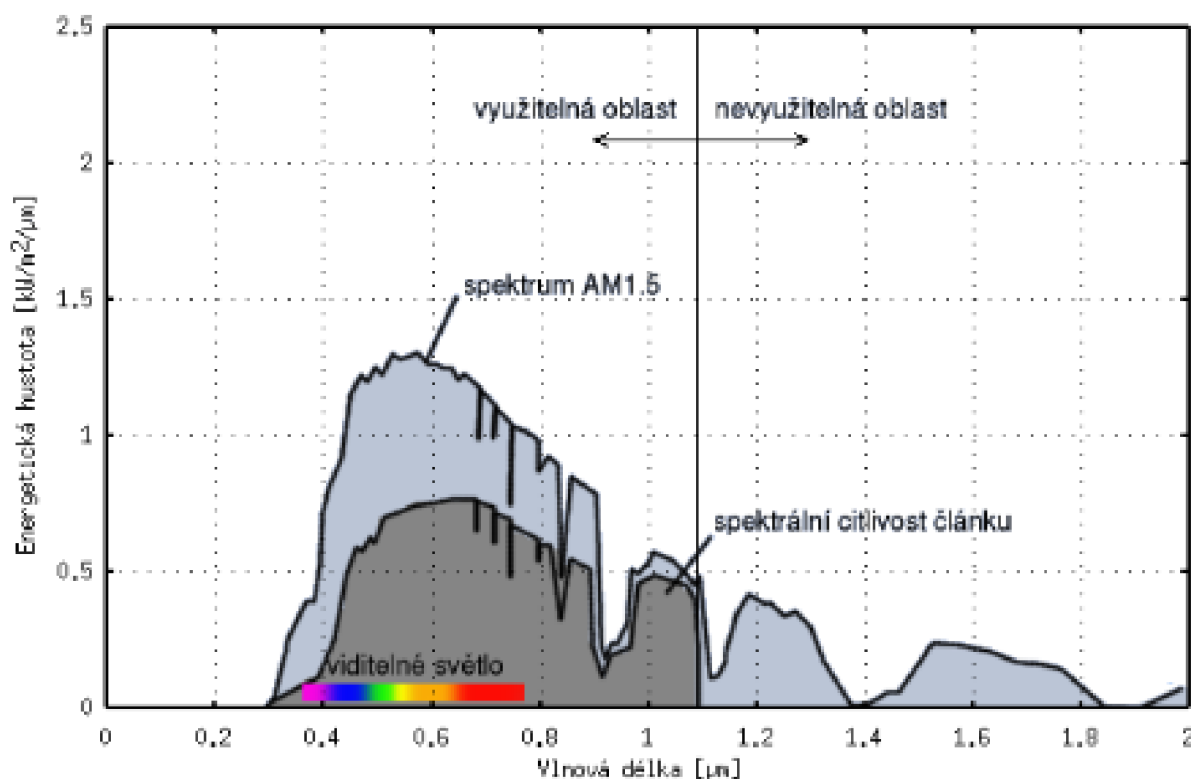
Světlo dopadající na fotovoltaický článek musí mít dostatečnou energii, aby článek mohl vyrábět elektřinu. Pro křemíkové fotovoltaické články potřebuje foton energii minimálně 1,12 eV, což odpovídá vlnové délce asi 1,1 mikrometru. Energie fotonu, která překračuje potřebnou hranici pro výrobu elektřiny, se mění v teplo.

Ve fotovoltaickém článku tak lze na elektřinu přeměnit teoreticky maximálně padesát procent dopadajícího světla. Prakticky se dosahuje účinnosti asi patnáct procent u průmyslově

vyráběných článků. U experimentálních laboratorně vyráběných článků se dosahuje účinnosti až třicet procent.

Energetická hustota slunečního záření v blízkosti slunce je ve vakuu $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$. Tato energie je rozložena do elektromagnetického spektra přibližně odpovídající záření absolutně černého tělesa o teplotě 5700 K .

Při průchodu atmosférou se část sluneční energie ztratí. Asi 300 W/m^2 se v atmosféře absorbuje, kolem 100 W/m^2 se rozptýlí. Část rozptýlené energie přispívá k celkovému osvětlení jako difuzní záření oblohy (nebeská modř).

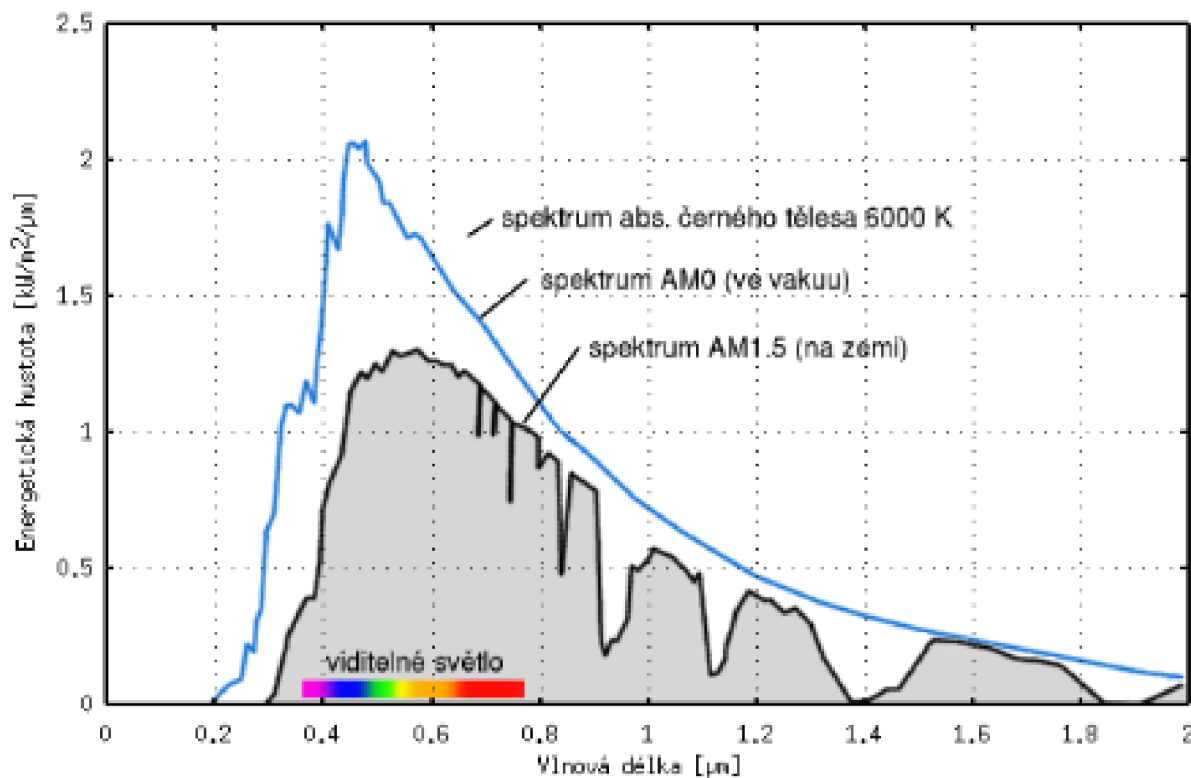


Obr. 3 Spektrální citlivost článku [8]

AM0 (air mass) je spektrum slunečního záření v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 150 milionů kilometru od slunce bez ovlivnění atmosférou. Celková energetická hustota tohoto spektra je $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$.

AM1.5 je spektrum slunečního záření po průchodu bezoblačnou atmosférou. Energetická hustota tohoto spektra je 1 kW/m^2 , ale silně závisí na průhlednosti atmosféry. Celkový využitelný výkon slunečního záření odpovídá šedé ploše pod křivkou AM1.5.

Pokud je slunce přímo v zenitu, ve výšce devadesáti stupňů, prochází sluneční záření nejmenší možnou vrstvou vzduchu. Takové spektrum se označuje jako AM1. Většinu doby ale slunce nebývá tak vysoko a sluneční záření proto musí procházet větší či menší vrstvou atmosféry. Pro fotovoltaiku se proto používá spektrum AM1.5, odpovídající výšce slunce přibližně 45° nad obzorem. Sluneční záření v tomto případě prochází jeden a půl násobně mohutnější vrstvou vzduchu.



Obr. 4 Porovnání spekter článku [8]

2.1.5 Druhy solárních článků

Klasické články

Jedná se v podstatě o články vyrobené z různých forem křemíku. Klasické články se dále dělí na:

Monokrystalické

Vyrábějí se z monokrystalického křemíku – vysoce čistý materiál

Polykrystalické

Vyrábějí se z polykrystalického křemíku – levnější materiál. Mají menší účinnost než předchozí.

Amorfni

Vyrábějí se z amorfniho křemíku – materiál, v němž jsou atomy uspořádány nahodile. Oproti předchozím mají velké výhody ve vysoké absorpci světla, mají velké napětí naprázdno, malou spotřebu, dále skýtají velké možnosti při automatizaci výroby a spotřebě energie při výrobě. Amorfni křemík se používá také na výrobu tenkovrstvých článků. Nevýhodou je však malá účinnost.

Tenkovrstvé články

Jsou to články, které mají tloušťku pouze několik mikrometrů (klasické články mají desetiny milimetru). Díky této tloušťce se ušetří množství materiálu a lépe se využije dopadající záření, protože vzdálenost k přechodu PN je kratší než u běžných článků. Nejběžnější tenkovrstvé články jsou dnes většinou vyráběny z amorfniho křemíku nebo polovodičových sloučenin ($\text{CuInSe}_2\text{-ZnO}$, CdTe-CdS , GaSe_2 , CdSe , GaAs , FeSi_2 , ZnSe). Polykrystalické tenkovrstvé články dosahují také dobrých vlastností.

2.1.6 Materiály pro solární články

Křemík

Jak je vidět z předchozího rozdělení, nejběžnějším materiálem je křemík. V podstatě se dělí na polykrystalický křemík - je vhodný pro menší výkony a má poměrně dobrou účinnost i při nižších hladinách osvětlení, monokrystalický křemík – jenž je vhodný pro větší výkony a články z něho vyrobené mají větší účinnost než články z polykrystalického křemíku a amorfni křemík. Článek z monokrystalického křemíku o ploše 100cm² je schopen dodávat proud 3-4 ampéry.

Zkoumaným materiálem je amorfni, nanokrystalický a mikrokrystalický křemík pro tenkovrstvé sluneční články.

Polovodičové sloučeniny

Arsenid Galia (GaAs) - hlavní výhodou je vyšší účinnost, protože šířka zakázaného pásu je vhodná pro absorbování nejenergetičtější části spektra. Další výhodou je větší odolnost proti kosmickému (tvrdému) záření a schopnost pracovat bez snížení efektivity i při teplotách nad 100 stupňů Celsia. Mezi nevýhody patří mnohem vyšší cena a větší hustota GaAs oproti krystalickému křemíku. Nyní se vyvíjejí kombinace obou článků, protože oba materiály mají odlišnou spektrální citlivost. Vhodnou kombinací obou typů lze dosáhnout účinnosti kolem 30% a ve spojení s koncentrátory se očekává dosažení ještě vyšší účinnosti.

Sírník kademnatý (CdS) - články tvořené přechodem Cu₂S a CdS dosahují účinnosti 10%. Obvykle jsou to tenkovrstvé články na pevné podložce, kde hmotnost je dána pouze podložkou. Jejich výhodou je tedy malá hmotnost, díky čemuž se používaly při kosmických aplikacích. Hlavním důvodem jejich používání byla skutečnost, že nebyl znám jiný materiál vhodný pro tuto technologii. Nevýhodou je malá stabilita těchto článků. Dnes se již nepoužívají. Vylepšenou variantou tohoto historicky nejstaršího typu článků jsou kombinace sírníku kademnatého

s teluridem kademnatým (systém CdS - CdTe) - články vyhovují jen pro napájení zařízení s malým příkonem a proto nemají v energetice mnoho využití.

2.2 Poruchy solárních článků

2.2.1 Poruchy obecně

Poruchu jakožto vnější veličinu zkoumaného přístroje s neznámou vnitřní strukturou, je možno definovat jako odchylku z vymezeného intervalu požadovaných vlastností. Ne vždy znamená porucha úplnou nefunkčnost. Pokud tedy chceme zjistit jestli zařízení pracuje správně, je nutné znát nějakou vlastnost (ať už naměřenou nebo teoretickou) tohoto zařízení. Toto zařízení pak prohlásíme etalonem a budeme s ním porovnávat zařízení stejného druhu a zkoumat jestli porovnávaná vlastnost je v rozmezí námi zvolených tolerancí od vlastnosti etalonu. Tímto způsobem lze jednoznačně určit vadné a funkční zařízení, blok nebo součástku. U solárních článků je diagnostika mnohem komplikovanější. Je to dáno především velkým množstvím defektů a vad.

2.2.2 Poruchy solárních článků

V zásadě se dají poruchy solárních článků rozdělit do dvou částí:

Materiálové defekty

Vznikají již při výrobě samotného křemíku použitého na výrobu solárních článků. Nejrozšířenějším z pohledu studia defektů a také mezi nejzajímavější lze zařadit tzv. vírový defekt, který je způsoben injekcí příměsí do křemíku. Charakteristickým rysem tohoto defektu jsou oblasti generující nižší fotoelektrický proud, které jsou uspořádané do soustředných kružnic.

Procesní defekty

Procesní defekty vznikají při technologickém zpracování křemíku na solární článek a dělíme je do dvou základních skupin: na mechanické poškození a na nehomogenitu difúzní vrstvy.

2.2.3 Metody používané k popisu solárních krystalických článků

LBIC (Light Beam Induced Current)

Metodou LBIC lze určit plošné rozložení fotoproudu na solárním krystalickém článku. Spektrum světelného zdroje zapříčiňuje různou hloubku vniku světelného záření, která ovlivňuje velikost fotoproudu. Jednou z možností zvyšování účinnosti solárního článku je odhalování defektů a v neposlední řadě jejich předcházení. K odhalení těchto defektů a k určení jejich prostorového rozložení na ploše solárního článku slouží právě metoda LBIC.

EBIC (Electron Beam Induced Current)

Pomocí této metody je možné měřit elektrické parametry solárního článku. Mezi tyto parametry patří: doba života nosičů, rychlost rekombinace, šířka depletiční vrstvy a difúzní délka.

Šumová charakteristika

Tato metoda je založena na generování šumu pomocí stejnosměrného elektrického proudu přivedeného na měřený vzorek. Takto vytvořený šum je pak závislý na velikosti protékajícího elektrického proudu a na materiálových vlastnostech měřeného vzorku. Hodnota spektrálního napěťového šumu nám poté slouží k vytvoření požadovaných charakteristik.

2.2.4 Měření solárních článků

Každý vyrobený solární (fotovoltaický) článek prochází podrobným měřením. Elektrické parametry se měří při intenzitě osvětlení 1000 W/m², při spektrálním složení světla odpovídající slunečnímu spektru (AM 1.5 Global) a při teplotě 25°C. Základní sledovaný parametr je proud I₄₅₀, podle kterého se rozdělují články do základních skupin. Kromě základního parametru I₄₅₀ měříme na solárním článku další elektrické parametry:

I₄₅₀-Proud tekoucí článkem při napětí 450 mV.

I_{sc}-Zkratový proud, tekoucí fotovoltaickým článkem při napětí 0 V. Tento parametr lze na solárním článku změřit pouze speciálním přístrojem. Běžným ampérmetrem mívají vnitřní odpor kolem 100 miliohmů a napětí na článku při měření takovým ampérmetrem může být kolem 300 mV.

U_{oc}-Napětí na solárním článku naprázdno, bez zátěže.

P_m-Maximální výkon, který může článek dodávat. Bod maximálního výkonu solárního článku je na charakteristice zhruba uprostřed ohybu. Zařízení, odebírající energii ze solárních článků, by mělo zatěžovat fotovoltaický článek takovým způsobem, aby článek pracoval právě v okolí bodu maximálního výkonu. Jen tak může fotovoltaický článek využít sluneční energii optimálně.

I_m-Proud, při kterém solární článek dodává maximální výkon.

U_m-Napětí, při kterém solární článek dodává maximální výkon.

FF-Fill Factor. Parametr se zjišťuje výpočtem podle tohoto vzorce:

$$FF = (I_m \times U_m) / (U_{oc} \times I_{sc})$$

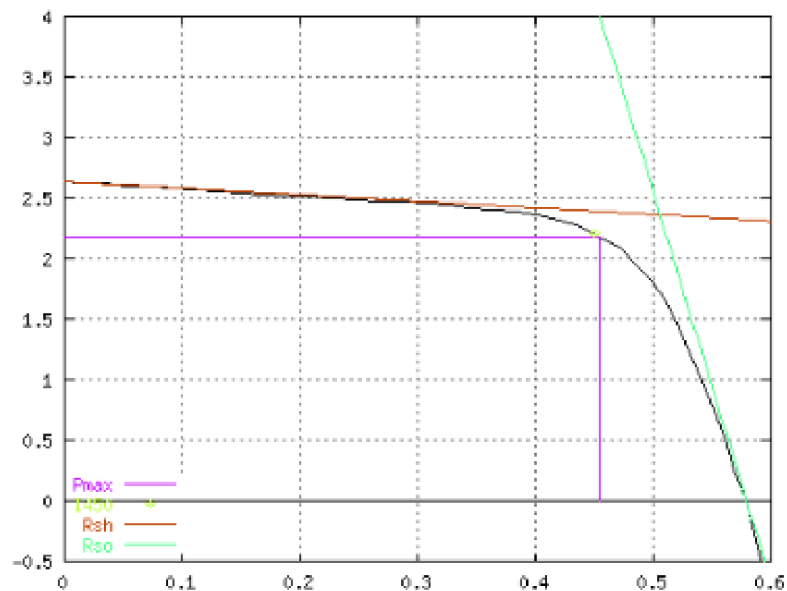
EEF-Účinnost solárního článku. U fotovoltaických článků vyrobených z monokrystalického křemíku bývá kolem patnácti procent.

R_{so}-Sériový odpor solárního článku.

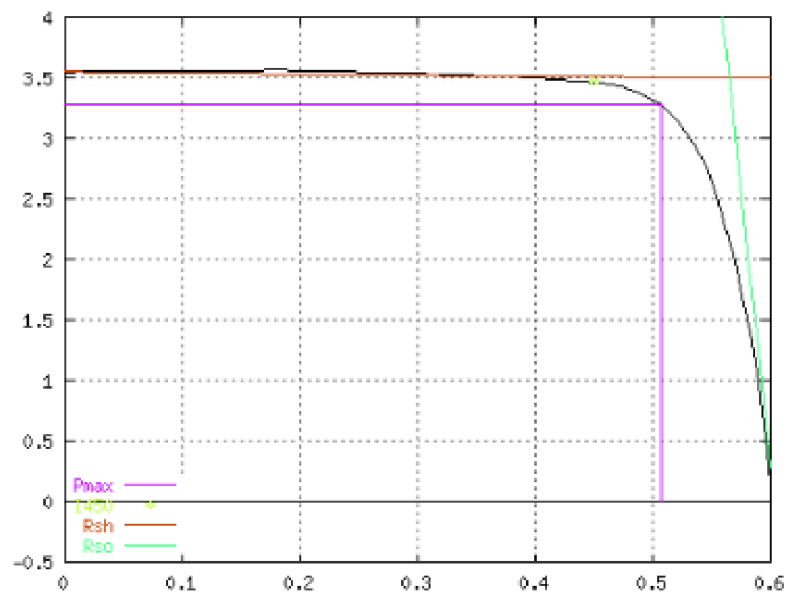
R_{sh}-Paralelní odpor solárního článku.

2.2.5 Ampér-Voltové charakteristiky solárního článku

Článek má příliš nízkou hodnotu R_{sh} - solární článek je vevnitř jakoby zkratován. Žlutý bod na charakteristice je hodnota proudu při napětí 450 mV - sledovaný parametr I_{450} . Sklon charakteristiky (tečny v bodech I_{sc} a U_{oc}) odpovídá parametrům R_{sh} a R_{so} .



Obr. 5 Charakteristika vadného fotovoltaického článku [8]



Obr. 6 Charakteristika kvalitního fotovoltaického článku [8]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 LBIC

3.1.1 Výhody LBIC

Metodou LBIC lze určit plošné rozložení fotoproudu na solárním krystalickém článku. Spektrum světelného zdroje zapříčiňuje různou hloubku vniku světelného záření, která ovlivňuje velikost fotoproudu. Jednou z možností zvyšování účinnosti solárního článku je předcházení a odhalování defektů. K odhalení těchto defektů slouží právě metoda LBIC.

Dosažitelná účinnost solárního článku je daná typem článku a jeho technologií. U každého typu článku však účinnost ještě snižují částečné zkratky v přechodu a lokální změny charakteristik přechodu (fotodiody), které jsou způsobeny nečistotami a strukturálními poruchami v polovodiči. Při použití metody LBIC (Light Beam Induced Current) se povrch solárního článku rastruje zaostřeným světelným svazkem. Pokud je osvětleno místo s poruchou, výstupní proud článku výrazně poklesne. Tímto způsobem lze lokalizovat především zkratky a některé strukturální poruchy. Metoda je nedestruktivní.

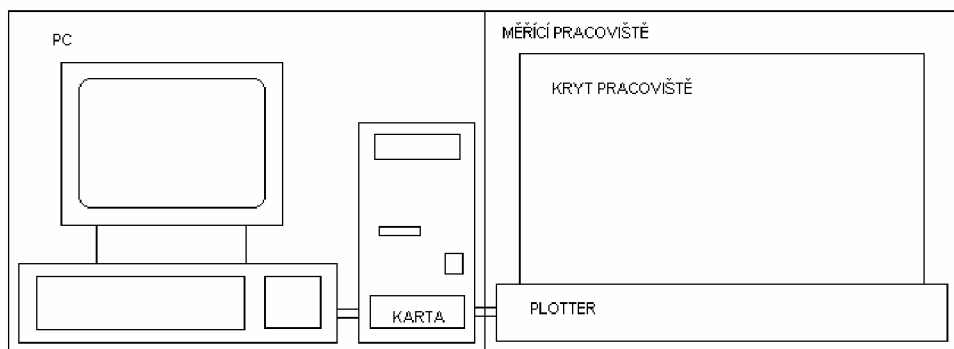
3.1.2 Možnosti metody

V našem případě je k posuvu světelného zdroje použit upravený plotter, připojený pomocí paralelního portu k PC. K měření je použita přídavná karta do PC (Starší verze - Tedia PCA-1208 zapojená do ISA slotu, novější verze - Tedia UDAQ 1416AS zapojená do USB). Na zpracování dat je použito PC se softwarem vytvořeným v programovacím jazyku C++. Světelný svazek je realizován buď laserem a nebo speciálně vytvořeným tubusem s LED diodou připevněným speciálním zařízením k plotteru.

Posun diody lze provádět s maximálním rozlišením 25 μm , protože hardwarové řešení skenovacího zařízení neumožňuje větší rozlišení.

3.1.3 Rozložení pracoviště

V zásadě je nutné mít pracoviště sestavené z následujících bloků: blok sloužící k vytváření záření, zařízení sloužící k posuvu světelného paprsku, měřící zařízení, vyhodnocovací program. Schématické rozložení pracoviště je vidět na obrázku 8.

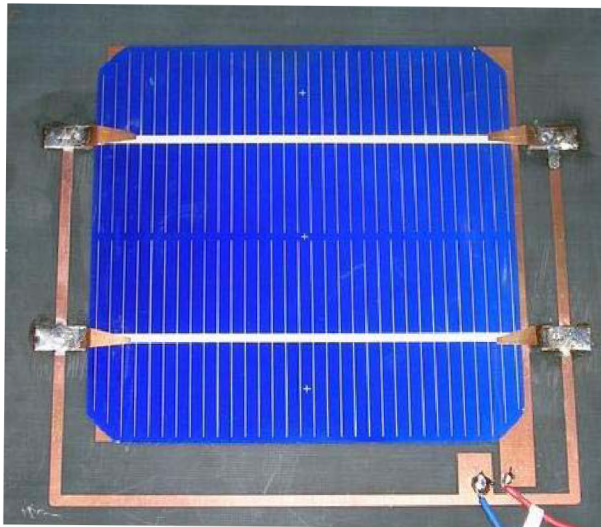


Obr. 7 Rozložení pracoviště

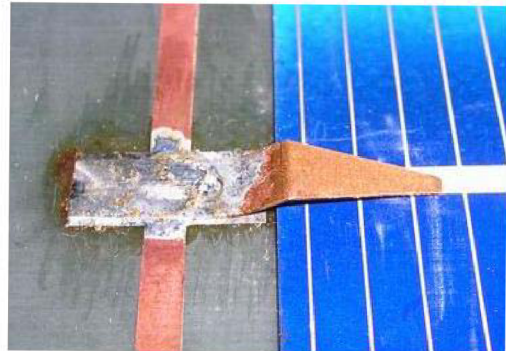
3.1.4 Řešení pohyblivé části

Pro pohyb světelného paprsku byl použit plotter značky Mutoh IP210. Toto zařízení prošlo značnými úpravami. Postupně byly odstraněny nevyhovující a překážející součásti. Bylo vytvořeno speciální zařízení sloužící k upevnění solárního článku na ploše pod pohyblivou hlavou plotteru. Jedná se o desku z materiálu FR4 uzpůsobenou k elektricky dobrému uchycení solárního článku a jeho snadné výměně. Tento systém je vidět na obrázku 8. Dále byla upravena pohyblivá hlava plotteru, na kterou byl upevněn univerzální nastavitelný držák viz. obr. 9.

Měření je nutné provádět bez vlivu denního světla. Z tohoto důvodu byl vytvořen ochranný kryt celého pracoviště. Tento kryt je vytvořen z hliníkového plechu a současně plní funkci elektromagnetického stínění celého měřícího pracoviště. Vnitřní strana tohoto krytu je polepena černou látkou, která zastiňuje případné parazitní sluneční světlo. Celý kryt je vidět na obrázku 10.

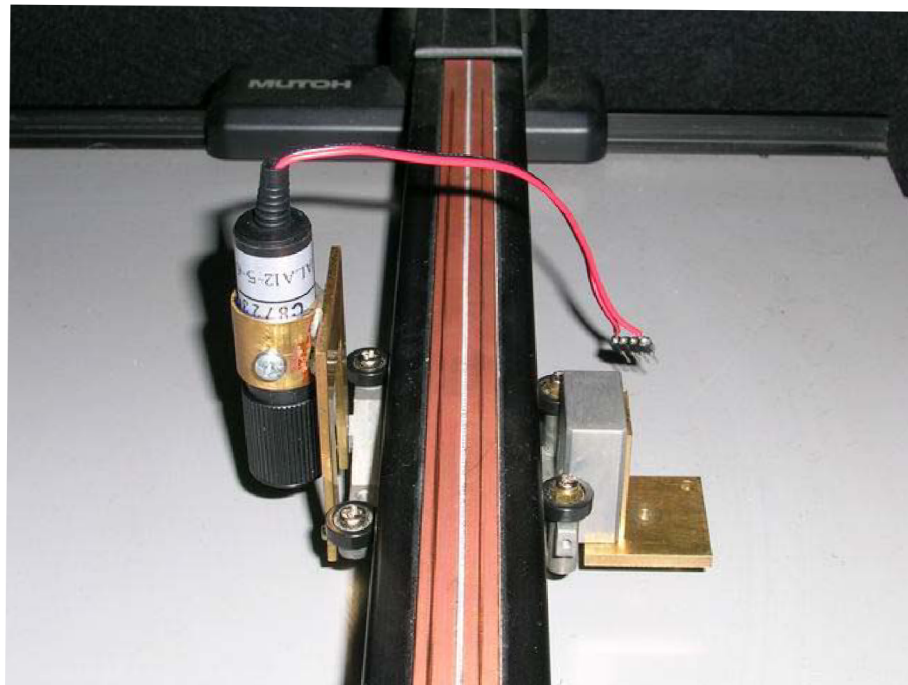


a)



b)

Obr. 8 a) Měřicí deska FR4 se vzorkem a b) detail úchytu solárního článku



Obr. 9 Úprava pohyblivé hlavy plotteru s připevněným laserem



Obr. 10 Celkový pohled na skenovací zařízení s hliníkovým krytem

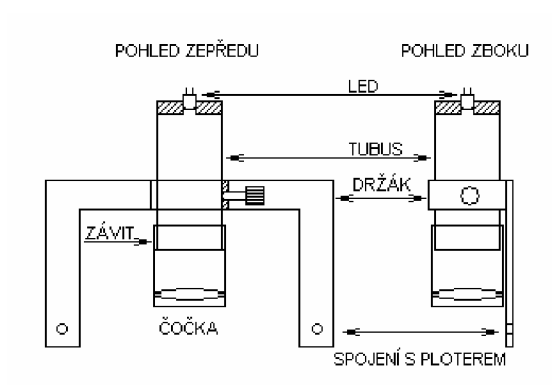
3.1.5 Řešení optické části

Máme dvě možnosti osvětlení solárních článků - buď použijeme klasické nekoherentní záření, jehož zdrojem jsou například LED diody, nebo můžeme použít koherentní záření, jehož zdrojem jsou lasery. Z důvodu malých rozměrů a nižší ceny jsou nejvýhodnější polovodičové lasery.

Výhodou použití LED diod je především jejich cena. Nevýhodou pak potřeba speciálního optického zařízení k usměrnění paprsku. Tento problém byl však vyřešen výrobou tubusu z hliníkové trubičky doplněné optickou částí (Obrázek 11). Horní část tubusu slouží k uchycení LED diody, dolní k zaostření paprsku. Vnitřní stěna tubusu je polepena černou látkou pohlcující odrazy světelného paprsku. Uvnitř se také nachází systém železných, začerněných clonek. Díky pohyblivému dolnímu konci, který obsahuje skleněnou čočku je možné prostřednictvím dotažení nebo povolení závitu paprsek zaostřit. Pro dobré zaostření světelného paprsku je vhodné použít lupu. Čočka je tvořena slepením spojky a rozptylky v jednom kuse. Vzhledem k jednoduchému uchycení LED diod v horní části tubusu je možné diodu snadno vyměnit. To je výhodné zejména při vytvoření světelného paprsku různé barvy. Proto můžeme použít červenou, zelenou nebo modrou LED diodu. Díky využití odlišných

vlnových délek těchto barevných paprsků pak dosáhneme detailnějšího prozkoumání solárního článku.

Při používání laseru je nejvhodnější použít polovodičový laser, který obsahuje v jednom pouzdře jak samotný zdroj záření tak i optickou soustavu na zaostření paprsku (Obrázek 9). Tato varianta je oproti LED diodám dražší, ale díky většímu výkonu a jemnějšího zaostření laserového paprsku je potom výsledný obraz sestavený z naměřených dat mnohem více kontrastní.



Obr. 11 Optický systém pro LED diody

Díky takto navrženému optickému systému je možné měnit různobarevné LED diody v ústí tubusu. Případně lze rovněž vyměnit celý tubus za polovodičový laser. Toto univerzální řešení se v praxi značně osvědčilo. Jako napájecí zdroj pro LED diody a polovodičový laser slouží externí zdroj napětí Aligent E3632A.

3.1.6 Řešení části měření

Měření je provedeno přídavnými kartami do PC (Tedia PCA-1208 a Tedia UDAQ 1416AS viz. Kapitola: Etapy zpracování - Obr. 12). Karty jsou k počítači připojeny přes rozhraní ISA a USB.

Komunikace s kartou je umožněna díky ovladačům dodávaných výrobcem. Karta je připojena na blok, který slouží jako převodník proudu na napětí a zesilovač. Tento blok je připojen kroucenou dvojlinkou přímo k solárnímu článku.

3.2 Etapy zpracování

3.2.1 Nová měřící metoda

Základním krokem při snaze o zvýšení rychlosti měření je prostudování a aplikace nové měřící metody. Stávající měřící metoda spočívala ve skenování článku principem bod po bodu. Pero plotteru se posouvalo o jeden krok, osvítil se zvolený bod a změřila se hodnota napětí na solárním článku. Hodnota napětí se následně zaznamenala do paměti. Tato metoda byla přínosná v tom, že jednoduše určovala polohu bodu. Tak bylo přiřazení změřeného napětí k tomuto bodu jednoznačné. Nevýhodou této metody byla dlouhá doba skenování solárního článku. Příčina spočívala v neustálém zastavování a následném rozbíhání pera plotteru. Tímto principem se výsledný čas potřebný k přejetí plotteru o několik tisíc pozic značně zvýšil. Pro skenování solárního článku na největší rozlišení bylo toto zpoždění neúnosné. Proto bylo potřeba hledat řešení které by tuto dobu snížilo na přijatelnou mez, přičemž by zároveň zůstala zachována dobrá zobrazovací schopnost a přesnost. Teoreticky jsme navrhly nový přístup k posunu pera u plotteru.

Tato nová metoda spočívá v tom, že plotter se už nebude pohybovat bod po bodu jako u starší metody ale, že se bude posouvat z jedné krajní polohy do druhé. Přitom se nemusí zastavovat a rozjíždět u každého bodu ale jen na začátku a na konci. Měřením bylo zjištěno že tato metoda podstatně sníží dobu potřebnou k měření. Otázka je, jak synchronizovat právě naměřenou hodnotu s reálným bodem na solárním článku. Je totiž nutné přesně vědět který bod jsme proměřili.

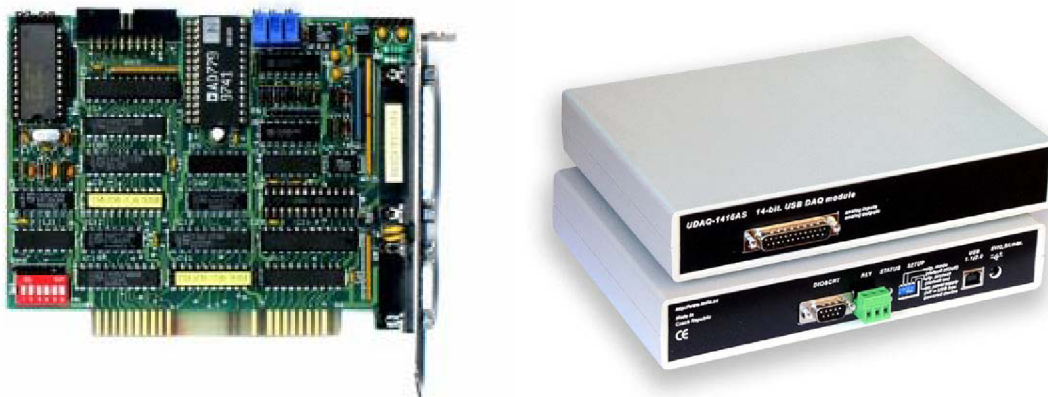
Jako schůdné řešení tohoto teoretického problému se ukázalo možné použití řídicích signálů plotteru. Jsou to především signály, které řídí krokové motorky. Tyto signály bude nutné zpracovat a vyčíst z nich přesnou polohu pera. Experimentálně byly tyto signály měřeny a byly zkoumány jejich průběhy. Existuje několik možností jejich zpracování a následného využití.

Dále tato nová metoda předpokládá jiné využití měřící karty. Jedná se o nastavení režimu takzvaného rychlého měření. U tohoto měření je odlišné ukládání dat do paměti.

3.2.2 Přejít na novější verzi měřící karty

Stávající kartou je Tedia PCA 1208. Tato měřící karta je určena pro slot ISA. Tato skutečnost je nevýhodou, protože novější verze základních desek do PC tento slot již neobsahují a tudíž nelze tuto kartu použít v novějších počítačích. Z tohoto důvodu byla zvolena náhrada za tuto kartu a to karta Tedia UDAQ 1416AS, která se připojuje k počítači přes rozhraní USB. Navíc má UDAQ 1416AS větší rozlišení A/D převodníku oproti starší

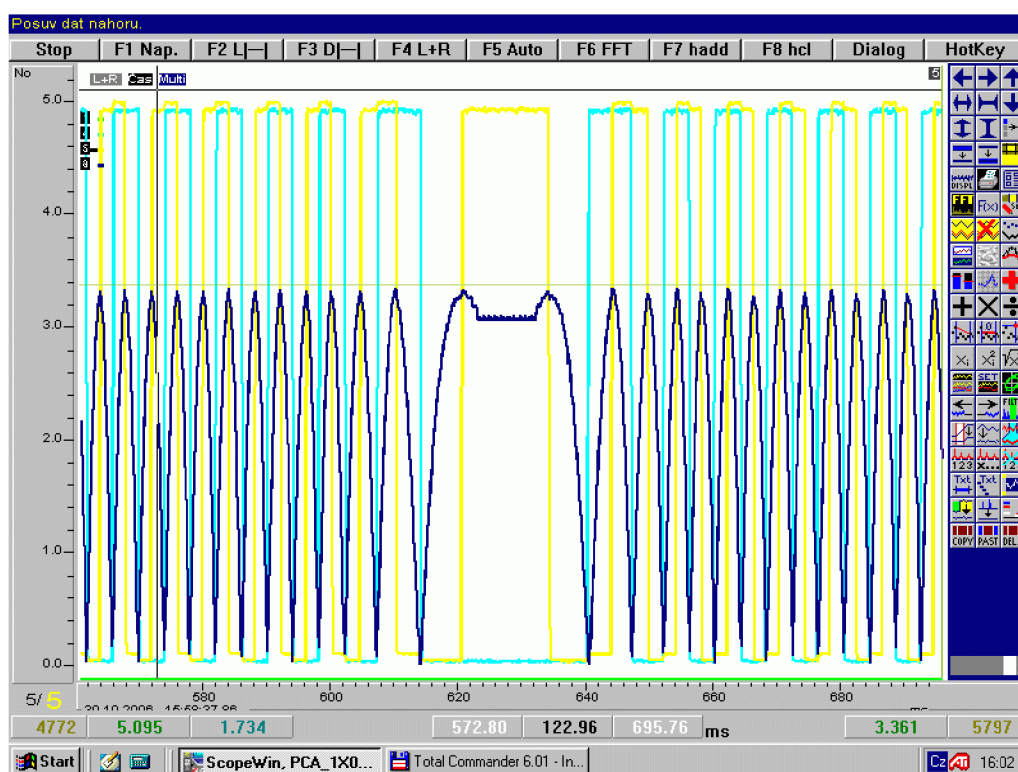
kartě PCA 1208. PCI 1208 měla funkční rozlišení 12bitů, UDAQ 1416AS má funkční rozlišení 14 bitů. S novou měřicí kartou je použita nová knihovna funkcí.



Obr. 12 Vlevo - měřicí karta Tedia PCA-1208, vpravo měřicí karta Tedia UDAQ 1416AS [17]

3.2.3 Signály pro ovládání krokových motorků plotteru

Pro přesné stanovení polohy pera plotteru je nutná znalost signálů ovládajících pohyb krokových motorků. Tyto signály jsou změřeny programem ScopeWin a zobrazeny na obrázku 13. Z obrázku je patrné jak krokový motorek pomocí kombinací těchto signálů dosáhne nejmenšího možného posunu. Při použití rychlého měření je nutné tyto signály zpracovávat současně se signálem nesoucím informace o článku. Dalším úkonem je vyhodnocení všech dat a následné setřídění.



Obr. 13 Signály pro ovládání krokových motorků plotteru

3.2.4 Vytvoření programu pro praktické ověření

Teoreticky jsme našli novou metodu která má zrychlit stávající program. Je nutné zjistit zda tato metoda umožní při stejné kvalitě zobrazení zkrátit dobu potřebnou k měření. V další části práce je podrobně popsána funkce a obsluha programu.

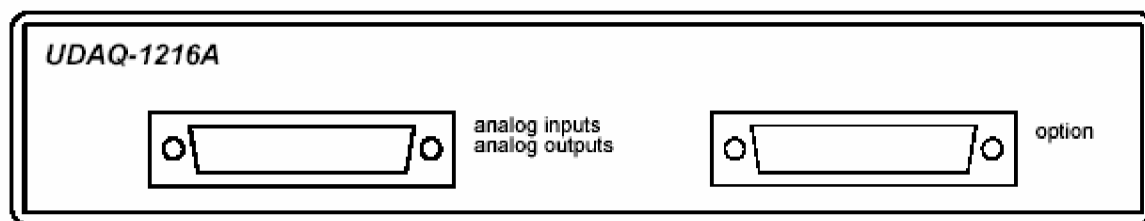
3.3 Tedia UDAQ 1416AS

3.3.1 Instalace modulu

Modul karty je připojen do PC pomocí rozhraní USB. Pomocí tohoto rozhraní je řešeno i napájení modulu. Připojení je možné při vypnutém nebo zapnutém počítači. Systém rozpozná nový hardware a vyžádá si instalaci ovladače, tím se nainstaluje tzv. low-level driver. Další instalace je nutná spuštěním průvodce který nainstaluje tzv. high-level driver.

3.3.2 Rozmístění a zapojení konektorů

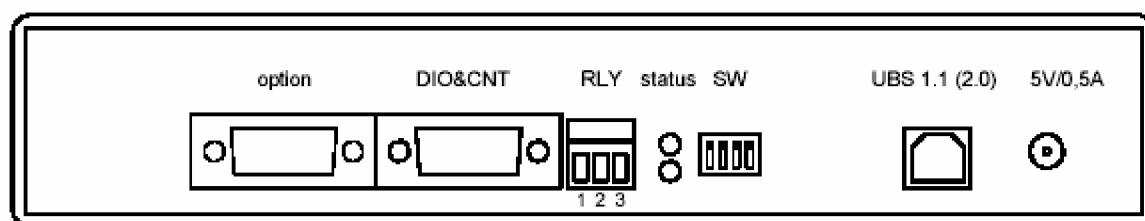
Přední panel obsahuje konektor Cannon 25 se signály analogových vstupů a výstupů. Zapojení je uvedeno na Obr. 14. Místo označené “option“ je rezervované pro konektor rozšiřujících desek. [17]



Obr. 14 Přední panel s rozmístěním prvků [17]

Zadní panel je na Obr 15. a obsahuje následující konektory, LED a spínače .

option	místo rezervované pro konektor rozšiřujících desek
DIO&CNT	konektor digitální vstupy, vstupy pro čítač.
RLY	svorka pro relé
USB	konektor pro připojení USB rozhraní (slouží i k napájení modulu)
status	LED signalizující stav modulu (horní zelená, dolní žlutá)
SW	DIP spínač



Obr. 15 Zadní panel s rozmístěním prvků [17]

3.3.3 Signály důležité pro měření

Pro naše měření je důležitý konektor Cannon 25. Pro připojení je nutné znát význam jednotlivých pinů. Funkce a jejich přiřazení jsou přehledně zobrazeny v následující tabulce Tab. 1. [17]

<i>funkce</i>	<i>PIN</i>	<i>PIN</i>	<i>funkce</i>
---	C1		
GND	C2	C14	---
AOUT1	C3	C15	GND
---	C4	C16	AOUT0
AIN15	C5	C17	---
AIN14	C6	C18	AIN7
AIN13	C7	C19	AIN6
AIN12	C8	C20	AIN5
AIN11	C9	C21	AIN4
AIN10	C10	C22	AIN3
AIN9	C11	C23	AIN2
AIN8	C12	C24	AIN1
GND	C13	C25	AIN0

Tab. 1 Zapojení signálů na konektoru Cannon 25 [17]

3.3.4 *Knihovna TEDIA_DAQ01*

Jedná se o knihovnu, jenž v sobě obsahuje funkce, nutné pro řízení měřicí karty. S využitím těchto funkcí jsme schopni kartu obsluhovat jednodušeji než přímým přístupem do paměťových registrů. Výrobce k této knihovně poskytuje dosti podrobný manuál, díky němuž je možné se s jednotlivými funkcemi a postupy seznámit. Pro správnou funkci této verze knihovny je nutné do měřicího modulu UDAQ 1416AS nahrát novou verzi firmwaru.

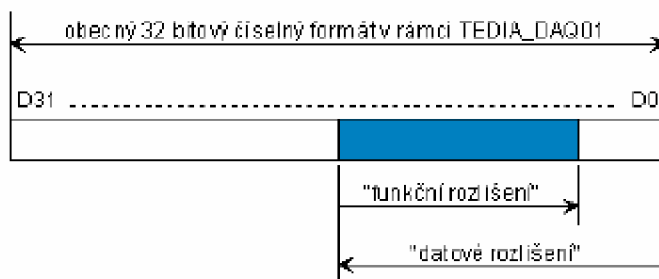
3.3.5 *Číselné formáty*

Všechna data jsou přenášena v 32 bitovém DWORD formátu. Rozložení 32 bitů je znázorněno na obrázku Obr.16. Informace je přenášena v části označené “function resolution“, nevyužité bity jsou vždy nulové. Formát DWORD se používá i jako typ proměnných pro práci s funkcemi knihovny TEDIA_DAQ01, avšak některé parametry funkcí tento formát přímo nevyžadují.

3.3.6 *Číselné kódy*

Přenos dat je uskutečněn v binárním kódu. Uvádím zde příklad pro datové rozlišení A/D převodníku rovné 16 bitům. Funkční rozlišení je však 14 bitů. Přičemž jeden bit určuje

znaménko proto dostáváme na hodnotu čísla jen 13 bitů. Vše je zřetelně vidět v tabulce 2. Příklad je uveden pro vstupní rozlišení +/- 10V [17]



Obr. 16 Schéma rozložení bitů v DWORD formátu [17]

Z pohledu do tabulky Tab. 2 je zřejmé, jak je proveden převod jednotlivých bitů na výsledné číslo. Maximum není reprezentováno +10 V, ale hodnotou +9,99888V. Tato drobná nepřesnost je způsobena nutností zobrazovat nulu. Provedeme-li všechny kombinace bitů u funkčního rozlišení bez znaménkového bitu dostaneme číslo 8192. To je maximální možný výsledek. A proto když si rozsah +/- 10V rozdělíme na jednotlivé úseky po 0,00122V je možné jednoduše převést binární číslo na zobrazení desetinného čísla. [17]

Hodnota veličiny	Vstupní napětí	Přímý kód (binární formát)
minimum	-10.000 V	0 ... 0 0000 0000 0000 0000 b
minimum + 1 LSB	-9.99888 V	0 ... 0 0000 0000 0000 0100 b
minimum + 2 LSB	-9.99756 V	0 ... 0 0000 0000 0000 1000 b
střed - 2 LSB	-0.00244 V	0 ... 0 0111 1111 1111 0100 b
střed - 1 LSB	-0.00122 V	0 ... 0 0111 1111 1111 1000 b
střed	0.00000 V	0 ... 0 0111 1111 1111 1100 b
střed + 1 LSB	+0.00122 V	0 ... 0 1000 0000 0000 0000 b
střed + 2 LSB	+0.00244 V	0 ... 0 1000 0000 0000 0100 b
maximum - 1 LSB	+9.99756 V	0 ... 0 1111 1111 1111 1000 b
maximum	+9.99888 V	0 ... 0 1111 1111 1111 1100 b

Tab. 2 Zobrazení datového a funkčního rozlišení [17]

3.4 Program

3.4.1 Provedení

Program je psán v jazyce C++. Jako vývojové prostředí je využit program C++Builder 6 od firmy Borland. Toto prostředí je výhodné pro vytváření programů pro operační systém Windows, neboť usnadňuje návrh aplikací a práci s okny.

3.4.2 Zavedení knihovny TEDIA_DAQ01

Pro využívání knihovny TEDIA_DAQ01 je nutné zavést do programu hlavičkové soubory:

```
tedia_daq01h_d.h  
tedia_daq01h_c.h  
tedia_daq01_c.h
```

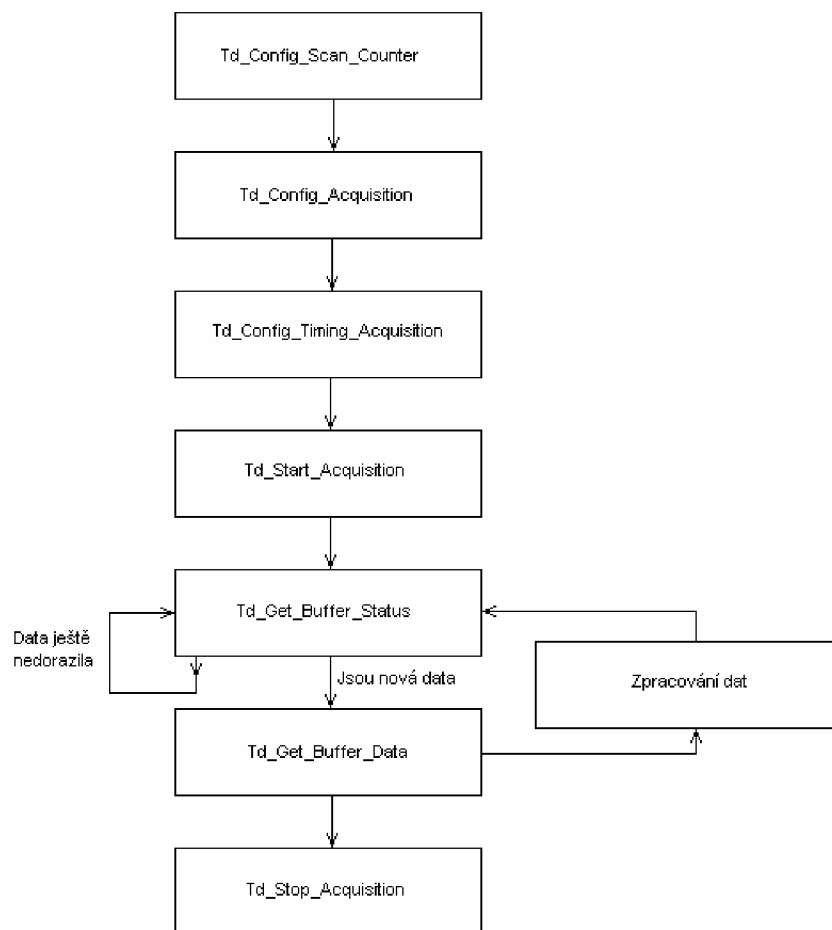
3.4.3 Použité funkce z knihovny TEDIA_DAQ01

```
Td_Init_Driver  
Td_Close_Driver  
Td_Config_Acquisition  
Td_Config_Timing_Acquisition  
Td_Start_Acquisition  
Td_Get_Buffer_Status  
Td_Get_Buffer_Data  
Td_Stop_Acquisition
```

3.4.4 Ukázka formátu funkce Td_Start_Acquisition

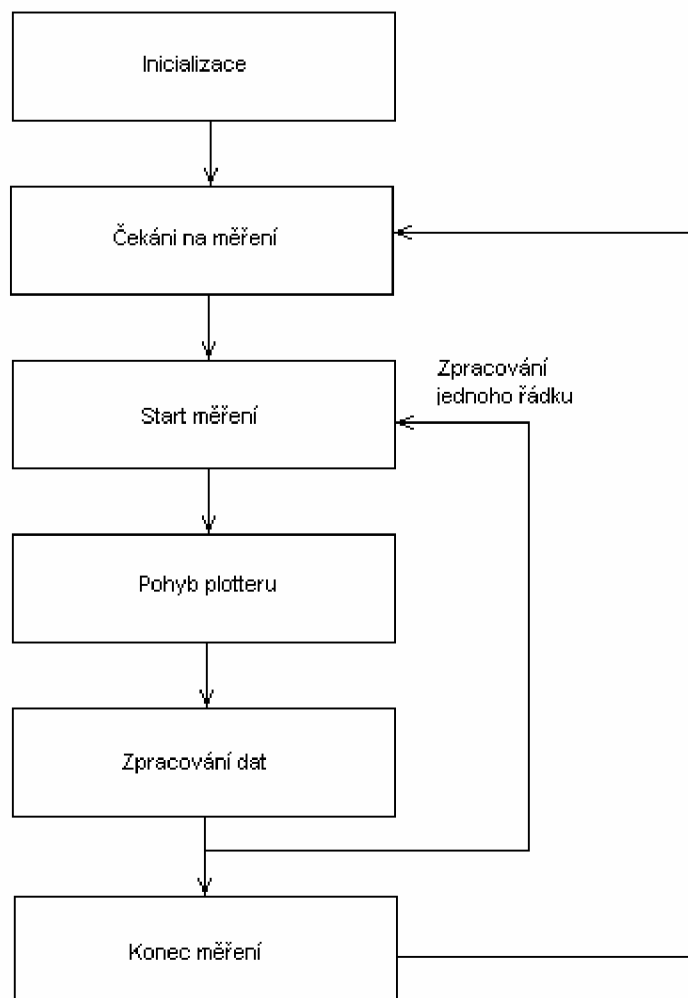
Prototyp	Td_Start_Acquisition(Handle_handle,DWORD mode)	
Popis	Odstartuje blokové měření podle parametrů, po této funkci by měla následovat skupina funkcí pro odebírání dat	
Podpora	Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat	
Argumenty	handle	Handle otevřeného zařízení
	mode	Režim ve kterém zařízení bude pracovat
		1: zařízení pracuje se softwarovým spouštěním
		2: zařízení pracuje se spouštěním časovačem
		3: zařízení pracuje se spouštěním externím signálem

3.4.5 Vývojový diagram pro blokové měření



Obr. 17 Vývojový diagram pro blokové měření

3.4.6 Vývojový diagram celého programu



Obr. 18 Vývojový diagram pro celý program

3.4.7 Filosofie rychlého měření

Pro takzvané rychlé měření je nutné nastavit vzorkovací frekvenci a počet vzorků. Samotné měření tedy probíhá tak dlouho dokud nejsou odměřeny všechny vzorky. Pro správnou funkci celé procedury je nutné dodržet postup udávaný výrobcem měřicí karty. Jedná se hlavně o správné nastavení měření pomocí funkcí z knihovny TEDIA_DAQ01. Jedná se především o funkce: Td_Config_Acquisition a Td_Config_Timing_Acquisition.

Posléze může být měření spuštěno funkcí: Td_Start_Acquisition. Nyní je potřeba vyzvednout naměřená data a to pomocí funkce Td_Get_Buffer_Status, která testuje zda je možné data vyzvednout. To se děje funkcí: Td_Get_Buffer_Data, která naměřená data ukládá přímo do paměti. Po odměření je nutné měření ukončit funkcí: Td_Stop_Acquisition.

3.4.8 Princip funkce programu

Prvním blokem je inicializace proměnných. V tomto bloku probíhá inicializace proměnných pro plotter, proměnný pro měření a pomocných proměnných. Po inicializaci je program ve stavu čekání na měření, kdy po stisku tlačítka následuje další blok: Start měření a následně Pohyb plotteru. Po odměření jednoho řádku následuje blok: Zpracování dat, kde jsou data převedena do číselného formátu a uložena do paměti. Po ukončení měření je program opět ve stavu čekání na měření.

3.4.9 Ukázka části programu

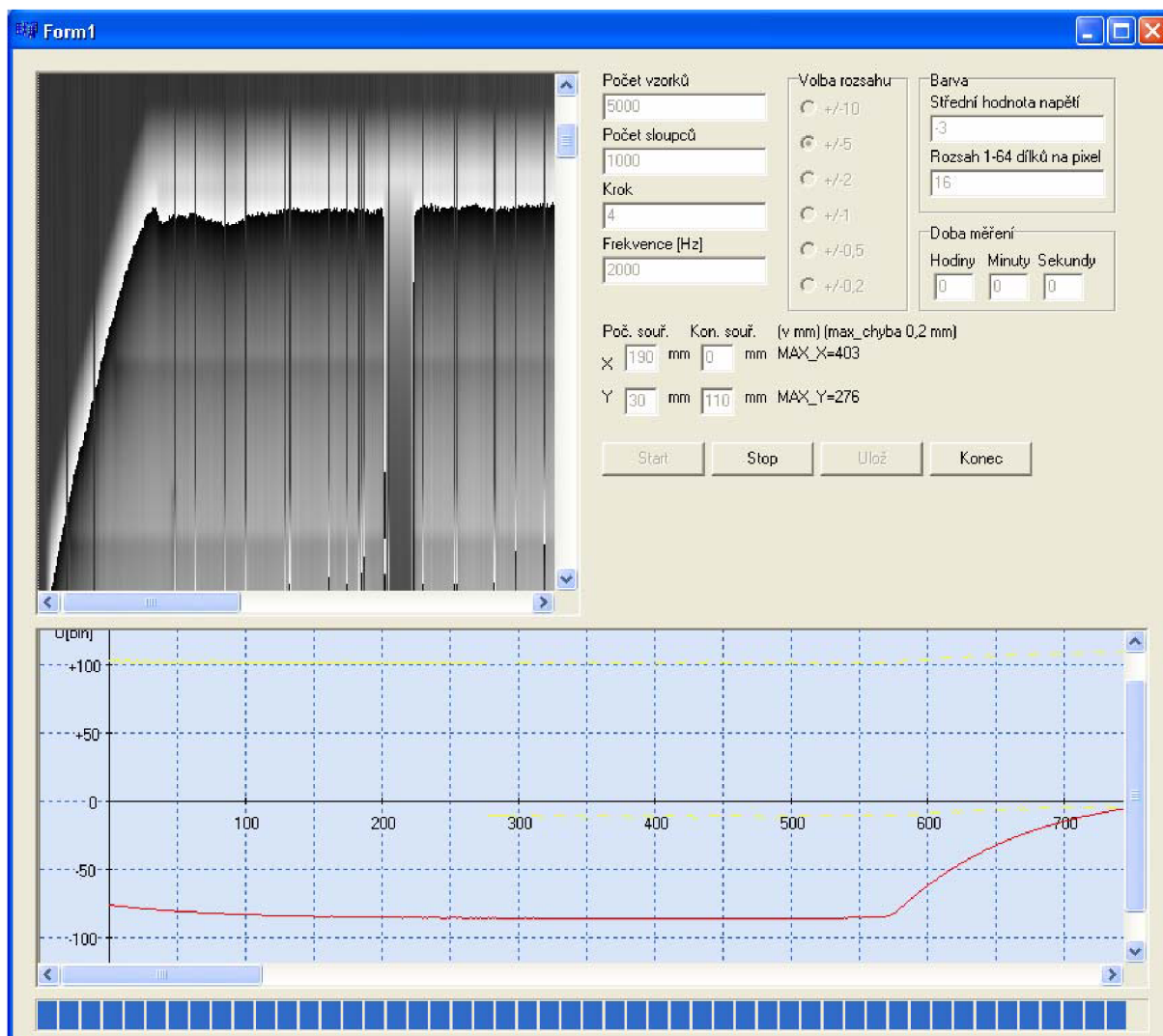
V této ukázce je prakticky vidět využití funkcí z knihovny TEDIA_DAQ01. Uvádím zde část programu kde se věnuji zpracování dat získaných měřeními. Program je vyčleněn z konceptu a tudíž zde chybí deklarace proměnných a další důležité věci. Tato ukázka má za úkol pouze nastínit práci s funkcemi z knihovny TEDIA_DAQ01.

```
while(index<size) //opakuj dokud nebude ucinen pocet mereni
{
    Td_Get_Buffer_Status(PHandleKarty,&pocet_odmerenych_kanal);
    Edit17->Text=AnsiString(pocet_odmerenych_kanal);
    if(pocet_odmerenych_kanal>pocet_kanal)
    {
        //precteme jednu sekvenci
        Td_Get_Buffer_Data(PHandleKarty, Data ,pocet_kanal, &pocet_zaznamenanych_kanal);
        for(i=0; i<pocet_kanal; i++)
        {
            Data_dohromady[i+pocet_kanal*index]=ipom;
        }
        index++;
    }
}
```

Kompletní program je dodán v příloze.

3.4.10 Podrobný popis uživatelského prostředí pro rychlou metodu LBIC

Aplikace je vytvořena jako standardní okno pro prostředí windows viz. Obr. 19. Základní rozdělení okna je na tři části. První část je náhled na solární článek. Druhá část je tvořena několika poli pro zadávání údajů potřebných k měření. A poslední část je graf.



Obr. 19 Prostředí programu

Náhled na solární článek je možné posouvat avšak při větším množství dat dochází k horší odezvě a pomalejšímu vykreslování.

Uživatel může volit následující parametry měření:

Počet vzorků – Jedná se o počet vzorků na jeden sloupec. Tímto parametrem lze volit rozlišení ve vertikálním směru.

Počet sloupců – Určuje kolik sloupců se má změřit. Tento parametr nastavuje rozlišení v horizontálním směru. A souvisí s následujícím parametrem: Krok.

Krok – Udává mezeru mezi sloupci. Jednotkou je 1 mils.

Frekvence – Udává vzorkovací frekvenci měření. Zadává se v Hz.

Volba rozsahu – Slouží pro nastavení optimálního napěťového rozsahu pro měřící kartu.

Barva – V tomto bloku je možné zadat dva parametry. První: Střední hodnota napětí udává napěťový střed od kterého se na obě strany určí rozsah pomocí druhého parametru: Rozsah. Rozsah může být číslo 1-64, přičemž 1 znamená 2^1 a 64 je 2^{64} .

Doba měření – Zde je zobrazen celkový čas měření.

Počáteční a koncové souřadnice – Zde se zadávají počáteční souřadnice X a Y výchozí polohy plotteru a koncové souřadnice. Koncová souřadnice X je vždy 0 zadává se pouze posun ve směru osy Y. Pohyb nad solárním článkem je ovlivněn položkou Krok.

Tlačítko Start – Pokud jsou všechny parametry správně nastaveny tlačítko Start spustí skenování.

Tlačítko Stop – Slouží pro přerušení skenování

Tlačítko Ulož – Toto tlačítko je možné použít až po skončení měření. Po stisknutí je uživatel postupně vyzván k zadání názvů 3 souborů. První typ souboru je datový, druhý textový a třetí je bitmapa. Při větších objemech dat je možná delší doba ukládání, proto je nutné vyčkat.

Tlačítko Konec – Tímto tlačítkem se program ukončí.

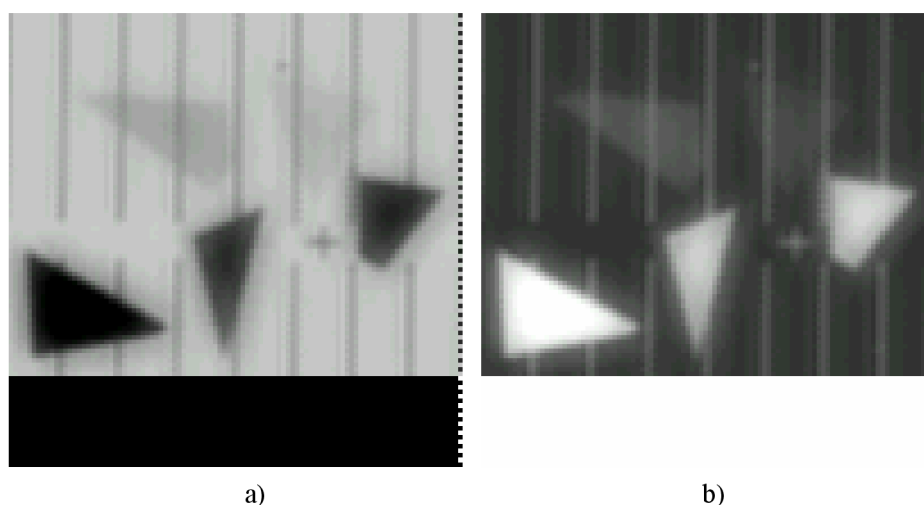
V grafu je zobrazen vždy náhled na právě skenovaný sloupec. Žlutá křivka ukazuje signál krokového motorku, červená křivka průběh proudu solárním článkem převedeného na napětí.

3.5 Praktické měření

3.5.1 První naměřená data – pomalá metoda LBIC

První naměřená data se vyznačovala velmi omezenou vypovídající hodnotou. To bylo zapříčiněno nepoužitím zesilovače. Proto byly naměřeny malé hodnoty napětí. Dále nebylo vytvořeno dostatečné zastínění pracoviště od okolního osvětlení. V dalším průběhu byly tyto nedostatky odstraněny. Díky drobné úpravě programu bylo docíleno uspokojivých výsledků. Následuje ukázka prvních naměřených dat solárního článku, na jehož povrchu byly rozloženy nastříhané trojúhelníčky z různých materiálů (1x začerněný papír, 2x xeroxový papír 80g a 2x fólie o různých tloušťkách). Použité vzorky byly voleny záměrně každý s jinou průsvitností. Díky tomu jsme mohli simulovat poruchy s různou intenzitou. Například použití černého papíru nahrazovalo velký defekt, naopak použití fólie nám umožnilo modelovat menší vadu, protože tato fólie měla jistou propustnost světelného paprsku. Dále bylo zjištěno, že dva vzorky z jednoho materiálu (stejná průsvitnost) vykazovali i stejnou hodnotu naměřeného proudu.

Díky možnostem programu je možné vytvořit náhled i jako negativ, což je znázorněno na obrázku 20 a) a 20 b).



Obr. 20 První naměřená data

Tyto obrázky zobrazují jen část plochy solárního článku o velikost 25x20mm. Obrázky jsou pořízeny s rozlišením 100x80 bodů tedy s velikostí kroku 250 μ m.

Trojúhelníky z papíru a alobalu jsou bílé, takže oba materiály zcela zabránily průniku světla. Další dva trojúhelníky sice umožňují průchod světla, ale po průchodu je intenzita

světla snížena. Tento úbytek intenzity se projevuje snížením účinnosti solárního článku v daném bodě.

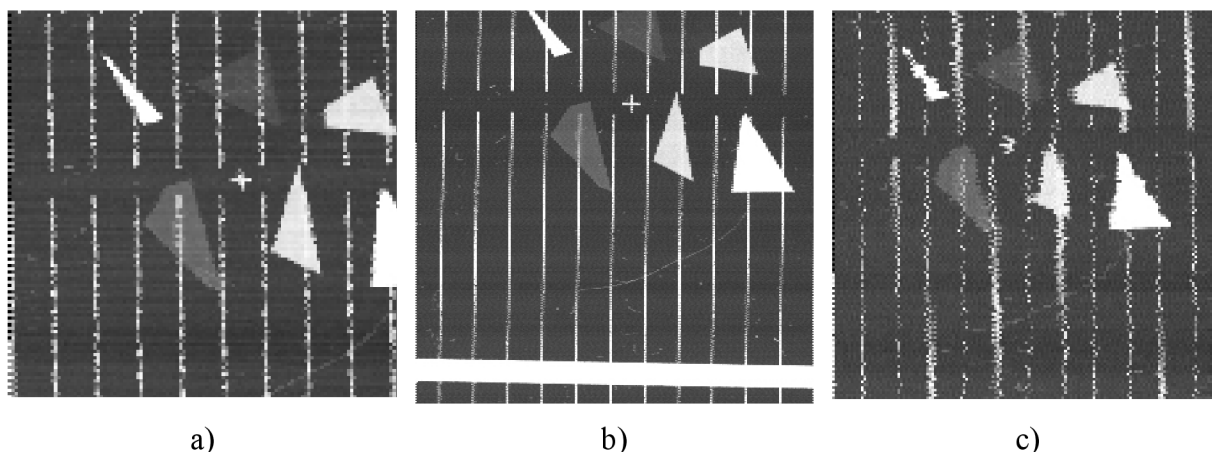
Obrázek se jeví jako rozmazaný, jinými slovy je zde možno pozorovat stíny jednotlivých přechodů oblastí s různou účinností. Je to způsobeno nedokonalým zaostřením dopadajícího světelného paprsku, kdy je průměr stopy tohoto dopadajícího paprsku větší, než je vzdálenost dvou sousedních měřených bodů.

V tomto rozlišení 100x80 bodů bylo potřeba proměřit 8000 bodů. Na proměření každého bodu byl potřeba čas kolem 150ms. Takto nám vyšel celkový čas měření přibližně 20 minut, což je neúměrně dlouhá doba. Museli jsme tuto dobu snížit.

3.5.2 Doba měření

Největším problémem byla doba měření. V předchozím případě jsme změřili jen část solárního článku (100x80 bodů). Ale kdybychom chtěli změřit stejným programem celý solární článek (10x10 cm), tak při kroku 100 μ m bychom dostali milión měření. A v případě doby trvání jednoho měření 150ms bychom měřili celý solární článek asi 42 hodin. Proto bylo nutné provést inovaci stávajícího měření. Jelikož jsme byli omezeni rychlostí posunu plotteru nezbývala jiná možnost než odladit zpoždění softwarově. Zpoždění bylo zaviněno především přebytečnými daty posílanými do plotteru. Například zbytečná inicializace po každém kroku nebo zvednutí a následné položení „pera“ mezi jednotlivými kroky. Tyto nedostatky byly programově odstraněny a bylo docíleno zpoždění asi 35ms. Tímto jsme dosáhli značného zrychlení.

Dalšího zrychlení bylo dosaženo tím, že docházelo k měření již v průběhu přesunu LED z jednoho bodu na druhý a ne pouze k měření v daném bodě. Tato alternativa k metodě pomalého skenování by teoreticky umožnila získat obrázek s mnohem větším rozlišením a to za stejný čas měření jako s původní metodou. Ukázalo se, že s touto novou metodou lze zrychlit měření, ale za cenu značného snížení kvality obrázku. Pokud bychom chtěli kvalitu zachovat, čas skenování by byl obdobný nebo i delší než u původní metody. Některé z pokusů si můžeme prohlédnout na obr. 21, kde jsme měnili velikost kroku a počet měření během tohoto kroku.

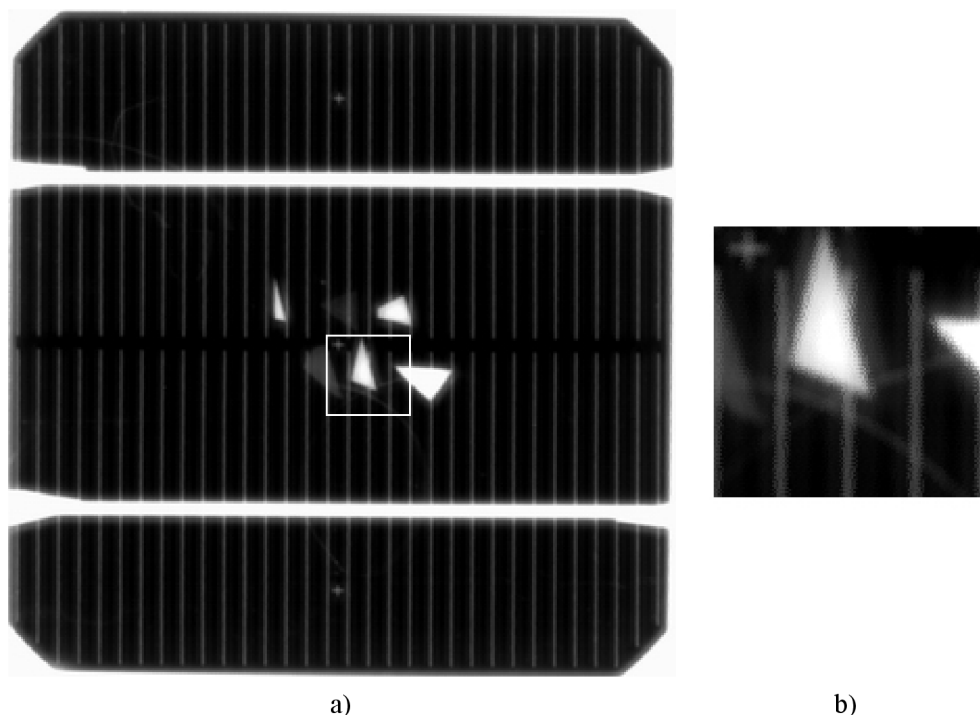


Obr. 21 Sken části solárního článku o rozměrech 3,75x3,75cm a) krok ve směru osy x i y je 250µm, měření během přesunu není, čas měření 15minut b) krok ve směru osy x je 250µm a ve směru osy y je 125µm, 1 měření během přesunu, čas 37min c) krok ve směru osy x je 1250µm a ve směru osy y je 250µm, 4 měření během přesunu, čas 4min

Můžeme si všimnout, že je kvalita obrázku 21b) (alternativa k pomalé metodě) oproti 21a) (původní metoda) lepší. Je to způsobeno větším rozlišením obrázku na který bylo třeba i více času. Na druhou stranu, pokud porovnáme obrázek 21a) (původní metoda) s obrázkem 21c) (alternativa k pomalé metodě), je sice kvalita získaného obrázku pomocí nové metody nižší, i když je rozlišení obou obrázků stejné, ale čas měření je oproti původní metodě téměř 4x kratší. Těmito pokusy jsme vyčerpali možnosti pomalého skenování LBIC a další cestou v pokroku byla metoda rychlého testování. Z touto metodou jsme schopni neskenovat solární článek v rozlišení 5000vzorků vertikálně na 1000 sloupců za hodinu a půl a 5000vzorků vertikálně na 4200 sloupců za 6 hodin a 20 minut. Tímto jsme docílili snížení celkového času.

3.5.3 Kontrast naměřených dat

Naměřená data pomalou metodou vykazují podstatně lepší vlastnosti, než data z metody rychlého měření. V následujících obrázcích jsou vidět možnosti docílení nejlepšího kontrastu. Pro lepší kontrast je vhodné použít pomalou metodu skenování.

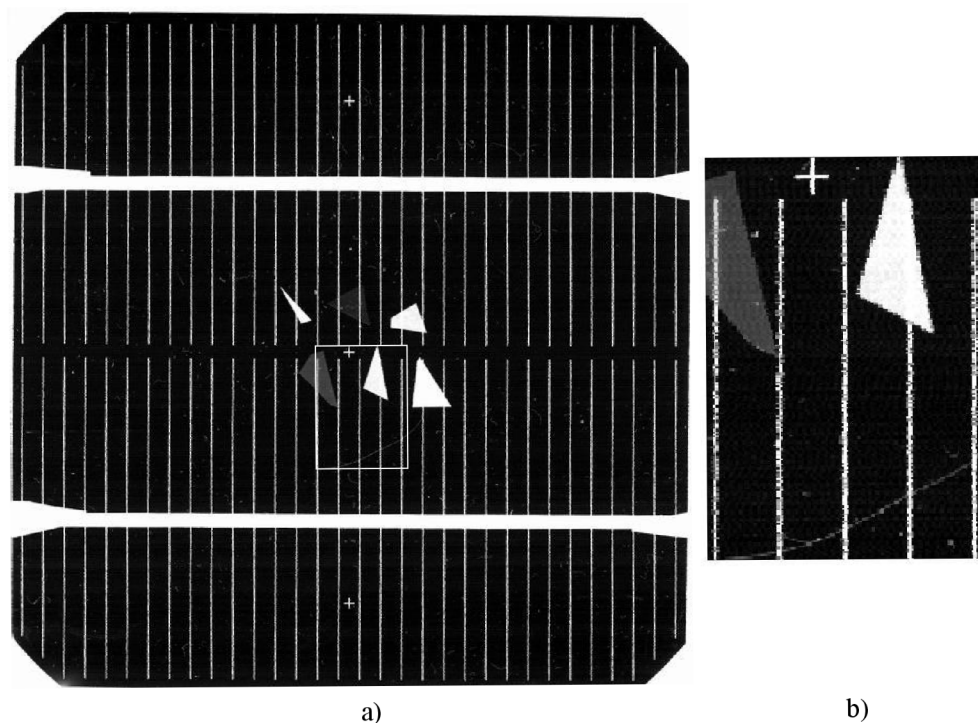


Obr. 22 a) Sken solárního článku červenou LED a b) jeho detail (krok 100 μm)

Z obrázku je patrné jemné snížení rozmazání oproti předchozímu měření. V detailu obrázku, těsně pod prostředním trojúhelníkem, si můžeme všimnout dvě čárky křížující přední kontakty (prsty). Ty jsou způsobeny úmyslně vloženými vlasy, které nám poskytují informace o schopnosti zachytit malé předměty (vložený vlas má průměr v rozmezí 18-180 μm [11]).

Obrázek 22 představuje vrchol kontrastu dosaženého pomocí LED diod. Větší zaostření LED diod je technicky dost náročné.

Proto pro potřebu ostřejšího zobrazení jsme použili laser. K dispozici máme laser červené barvy s vlnovou délkou 650nm. Pro porovnání jsme provedli měření, které můžeme vidět na obr. 23.

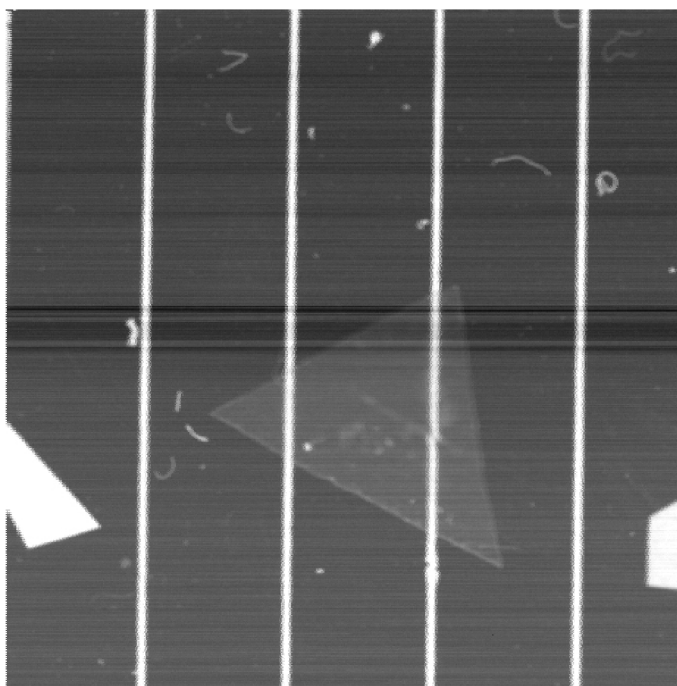


Obr. 23 a) Sken solárního článku červeným laserem a b) jeho detail (krok 100 μm)

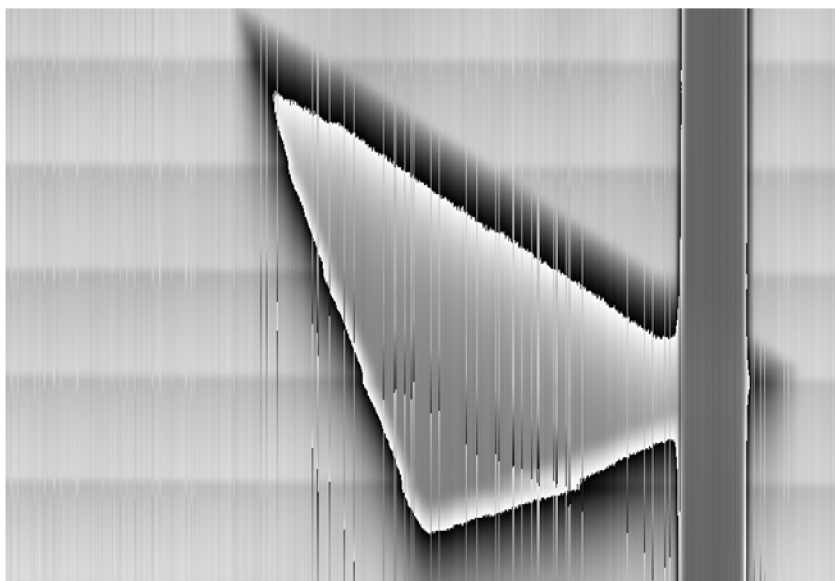
Pořízený sken solárního článku je ve stejném rozlišení jako sken na obr. 22. Pouhým okem lze velmi dobře rozeznat jeho zvýšenou ostrost.

Použití laseru nám umožňuje provést měření s největším možným rozlišením, tedy s krokem o velikosti 25 μm . Pokud bychom měřili s tímto rozlišením celý článek, muselo by se proměřit 4000x4000 (16milionů) bodů a čas měření by byl neuvěřitelných 150 hodin. Tato doba je příliš dlouhá, proto se přistoupilo k proměření jen malé části článku o rozměrech 15x15 mm, což nám vytvořilo obrázek o velikosti 600x600 bodů (obr.24).

Oproti tomu rychlá metoda skenování nám v kontrastu neposkytuje tak dobré vlastnosti. Na obrázku 25 je vidět detail solárního článku skenovaného rozlišením 5000x4000. Z obrázku jsou patrné stíny vzniklé pohybem světelného zdroje a parazitními kapacitami. Dále jsou zde viditelné vertikální čáry, které jsou způsobeny chybou metody.



Obr. 24 Sken solárního článku červeným laserem s maximálním rozlišením (krok 25 μm)

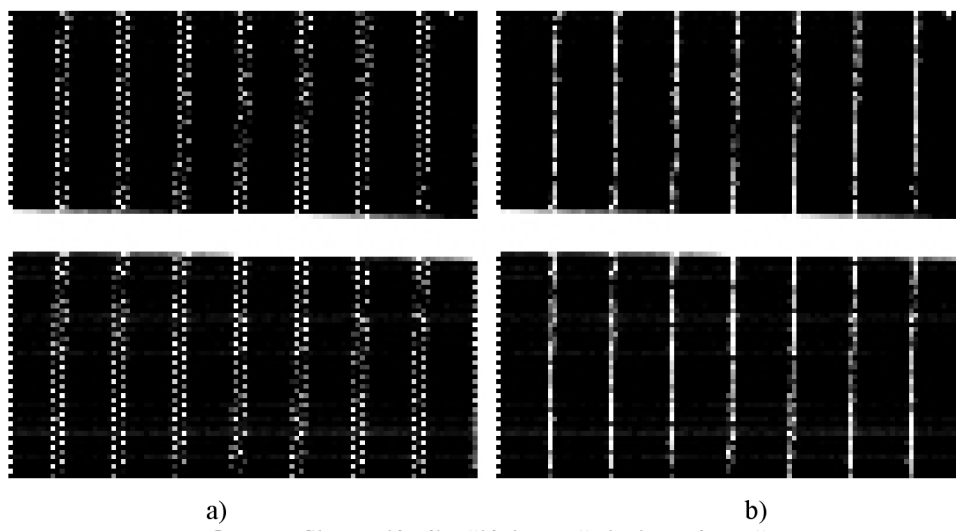


Obr. 25 Sken solárního článku zelenou LED s rozlišením (5000x4000)

3.5.4 Chyby

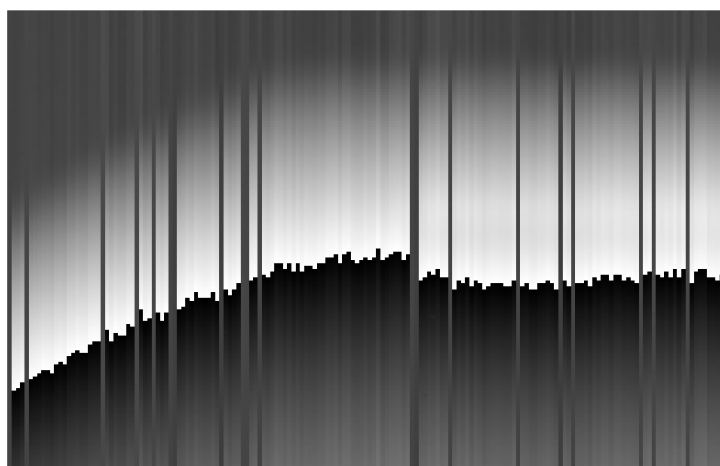
Při metodě pomalého skenování přejíždí světelný paprsek jeden řádek zleva doprava a posléze další řádek zprava doleva a to se opakuje až do konce měření. Při zvyšujícím se počtu naměřených hodnot docházelo k posunutí lichých a sudých řádků. Daný rozdíl vznikl

pravděpodobně kumulující se chybou krokového motorku. Příklad skenu s chybou a s následným vyřešením je na obrázku 26.



Obr. 26 Sken solárního článku a) před a b) po úpravě

Při rychlé metodě, kdy se skenují jednotlivé sloupce vertikálně, dochází k chybě vzniklé při zpracování dat. Jedná se o nahodilé vertikální pruhy viz. Obr. 27. U této metody byl hlavní problém v synchronizaci startu měření. Bez hardwarového zásahu do plotteru nebylo možné synchronizovat pohyb plotteru s měřicí kartou. Proto byla synchronizace provedena softwarově. Současně s měřenými daty je měřen i signál krokového motorku. Pomocí tohoto signálu jsou sloupce seřazeny. Bohužel byl zjištěn již zmiňovaný nedostatek vertikálních pruhů. Ty jsou způsobeny právě v okamžiku třídění a skládání dat. Počátek dat se vyhodnocuje podle okamžiku kdy se plotter rozjede. V signálu krokového motorku jsou však někdy nepředvídané pohyby, díky nimž je vyhodnocen počátek setřídění odlišně od reálného posunu.

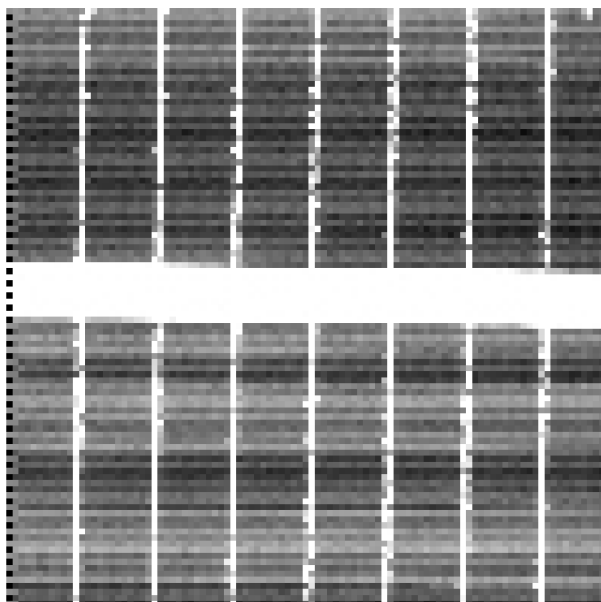


Obr. 27 Vertikální pruhy způsobené špičkami v signálu krokového motorku

Další, pro měření téměř nepodstatná chyba vzniká při zadávání souřadnic skenování. Tato chyba je maximálně 0,2mm při zadávání souřadnic. Příčina chyby je v algoritmu zpracování signálu krokového motorku.

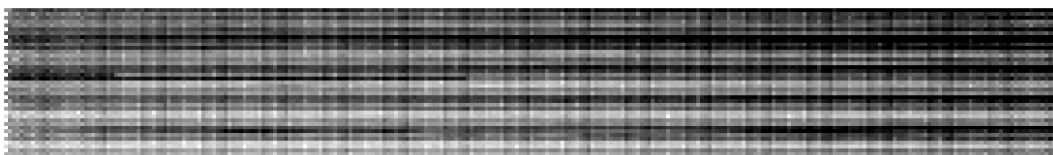
3.5.5 Šum

Všechna předešlá měření byla provedena ve velkém intervalu napětí, proto převedením do odstínů šedi nebyl šum vidět. V případě měření v užším intervalu hodnot je do stupně šedi rozdělen celý tento interval a tudíž je pro jeden stupeň šedi určen mnohem menší interval napětí než v předešlém případě. Takto se může uplatnit napětí několik setin voltu a tudíž se nám projeví i šum.



Obr. 26 Část solárního článku s viditelným šumem (interval naměřených hodnot je 0,5-3,9V, zobrazený interval je 1,5-2,2V)

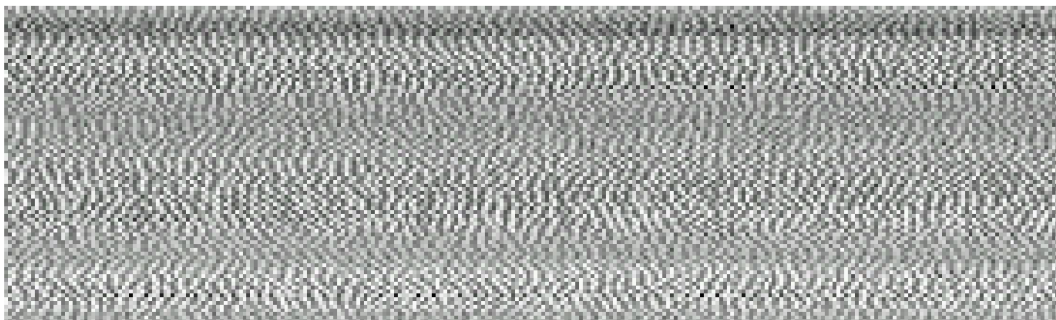
Protože výskyt šumu je nežádoucí, bylo nutno ho odstranit. Zaměřili jsme se na tři možné způsoby vzniku šumu. Nejdříve jsme vyzkoušeli kolísání intenzity osvětlení LED. Provedli jsme tedy měření bez osvětlení, kdy se sice LED pohybovala nad solárním článkem, ale na článek nedopadalo žádné světlo. Výsledek měření je na obr. 27.



Obr. 27 Měření šumu bez osvětlení (oblast zobrazení 0,5-0,9V)

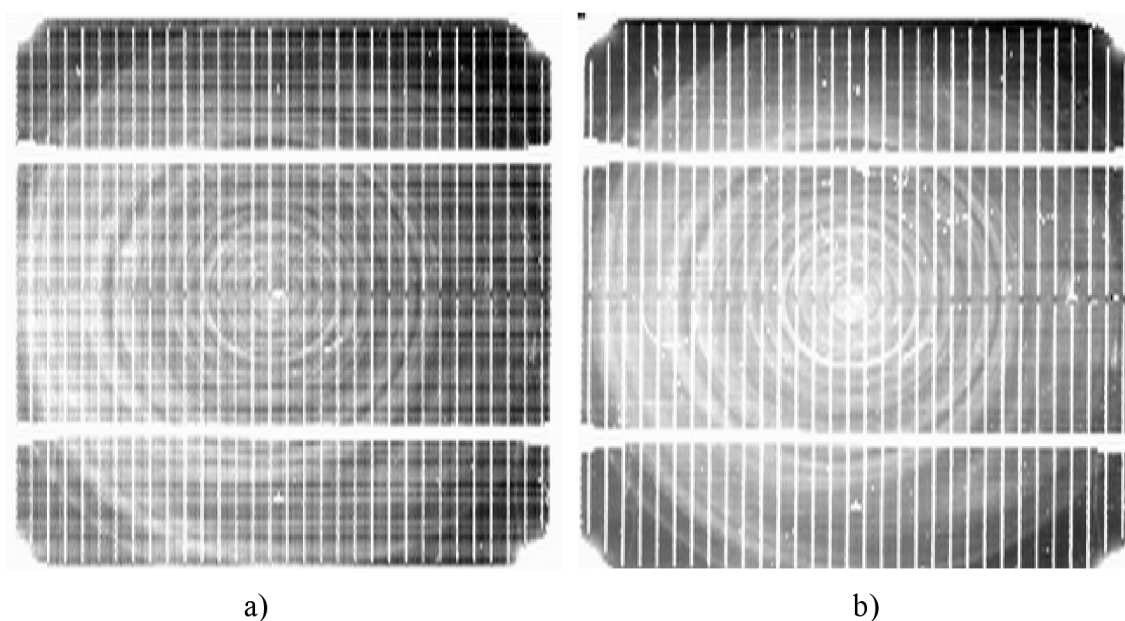
Měření nám odhalilo, že šum bez osvětlení stále přetrvává. Proto jsme kolísání osvětlení vyloučili.

Dále mohl být zdrojem šumu plotter nebo zesilovač. Proto bylo provedeno další měření, tentokrát bez osvětlení a s vypnutým plotterem. Výsledek je na obr. 28.



Obr. 28 Měření šumu s vypnutým plotterem (oblast zobrazení 1-1,3V)

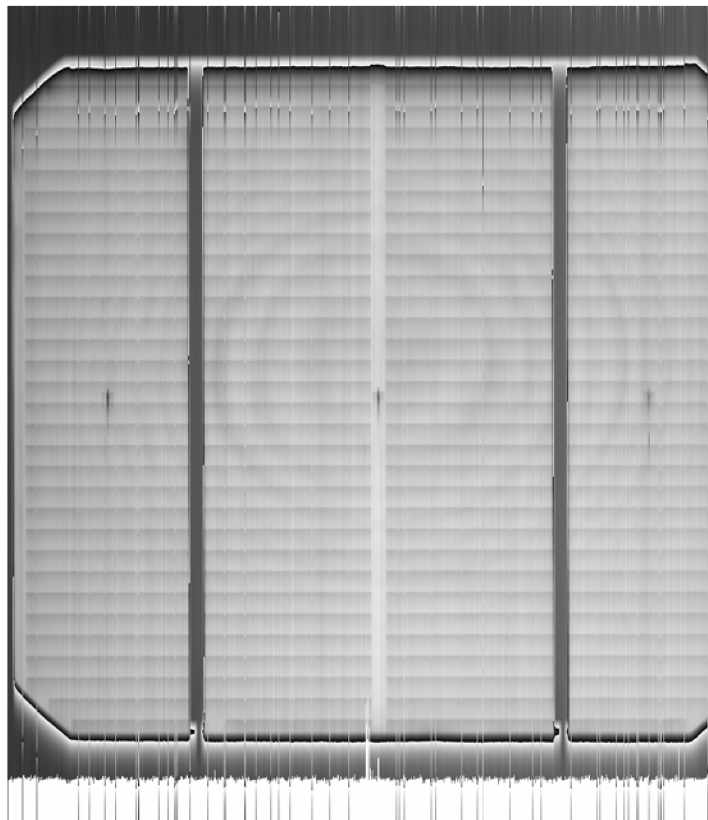
Z obrázku je patrné, že podíl na šumu má jak plotter tak i zesilovač, kdy plotter vytváří téměř pravidelně se opakující světlé a tmavé proužky, kdežto zesilovač vytváří šum zcela nahodile. Z naměřených hodnot je také patrné, že podíl šumu ze zesilovače je větší než z plotteru. Proto došlo na zesilovači k úpravě, která vedla ke snížení šumu. Snížení šumu můžeme vidět na obr. 29, kde je zobrazen výsledek měření solárního článku před úpravou zesilovače a po jeho úpravě.



Obr. 29 Porovnání měření a) před a b) po úpravě zesilovače (nastavení kontrastu je na stejné úrovni)

3.5.6 Výsledky rychlého skenování

U této metody je hlavním cílem zrychlení skenování článku. Toto se nám povedlo ale za cenu horšího rozlišení. Na obrázku 30 je vidět naskenovaný článek s rozlišením 5000vzorků na sloupec. Je zde zobrazeno 1000 sloupců po kroku 4 mils. Celkový čas měření byl 1 hodina a 36minut. Měření bylo provedeno zelenou LED.



Obr. 30 Solární článek naskenovaný rychlou metodou LBIC (počet sloupců 1000)

Z obrázku 30 jsou patrné vertikální čáry. Jedná se o chybu metody. Z obrázku je patrná i výrobní vada tzv. Swirl. Pravidelné prstence vznikají z důvodu injekce kyslíku do křemíku rozpouštěním křemenných nádob při rotačním pohybu během Czochralského metody. [18]

4 ZÁVĚR

Nová měřicí metoda byla úspěšně vyzkoušena s novou kartou UDAQ 1416AS. Tato karta se ukázala být vhodnou alternativou. Její výhoda je především USB připojení, díky němuž lze snadněji s kartou manipulovat a přenášet ji i na jiná pracoviště. Díky nové metodě rychlého skenování jsem dokázali snížit dobu potřebnou pro skenování solárního článku. Avšak snížení doby skenování bylo na úkor kvality zobrazených dat. Z naměřených výsledných dat jsou patrné nedostatky metody. Většina nedostatků je dána především odlišným principem pohybu plotteru a použitím rychlého měření. Mezi hlavní nedostatky patří horší rozlišení hlavně ve vertikálním směru způsobené parazitními kapacitami. Toto je zřejmé ze zobrazení kontaktních pruhů na solárním článku, které jsou roztaženější a rozmazanější oproti skenování pomalou metodou. Dalším nedostatkem jsou vertikální čáry, které jsou způsobeny špičkami v signálu krokového motoru plotteru. Jedná se ale o chyby, které by se detailnějším rozbořem a návrhem nového algoritmu seřazování dat daly odstranit.

V obou metodách dále narážíme na problém se zpracováním obrovského množství dat. Při jejich zpracování je nadměrně zatěžována operační paměť a práce s daty zatěžuje operační systém. Navíc velikost souborů v nichž jsou data uložena je neúměrná.

Shrnu-li výhody a nevýhody obou metod skenování solárních článků, je zřejmé že vždy je rychlost na úkor kvality zobrazení a naopak. Z toho vyplývá i volba použití. Rychlou metodu bych volil jako určitý náhled na článek a na zjištění zda je vadný či nikoli. V případě hlubší diagnostiky jednotlivých vad bych volil pomalou metodu. Tato metoda sice trvá delší dobu, ale zato nám poskytne ucelenější a přesnější zobrazení naměřených dat a tudíž i zřetelnější zobrazení dané vady.

Obecně je však metoda LBIC pomalá a tudíž její nasazení do výrobního procesu je neekonomické. Proto se volí mnohem rychlejší metody založené na principu pouhé funkce článku v daných tolerancích. Metoda LBIC nám dokáže oproti těmto metodám poskytnout diagnostiku jednotlivých vad.

Na současném stupni vývoje jsme díky této metodě schopni dosáhnout velice uspokojivých výsledků. Ukázalo se, že metoda LBIC je velmi účinným nástrojem pro diagnostiku poruch solárních článků.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Exell R. H. B.: The Physics of Photovoltaic Cells, 2000. King Mongkut's University of Technology Thonbur (<http://www.jgsee.kmutt.ac.th/exell/Solar/PVCells.html#2>)
- [2] Vaněček M.: Přeměna sluneční energie v energii elektrickou
- [3] Internetová stránka: <http://www.solartec.cz/>
- [4] Musil V., Brzobohatý J., Boušek J., Prchalová I. : Elektronické součástky, VUTIUM, Brno 2000, ISBN 80-214-1776-5
- [5] Karamanolis, S.: Sluneční energie, Východisko z ekologicko-energetické krize, MAC, Praha 1996, 239 stran. ISBN 80-86015-02-5.
- [6] Internetová stránka: <http://www.automa.cz/svetlo/2005/sv020554.htm>
- [7] Internetová stránka: <http://www.intersekce.cz/fotovotaicke1.htm>
- [8] Internetová stránka: <http://server.solartec.cz>
- [9] Internetová stránka: http://www.ekowatt.cz/library/infolisty/slunce_elektrina.php3
- [10] Internetová stránka: <http://www.solarutility.com/history.shtml> – fotovoltaiický vývoj
- [11] Internetová stránka: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlas>
- [12] Internetová stránka: http://www.fzu.cz/texty/brana/fotovoltaika/slunecni_energie.php
- [13] Internetová stránka: <http://www.chmi.cz/meteo/ok/atlas/uvod.html>
- [14] Herout P.: Učecnice jazyka C, PROTISK, České Budějovice 2001
- [15] Matoušek D. : C++Builder, vývojové prostředí, Ben, Praha 2002
- [16] Internetová stránka: http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_induced_current
- [17] Internetová stránka: <http://www.tedia.cz>
- [18] Charvát, J.: Monokrystalický křemík pro výrobu solárních článků a důsledky jeho tepelného zpracování – diplomová práce