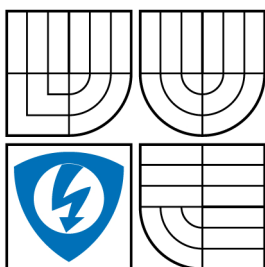


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODIFIKACE MĚŘÍCIHO PRACOVISTĚ PRO MĚŘENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

MODIFICATION OF MEASUREMENT WORKPLACE FOR SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOVAN ROČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2009

OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ

Anotace

V teoretické části diplomové práce je popsána obecně problematika solárních článků. Zejména struktura článku, postup výroby, druhy defektů, které se na článcích mohou vyskytovat a diagnostické metody detekce těchto vad. Mezi diagnostické metody se řadí solární simulátor, metoda elektroluminiscence, metoda detekce vad při záření mikroplazmy a metody LBIV a LBIC. Hlavní zaměření je na diagnostickou metodu LBIC (Light Beam Inducted Current). Pracoviště využívající tuto metodu je používáno v testovací laboratoři na Ústavu Elektrotechnologie na Vysokém učení technickém v Brně. Metoda je velice přesná a odhalí většinu defektů v solárním článku, ale problém je v pomalé rychlosti měření.

Hlavním řešeným problémem v praktické části diplomové práce je navržení a realizace modifikace pracoviště LBIC, které by pracovalo na modernější úrovni, tzn. použití výkonnějšího PC pro obslužný program a moderního měřicího zařízení Agilent 34410A. Cílem této modernizace je zrychlení doby měření při stávající přesnosti výsledku. Modifikované pracoviště je následně realizováno a porovnáno se stávajícím pracovištěm.

Klíčová slova:

Solární článek, diagnostická metoda LBIC, Labview, Agilent, modifikované pracoviště, stávající pracoviště, doba měření, LED dioda

Abstrakt

The problems of solar cells are described in general in theoretic part of the master's thesis. In particular there is described structure of solar cells, procedure of production of solar cells, kinds of defects that can occur in solar cells and diagnostic methods of detection of this defects. The solar simulator, electroluminescence method, detection of defects during microplasma shining, LBIV and LBIC method belongs to category of diagnostic methods. The main focusing is on diagnostic method of LBIC (Light Beam Inducted Current). The workplace which exploits this method is used in laboratory in Department of Electrotechnology on University of Technology Brno. This method is very exact and it reveals most of defects in solar cell but the problem is the slow speed of testing.

In practical part of the master's thesis the main solved problem is the proposition and realization of modified workplace of LBIC that would work on more modern level, it means using performer PC for service program and Agilent 34410A the modern measuring device. The speed up of the testing time is the goal of modernization in existing accuracy of finding. The modify workplace is realized and compared with the existing workplace subsequently.

Keywords:

Solar cell, diagnostic method of LBIC, Labview, Agilent, modified workplace, current workplace, time of testing, LED diode

ROČEK, R. *Modifikace měřicího pracoviště proměření solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 49 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaňek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma "Modifikace měřicího pracoviště pro měření solárních článků" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Obsah

1	Solární článek	9
1.1	Fotovoltaický jev	10
1.2	Historie solárního článku	10
1.3	Struktura solárního článku.....	10
1.4	Náhradní schéma solárního článku	11
1.5	Výroba solárního článku ve firmě SOLARTEC s.r.o.	12
2	Defekty solárních článků	13
2.1	Vírový defekt	13
2.2	Vnitřní pnutí materiálu	13
2.3	Vady způsobené manipulací s článkem	14
2.4	Nehomogenita difúzní vrstvy	15
3	Diagnostické metody detekce	16
3.1	Solární simulátor	16
3.2	Metoda elektroluminiscence	18
3.3	Metoda detekce vad při záření mikroplazmy	18
3.4	Metoda LBIC (LIGHT BEAM INDUCED CURRENT)	19
3.5	Metoda LBIV (LIGHT BEAM INDUCED VOLTAGE)	19
4	Popis stávajícího pracoviště LBIC na VUT.....	21
4.1	Popis jednotlivých částí pracoviště.....	21
4.2	Způsob měření na pracovišti LBIC	23
5	Výsledky měření na stávajícím pracovišti LBIC	24
6	Modifikace měřícího pracoviště LBIC.....	27
6.1	Realizace hardwarové části měřícího pracoviště LBIC	27
6.2	Realizace softwarové části měřícího pracoviště LBIC.....	28
6.2.1	Způsob měření na pracovišti LBIC	28
6.2.2	Popis programu.....	30
6.2.3	Uživatelské prostředí kompletního programu pracoviště LBIC.....	34
7	Výsledky měření na modifikovaném pracovišti LBIC.....	37
8	Porovnání výsledků měření.....	39

Úvod

Slunce je základní prvek všeho života na Zemi. Sluneční paprsky nám dodají 20000-krát více energie než dokážeme spotřebovat. Přestože je sluneční energie známá již od dob pravěku, doposud se nepodařilo efektivně tento zdroj využívat jako u ostatních zdrojů.

Solární článek, neboli fotovoltaický článek, slouží k přímé přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Účinnost těchto zařízení je v dnešní době okolo 20%. Ve srovnání s jadernými elektrárnami, které mají účinnost okolo 40%, nebo s vodními elektrárnami, které se pohybují v blízkosti 100%, je účinnost solárních článků malá.

Přestože účinnost solárních článků není zatím vysoká, vývoj tohoto odvětví se rozšiřuje velice rychle. Mezi hlavní výhody této výroby elektrické energie patří práce bez jakéhokoliv paliva, odpadu či znečištění životního prostředí. Jediným „palivem“ solárních elektráren je pouze sluneční záření, jedná se tedy o plně obnovitelný zdroj energie.

Jako při každé výrobě, tak i při výrobě solárních článků dochází k výskytu různých vad materiálu, deformací při výrobě, ale i poškození při manipulaci s články. Z tohoto důvodu bylo nutné vyvinout diagnostické metody na odhalení těchto vad a případné zamezení opětovného opakování.

1 Solární článek

V dnešní době jsou nejvíce rozšířené a tudíž i vyráběné články z monokrystalického a polykrystalického křemíku. Monokrystalické články (viz. Obr. 1.1) jsou význačně větší účinností (okolo 20%) a polykrystalické (viz. Obr. 1.2) naopak menšími výrobními náklady [1].

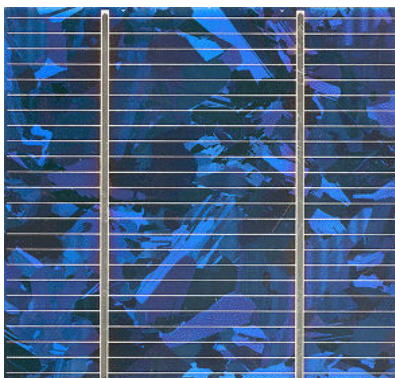


a)



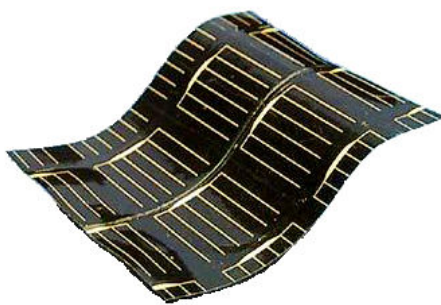
b)

Obr. 1.1: Monokrystalický článek – a) Pohled zepředu, b) Pohled zezadu



Obr. 1.2: Polykrystalický článek

Novinkou ve vývoji solárních článků jsou tenkovrstvé solární články s příměsí polymeru (viz. Obr. 1.3). Tyto články jsou oproti předchozím pružnější a náklady na výrobu jsou ze všech jmenovaných nejnižší, ale zásadní problém je ve velice nízké účinnosti (okolo 7%). V této práci se budu zmiňovat zejména o monokrystalických článcích, protože jsou posléze i předmětem mého testování [2].



Obr. 1.3: Pružný solární článek s příměsí polymeru

1.1 Fotovoltaický jev

Solární článek nebo také fotovoltaický článek je polovodičová součástka, která je schopna přeměnit světelnou energii na elektrickou energii pomocí fotovoltaického jevu. Každý článek musí obsahovat PN přechod. Na rozhraní vrstvy P a vrstvy N existuje elektrické pole, které uvádí do pohybu volné elektrony, které jsou uvolňovány díky energii dopadajícího fotonu. Tento pohyb elektronů se díky polovodičové struktuře článku uspořádá na stejnosměrný elektrický proud [1], [3].

1.2 Historie solárního článku

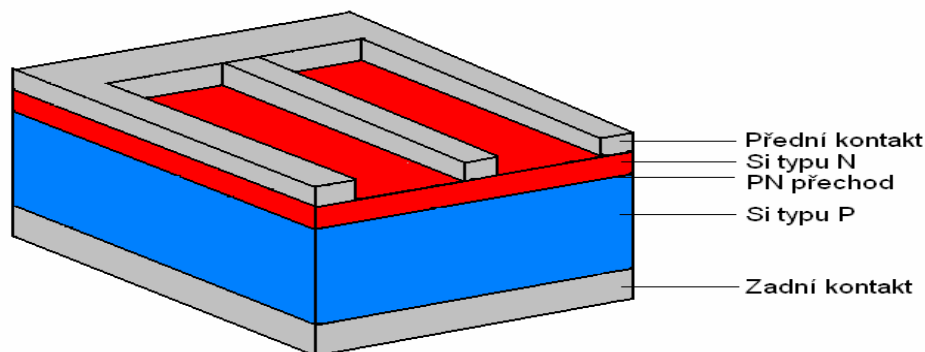
Jak již bylo zmíněno solární článek pracuje na principu fotovoltaického jevu. Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 francouzským fyzikem A.E. Becquerelem, kdy při pokusu s dvěma kovovými elektrodami umístěnými v elektricky vodivém roztoku bylo zjištěno, že při zvýšení intenzity světla vzrůstá na elektrodách napětí.

K sestrojení prvního fotovoltaického článku došlo v roce 1883 Ch. Frittssem, který ho vyrobil ze selenu. Tento článek měl účinnost pouze 1 %. Současná podoba solárního článku, tedy vyrobeného z monokrystalického křemíku, je známa od roku 1954 a byla zkonstruována v Bellových laboratořích. Zde zjistili, že křemík je velice citlivý na světlo. Tento první křemíkový článek měl účinnost pouze 6 % [4].

1.3 Struktura solárního článku

Fotovoltaický článek je složen z několika vrstev (viz. Obr. 1.4). Nejspodnější vrstva, která se nachází na spodní straně křemíkové destičky, je vodivá vrstva (tzv. zadní kontakt), která je nanesena ve tvaru husté mřížky. Nad touto vrstvou se nachází velice tenká vrstva P^+ (řádově desetiny μm), která obsahuje vysokou dotaci příměsí. Pak následuje již tlustá vrstva křemíku typu P (řádově stovky μm), která obsahuje

menší obsah příměsi. Následuje PN přechod a tenká vrstva křemíku typu N (do 1 μm), která obsahuje nízkou dotaci příměsi. Tato vrstva je pokryta sběrnou vodivou pastou a antireflexní vrstvou nitridu. Nejvyšší vrstvou je opět vodivá vrstva (tzv. přední kontakt). Přední a zadní kontakt má za úkol odvádět vyrobený proud z článku [5].



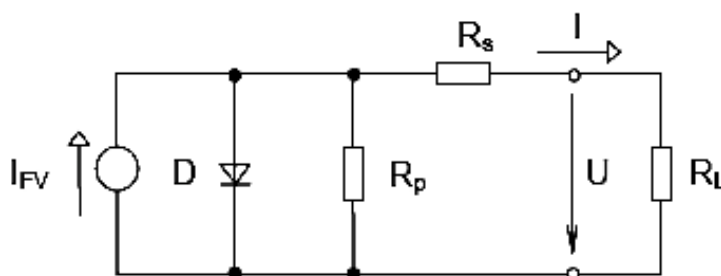
Obr. 1.4: Struktura fotovoltaického článku

1.4 Náhradní schéma solárního článku

Na Obr. 1.5 je znázorněno náhradní schéma fotovoltaického článku. Ze schématu je patrné, že jestliže chceme dosáhnout maximálního výstupního výkonu článku, potřebujeme dosáhnout maximálního generovaného proud I_{FV} , minimalizovat sériový odpor R_s a dosáhnout velký svodový odpor R_p . Přitom je třeba použít takové technologie, které umožňují dosáhnout nízkou výrobní cenu při vysoké účinnosti a vysoké spolehlivosti. Velikost výstupního proudu I je dán vztahem

$$I = I_{FV} - I_D \left\{ \exp \left(\frac{U + I.R_s}{k_B.T} \right) - 1 \right\} - \frac{U + I.R_s}{R_p}, \quad (1.1)$$

kde I_{FV} je generovaný proud, I_D je proud diody, k_B je Boltzmannova konstanta, U je napětí, T je teplota, R_s je sériový odpor a R_p je svodový odpor [5].



Obr. 1.5: Náhradní schéma fotovoltaického článku

1.5 Výroba solárního článku ve firmě SOLARTEC s.r.o.

Každý výrobce solárních článků má odlišný postup výroby. Vybral jsem si výrobní postup z firmy Solartec s.r.o., protože tato firma vyrábí monokrystalické články a nechává je testovat v laboratoři solárních článků na VUT v Brně.

Prvním krokem výroby solárního článku je zhotovení monokrystalických křemíkových tyčí. Takovéto tyče jsou ořezávány na čtvercový průměr, z důvodu lepší využitelnosti plochy solárních panelů. Dále se tyto tyče řezou na tenké destičky (maximálně na šířku 250 μm). Každá destička je pomocí leptání a broušení vyhlazena. Z důvodu lepšího pohlcování světla se na povrchu destičky vytvoří leptáním textura. Destičky jsou následně nadopovány fosforem, čímž se vytvoří PN přechod, vybaveny antireflexní vrstvou nitridu, která způsobí tmavě modré zbarvení článku a nanесena pomocí síťotisku vodivá pasta, díky níž se vyrobí metalizace na zadní i přední straně článku. Posledním krokem výroby je vypálení článku, tj. vytvoření vodivého propojení metalizace a křemíku.

2 Defekty solárních článků

V této kapitole se budu zabývat poruchami, které mohou nastat, jak při výrobě, tak při manipulaci na solárních článcích. U každé metody bude zobrazen její optický vzhled, vysvětlena příčina vzniku a nakonec i metoda detekce, která tuto poruchu nejlépe odhalí.

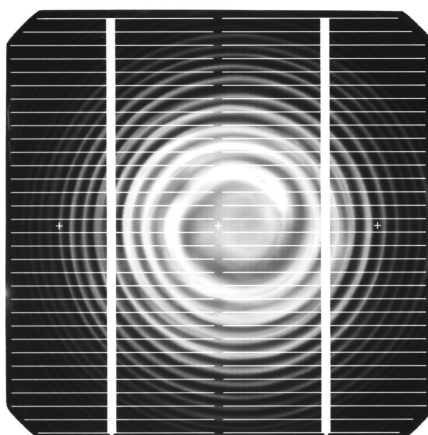
Defekty vyskytující se v solárních článcích se rozdělují na dvě skupiny. První skupinou jsou materiálové vady a druhou vady vznikající ve výrobním procesu, neboli procesní defekty.

Materiálové vady vznikají již při výrobě křemíku. Mezi nejvýznamnější poruchu tohoto druhu řadíme vírový defekt (viz Obr. 2.1).

Procesní defekty rozdělujeme na dvě skupiny. První skupinou jsou mechanická poškození, především poškrábání článku, odštípnutí okraje článku nebo neobroušené hrany. Druhou skupinou je nehomogenita difúzní vrstvy [7].

2.1 Vírový defekt

Jak už jsem uvedl výše, je tento defekt způsoben již při tažení monokrystalického křemíku. Tato vada je charakteristická kruhovitým tvarem spektra, které vznikne při tažení křemíkového ingotu. Důvodem je injekce příměsí, např. kyslíku. Defekt je odhalitelný např. pomocí metody LBIC.

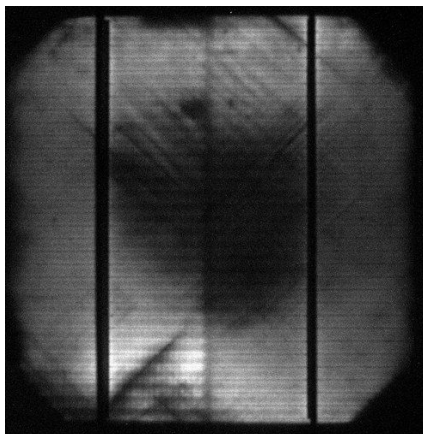


Obr. 2.1: Vírový defekt

2.2 Vnitřní pnutí materiálu

Tento defekt vzniká, stejně jako předešlý, již při tažení monokrystalického křemíku, které se provádí nejčastěji Czochralského metodou. U této vady se jedná

o příliš rychlý růst ingotu, kdy dochází u křemíku k porušení struktury a přetrhání vazeb. Defekt se dá odhalit metodou elektroluminiscence nebo také metodou LBIC.



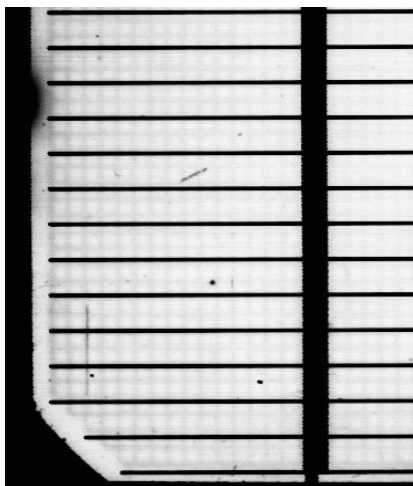
Obr. 2.2: Vnitřní pnutí materiálu

2.3 Vady způsobené manipulací s článkem

Vady způsobené manipulací s článkem vznikají především již ve výrobním procesu. Mezi tyto vady řadíme poškrábání, neobroušené hrany, různé lomy i výskyt prachových částic, které se mohou dostat při výrobním procesu do článku. Tyto vady jsou ve většině případů odhaleny pomocí metody elektroluminiscence a metodou LBIC.



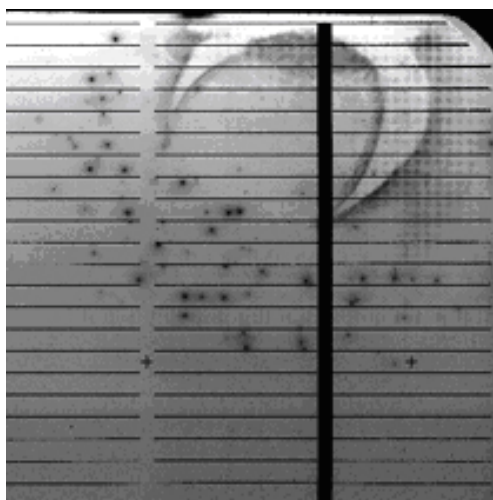
Obr. 2.3: Výskyt prachových částic v solárním článku



Obr. 2.4: Povrchové poškrábání a poškození hrany článku

2.4 Nehomogenita difúzní vrstvy

Tento defekt vzniká při procesu difúze. Na obrázku je defekt znázorněn v podobě černých bodů. Vada se dá odhalit metodou LBIC a metodou detekce vad při záření mikroplazmy.



Obr. 2.5: Nehomogenita difúzní vrstvy

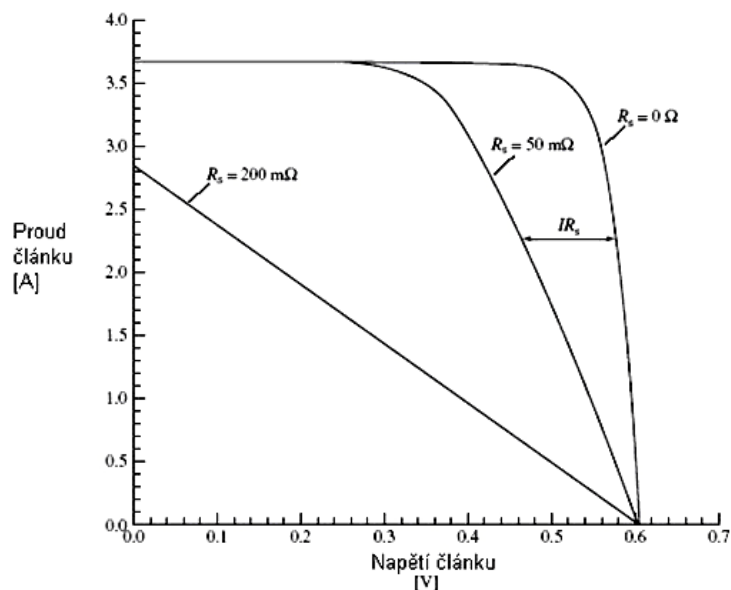
3 Diagnostické metody detekce

3.1 Solární simulátor

Elektrické parametry fotovoltaických článků jsou testovány při intenzitě osvětlení 1000W/m^2 , při spektrálním složení světla odpovídající slunečnímu spektru (AM 1.5 Global) a při teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$. Toto osvětlení zajišťuje xenonová lampa zabudovaná v solárním simulátoru. Základním sledovaným parametrem je proud I_{450} , podle něhož jsou články rozděleny do skupin. Tento proud je měřen při napětí 450mV .

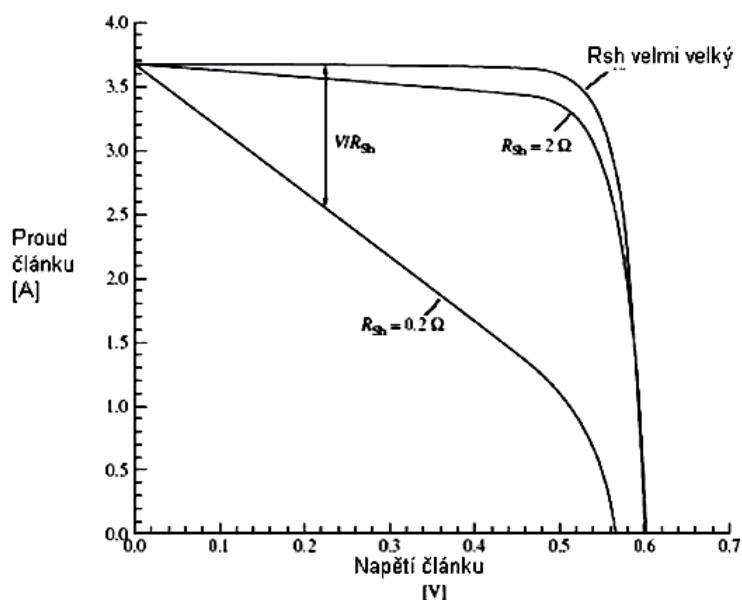
Další parametry, které jsou sledovány na článcích:

- a) Proud na krátko I_{SC} - tento proud je měřen při nulovém napětí U .
- b) Napětí na prázdno U_{OC} - toto napětí je měřeno při nulovém proudu I .
- c) Maximální výkon P_m - výkon, jaký je schopen článek dodat. Maximální výkon je v charakteristice okolo středu ohybu. Zařízení, které odebírá elektrickou energii z článku musí zatěžovat článek, tak aby se jeho výkon pohyboval okolo tohoto maximálního výkonu.
- d) Proud I_m - proud, při kterém solární článek dodává maximální výkon.
- e) Napětí U_m - napětí, při kterém solární článek dodává maximální výkon.
- f) Účinnost solárního článku - tento parametr udává, jaká je efektivita solárního článku při přeměně světelné energie na elektrickou.
- g) Sériový odpor R_{SO} - v ideálním případě je roven nule. Se zvyšováním sériového odporu solárního článku se snižuje proud nakrátko I_{SC} , který má za následek vznik napětí na sériovém odporu a tudíž zvýšení diodového proudu I_D . Napětí U_{OC} se nemění. Výsledkem je snížení fill faktoru a tedy i účinnosti článku.



Graf 3.1: Vliv sériového odporu R_s na A-V charakteristiku solárního článku [6]

- h) Paralelní odpor R_{SH} - v ideálním případě je roven nekonečnu. Může být způsoben velkými defekty krystalické mřížky nebo existencí svodového proudu na okrajích článků. Tento odpor je paralelně připojen k diodě, kde může dojít k úbytku proudu.



Graf 3.2: Vliv paralelního odporu R_p na A-V charakteristiku solárního článku při $R_s = 0 \Omega$ [6]

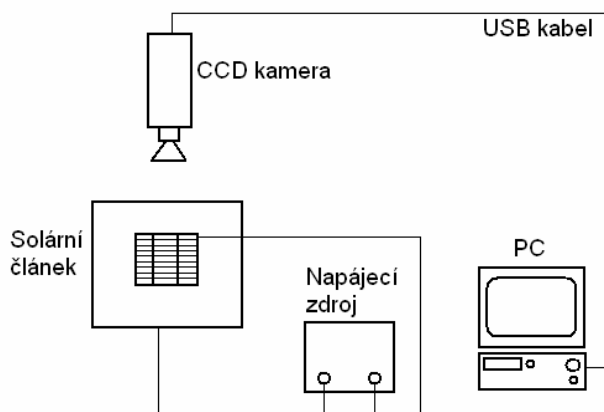
- i) Faktor plnění FF - jedná se o míru elektrické jakosti solárních článků. S rostoucí hodnotou roste i kvalita článku.

Podle výsledků ze solárního simulátoru jsou články rozdělovány do skupin podle účinnosti. Následně, při konstrukci solárních panelů, jsou vždy použity u jednoho panelu články stejné třídy, aby se nesnižovala účinnost celého panelu. Články s nižší účinností se mohou chovat, oproti ostatním článkům, jako spotřebiče [6].

3.2 Metoda elektroluminiscence

Elektroluminiscence je jev, při kterém dochází k přeměně elektrické energie na světlo. Projde-li křemíkem elektrický náboj, část elektronů přemění svou energii na teplo (článek se zahřívá) a část energie elektronů se přemění na energii fotonů, tj. světlo [1].

Při této metodě je zapojen článek v propustném směru a nejedná se o destruktivní metodu, tj. článek lze po testu znovu použít. Touto metodou se dají zjistit optické a materiálové vady solárního článku. U této metody dochází v jednom okamžiku k zobrazení proudové mapy celého článku, který je snímán CCD kamerou s filtrem, propouštějícím světlo, o vlnové délce delší než 740 nm. Výsledky této detekční metody jsou srovnatelné s metodou LBIC. Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na Obr. 3.1 [8].



Obr. 3.1: Zapojení měřicího pracoviště – metoda elektroluminiscence

3.3 Metoda detekce vad při záření mikroplazmy

Tato metoda je obdobná jako metoda elektroluminiscence s tím rozdílem, že solární článek je zapojen v závěrném směru. Napětí, které je vytvořeno v závěrném směru, je příčinou vzniku mikroplazmy v místech, kde jsou poruchy křemíku nebo lavinové průrazy. Výskyt mikroplazmy je doprovázen zářením světla, které je opět

zachyceno pomocí CCD kamery. Touto metodou se dá dobře odhalit nehomogenita difúzní vrstvy, kterou jsem uvedl v podkapitole 2.4. Při vzniku mikroplazmy se v tomto bodě také zvyšuje teplota, která může při vyšších hodnotách způsobit průraz PN přechodu v solárním článku a tím ho celý zničit [8].

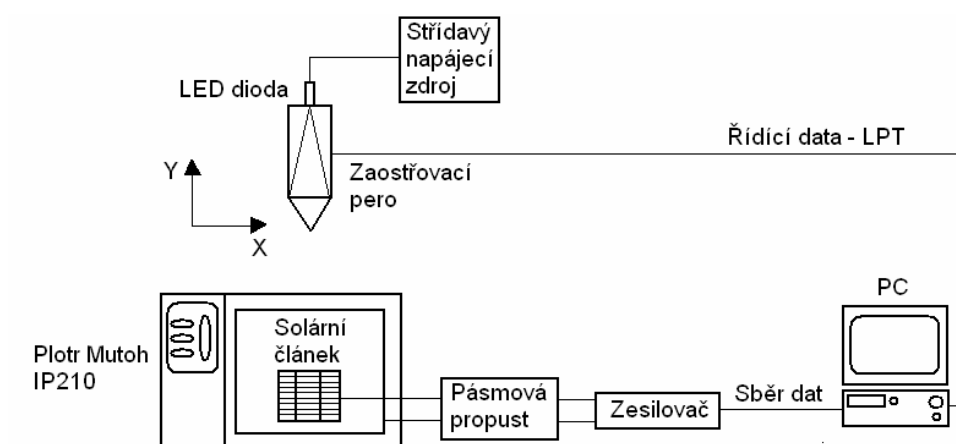
3.4 Metoda LBIC (LIGHT BEAM INDUCED CURRENT)

Při této testovací metodě je článek zapojen v propustném směru a nejedná se o destruktivní testování. Princip metody je založen na snímání proudu na krátko. Nad solárním článkem, který je připevněn ke kontaktnímu poli, se pohybuje (v osách X a Y) zaostřovací pero, ve kterém je umístěna LED dioda a ta je zaostřená do úzkého paprsku a díky lokální proudové odezvě z článku získáme charakteristiku rozložení proudu. Druhou možností zdroje záření je laser, ale oproti LED diodám je výrazně dražší. Pohyb pera je zajištěn pomocí krokových motorků. Tyto kroky se předem definují a v každém bodě je změřena hodnota proudu. K naměřeným hodnotám jsou přiřazeny hodnoty barev ze stupnice šedé, tak aby zvolené barvy odpovídaly hodnotám proudů měřeného článku. Z výsledného obrázku lze určit různé defekty článku.

Přesnost této metody závisí především na zvolení vhodného zdroje záření. Různé vlnové délky LED diod mají rozdílnou hloubku vniku a tudíž odhalí i jiné vady. Tato metoda je výrazně časově náročnější, než metoda elektroluminiscence a metoda detekce vad při záření mikroplazmy. Důvodem delší doby měření je snímání solárního článku bod po bodu, oproti zobrazení celého článku v jednom okamžiku u předchozích metod. Podrobný popis pracoviště LBIC, které je používáno na VUT, je popsáno v kapitole 4.

3.5 Metoda LBIV (LIGHT BEAM INDUCED VOLTAGE)

Metoda LBIV je velmi podobná metodě LBIC. Liší se pouze v tom, že není snímán proud, ale napětí. LED dioda umístěná v zaostřovacím peru je napájena stejnosměrným proudem a signál, který je generován solárním článkem, je filtrován pásmovou propustí a poté zesílen. Zaostřovací pero, ve kterém je umístěna LED dioda, se jako u metody LBIC pohybuje v osách X a Y. Výsledkem je mapa odpovídající napětím naprázdno v daných místech. Z této mapy lze opět vypořadovat různé defekty článku. Zapojení měřícího pracoviště je zobrazeno na Obr. 3.2.

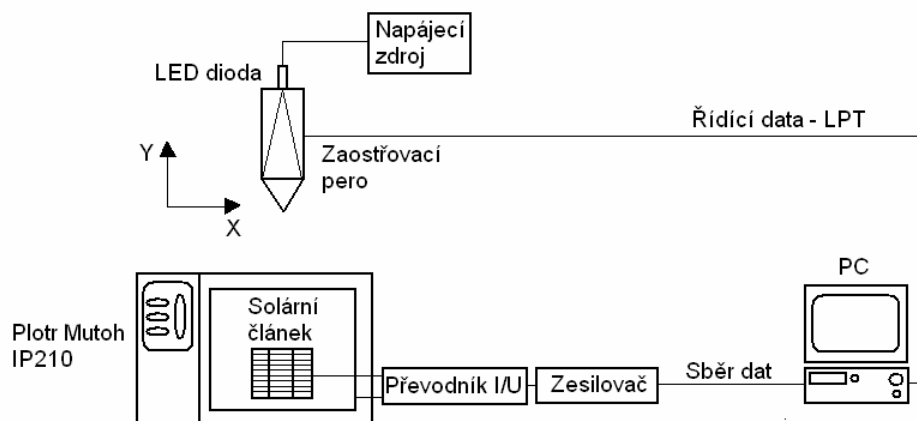


Obr. 3.2: Zapojení měřicího pracoviště LBIV

4 Popis stávajícího pracoviště LBIC na VUT

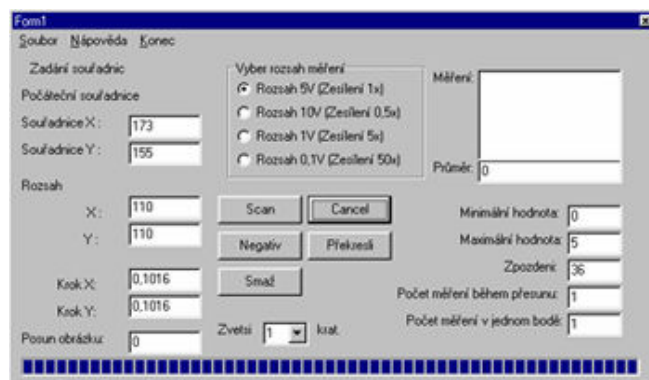
4.1 Popis jednotlivých částí pracoviště

V této kapitole bude popsáno stávající pracoviště LBIC. Pracoviště se skládá z osobního PC s operačním systémem Microsoft Windows 98, který obsahuje měřicí kartu Tedia PCA-1208, externího napájecího zdroje Aligent E3632A a upraveného plotru Mutoh IP210, na kterém je umístěno kontaktní pole a upevněno zaostřovací pero, do kterého jsou vsazovány jednotlivé LED diody. Plotr je umístěn ve speciálním uzavřeném boxu. K plotru je dále připojen obvod, na kterém je umístěn zesilovač signálu a zároveň převodník proudu na napětí. Zapojení měřícího pracoviště je zobrazeno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Zapojení měřícího pracoviště LBIC

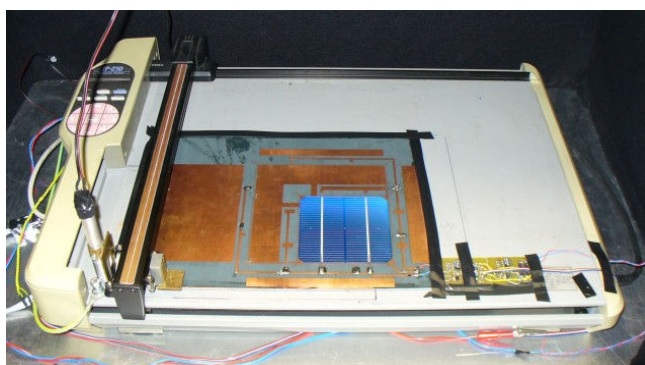
V osobním PC je vytvořen software v programovacím jazyce Borland C++ (viz. Obr. 4.2), který má za úkol celou obsluhu zařízení. Pomocí tohoto programu lze nastavovat počáteční souřadnice zaostřovacího pera, velikost skenované plochy a velikost kroku motorku, tj. posuv pera v ose X a Y. Tyto hodnoty jsou nastavovány v milimetrech. Dále lze v programu nastavit zpoždění (v milisekundách), které je potřeba k uložení naměřené hodnoty v každém bodu měření. Dalším využívaným nastavením je počet měření v jednom bodě a během jednoho přesunu. Jako poslední lze nastavit maximální a minimální hodnotu měřeného napětí. Program obsahuje ještě další nastavení, ale ty nejsou pro měření využívány. V průběhu měření se v reálném čase vypisuje aktuální hodnota měřeného napětí. Naměřené hodnoty jsou ukládány do textového souboru a lze je dále upravovat. Tyto hodnoty jsou převáděny do stupnice šedé a v reálném čase je vykreslován výsledný obrázek.



Obr. 4.2: Program na obsluhu měření metodou LBIC

Osobní PC dále obsahuje měřicí kartu Tedia PCA-1208, která je připojena do ISA slotu. Tato karta je schopna pracovat pouze v operačním systému Microsoft Windows 98, protože pro novější verze Windows již neexistují ovladače. Tato karta komunikuje s upraveným plotrem pomocí paralelního rozhraní a má za úkol sběr a zpracování naměřených dat.

Upravený plotr Mutoh IP210 (viz. Obr. 4.3) je dále připojen k PC pomocí paralelního rozhraní LPT. Pomocí tohoto rozhraní je řízen posuv zaostřovacího pera, které je připevněno k plotru pomocí speciálního držáku (viz. Obr. 4.4a). Do zaostřovacího pera se upevňují jednotlivé měřicí LED diody (viz. Obr. 4.4b) s různými barvami, tzn. různými vlnovými délkami (viz. Tab. 4.1).



Obr. 4.3: Upravený plotr Mutoh IP210



a)



b)

Obr. 4.4: a) Zaostřovací pero připevněné ve speciálním držáku , b) LED dioda

Druh LED diody	Vlnová délka
LED 5mm Červená	621-630 nm
LED 5mm Modrá	465-475 nm
LED 5mm Zelená	521-530 nm
LED 5mm Žlutá	585-594 nm
LED 5mm UV	400-405 nm
LED 5mm IR	860-895 nm

Tab. 4.1: Přehled měřících LED diod

Zaostřovací pero je v podstatě hliníkový tubus, ve kterém je umístěna optická část. Horní část pera slouží k uchycení měřících LED diod a dolní část k zaostření paprsku. Vnitřek pera je pokryt černým textilem, z důvodu pohlcení nežádoucích odrazů světelných paprsků. Zaostření paprsku lze provést pomocí dolní otočné části pera.

Celé toto zařízení, tj. upravený plotr Mutoh IP210 se zaostřovacím perem, je umístěno do boxu, který je vyroben z hliníkového plechu a jeho vnitřní stěny jsou pokryty černým textilem. Účel boxu je zamezení vnikání okolního parazitního světla do měření a zároveň box plní funkci elektromagnetického stínění celého měřícího pracoviště.

4.2 Způsob měření na pracovišti LBIC

Princip stávajícího měření metodou LBIC na VUT spočívá ve skenování solárního článku bod po bodu. Zaostřovací pero se posouvá vždy o jeden krok (předem definovaný v obslužném programu), osvítlí příslušný bod a změří hodnotu proudu v tomto bodě. Tato hodnota proudu se převede na napětí, zesílí a pošle se do PC. K této hodnotě je přiřazena příslušná barva z palety odstínů šedé. Jelikož je známa aktuální poloha pera, vykreslí se tento bod s přiřazenou barvou do výsledného obrázku. Po vykreslení bodu do obrázku se teprve zaostřovací pero na plotru posune o další krok a měření se v dalším bodě opakuje. Důsledek tohoto způsobu měření je velice dlouhá doba měření. Podrobné výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 5.

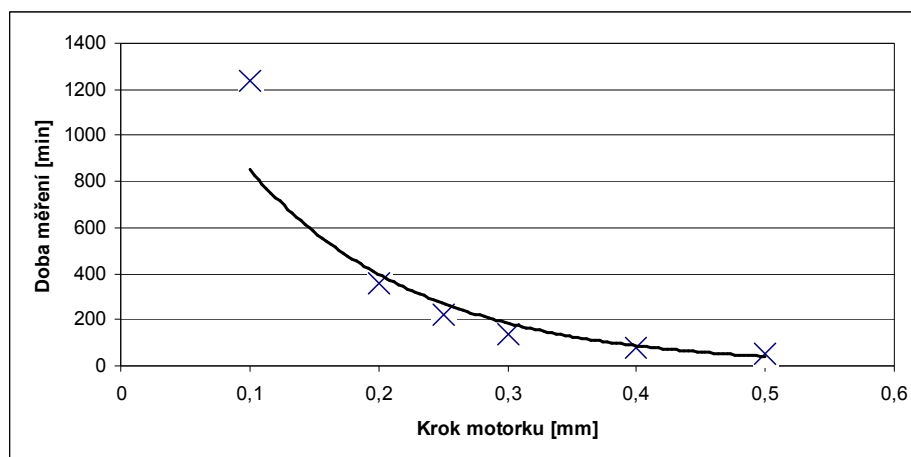
5 Výsledky měření na stávajícím pracovišti LBIC

V této kapitole je uvedeno měření na stávajícím pracovišti LBIC. Měření je orientováno hlavně na časovou délku měření, než na detekci vad solárních článků. Podle výsledků měření bude stanoveno, která velikost kroku motorku je nejlepší pro měření, co se týče poměru kvality výsledku a času měření.

Pro měření jsem si zvolil 5-ti palcový monokrystalický článek (viz. Obr. 1.1). Měření je provedeno pro šest různých velikostí kroku motorku, který posouvá zaostřovacím perem a ke každému měření je zaznamenána doba měření a kvalita změřeného článku. Velikosti kroků jsou vždy voleny u osy X a Y stejně. Kdyby byly kroky na osách různé, výsledný obrázek by nebyl souměrný a neodpovídal by skutečnému poměru stran měřeného solárního článku. Kroky jsem volil od 0,1 mm, což odpovídá jednotce 4 milsy a to je nejmenší krok motorku, až po 0,5 mm, což je 20 milsů. Zvolení vyššího kroku je zbytečné, protože rozlišení výsledného obrázku by bylo již pro zjišťování defektu nepoužitelné. Změřené časy pro jednotlivé kroky motorku jsou uvedeny v Tab. 5.1 a vyneseny do Grafu 5.1.

Krok motorku [mm]	Doba měření [min]
0,5	55
0,4	80
0,3	140
0,25	220
0,2	355
0,1	1240

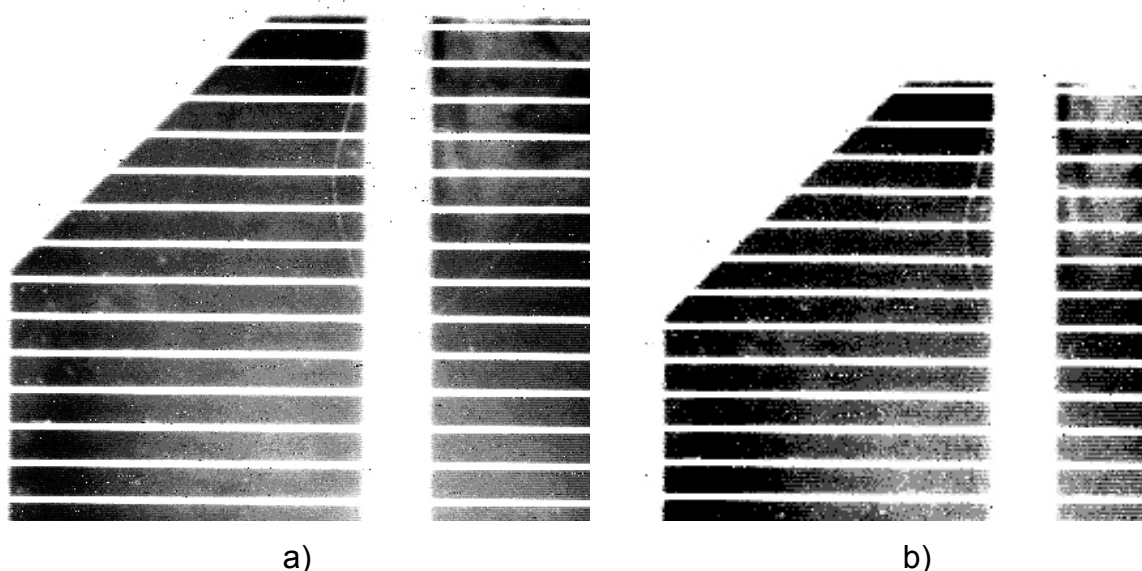
Tab. 5.1: Přehled časů měření v závislosti na kroku motorku



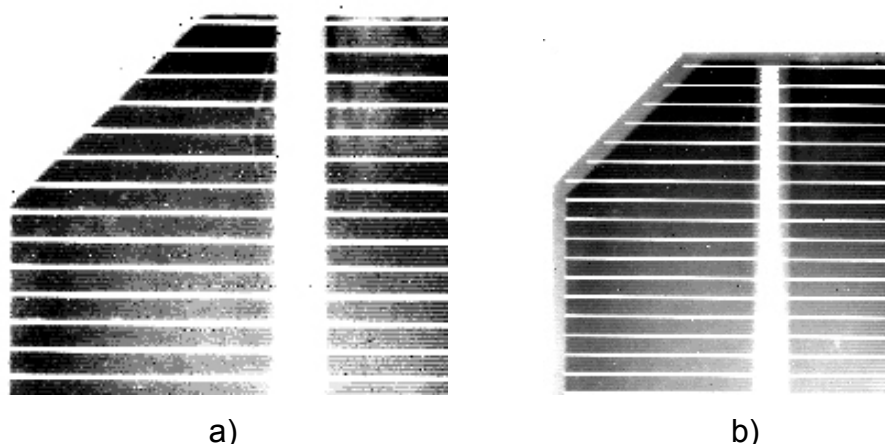
Graf 5.1: Závislost doby měření na zvoleném kroku motorku

Z Grafu 5.1 je patrné, že doby měření mají s rostoucím krokem motorku exponenciální růst. Tento časový růst je způsoben exponenciálním vzrůstem počtu měřených hodnot v daném měření.

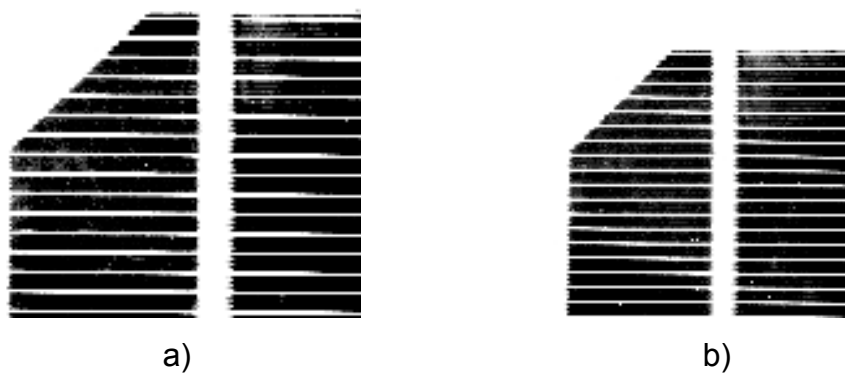
Na Obr. 5.1 až Obr. 5.3 jsou zobrazeny jednotlivé výsledky měření, které jsou dále graficky upraveny (invertování barev, úprava jasu a kontrastu obrázku), aby nalezený defekt byl lépe znatelný. Z těchto obrázků můžeme posoudit jaký krok motorku je dostačující pro viditelnost vady. Na měřeném článku je nalezena vada poškrábání vnějšího povrchu. Z obrázků je vidět, že při kroku 0,1 mm až 0,25 mm je vada vidět dostatečně, ale při krocích 0,3 mm až 0,5 mm již tuto vadu nerozeznáme. Z toho lze usoudit, že pro měření metodou LBIC s dostačujícími výsledky stačí nastavit krok motorku 0,25 mm, což znamená okolo 3,5 hodiny měření.



Obr. 5.1: Výsledky měření – a) Krok 0,1 mm, b) Krok 0,2 mm



Obr. 5.2: Výsledky měření – a) Krok 0,25 mm, b) Krok 0,3 mm



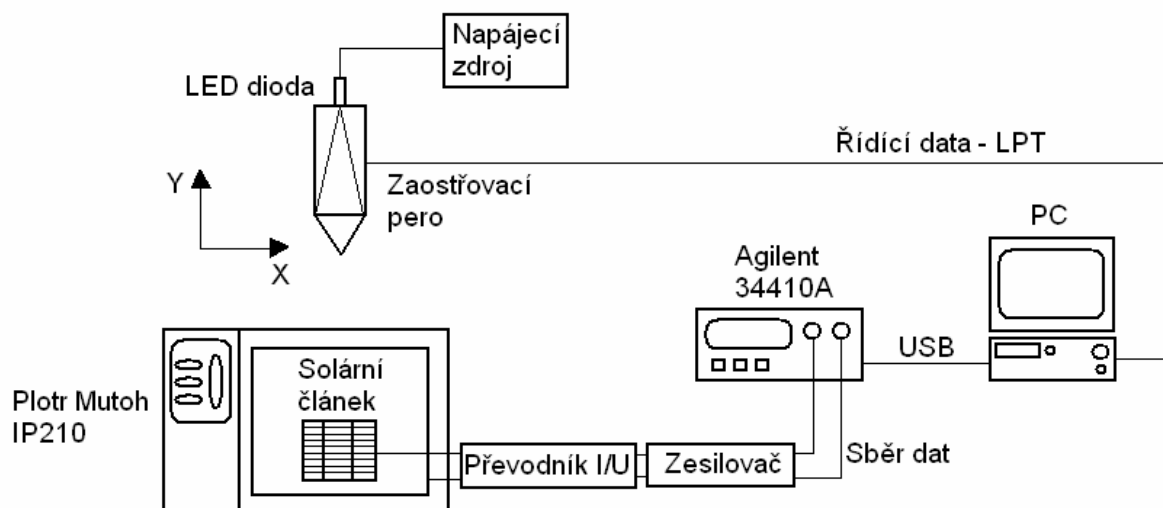
Obr. 5.3: Výsledky měření – a) Krok 0,4 mm, b) Krok 0,5 mm

6 Modifikace měřicího pracoviště LBIC

Hlavním požadavkem na zlepšení stávajícího pracoviště je snížení doby měření za předpokladu udržení stejné kvality měřicího pracoviště, tj. přesnost vykreslování skenovaného článku. Důvod dlouhé měřicí doby je popsán v podkapitole 4.2. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout zcela nové zapojení pracoviště, které by rychleji zpracovávalo změřené hodnoty.

6.1 Realizace hardwarové části měřicího pracoviště LBIC

V první fázi je navrženo hardwarové řešení nového pracoviště (viz. Obr. 6.1). Toto nové pracoviště je složeno ze stávajícího plotru Mutoh IP210 a napájecího zdroje LED diod, nového a výkonnějšího PC, které již obsahuje operační systém Microsoft Windows XP a měřicího zařízení Agilent 34410A. Nové měřicí zařízení Agilent je zvoleno z důvodu větší rychlosti, oproti měřicí kartě Tedia PCA-1208 umístěné ve stávajícím PC a z důvodu nepoužitelnosti této karty v novějších operačních systémech. PC komunikuje s plotrem opět přes paralelní rozhraní LPT. Plotr je dále propojen s měřicím zařízením Agilent pomocí kroucené dvojlinky. Toto propojení slouží k přenosu naměřených hodnot. Agilent ukládá naměřené hodnoty do své paměti a dále posílá přes USB rozhraní do PC.



Obr. 6.1: Hardwarové řešení nového pracoviště LBIC

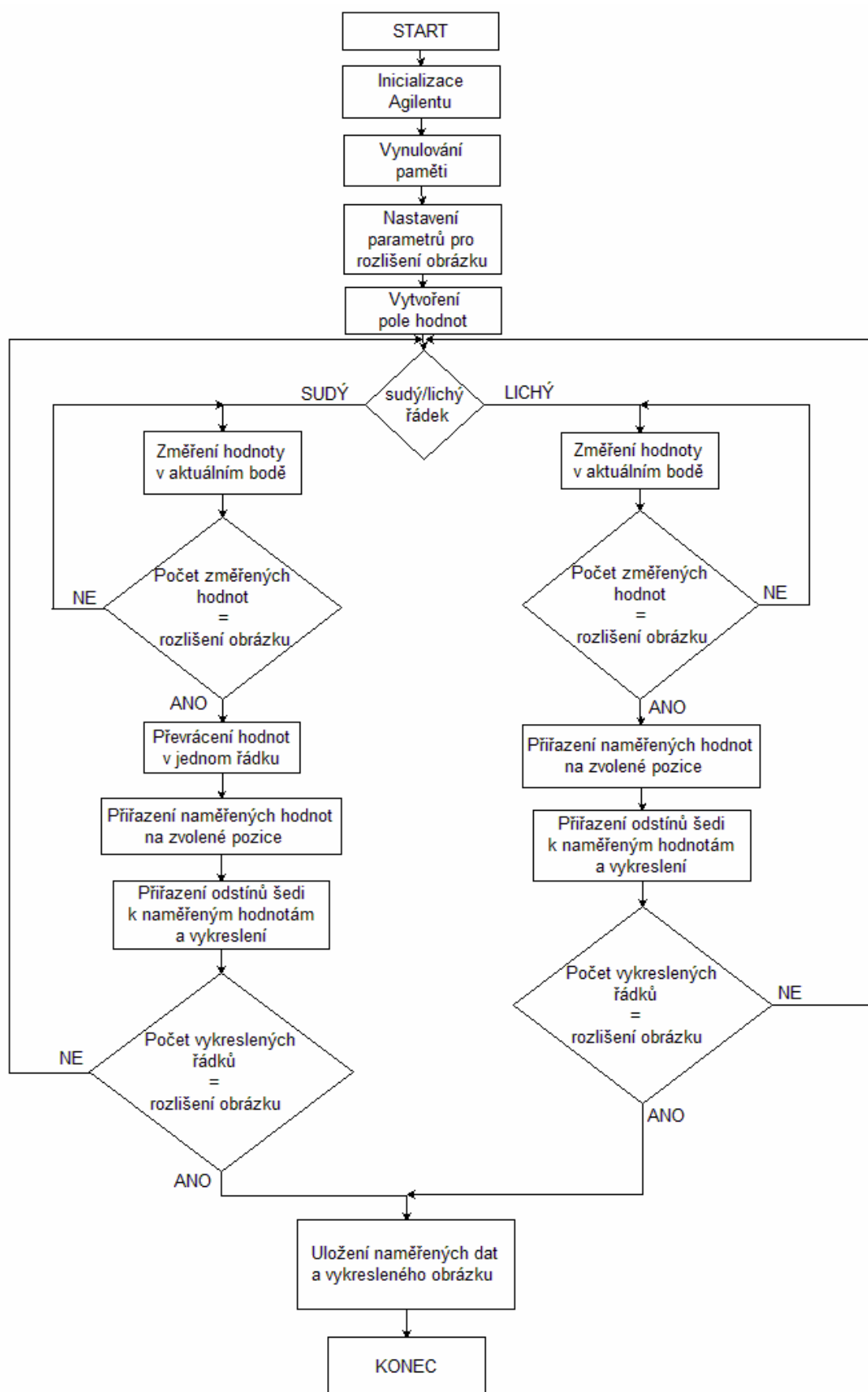
6.2 Realizace softwarové části měřicího pracoviště LBIC

Softwarová část pracoviště je řešena pomocí vývojového prostředí Labview 8.5. Bylo nutné realizovat obslužný program zajišťující sběr, ukládání a následné zpracování naměřených hodnot. Vývojový diagram programu je zobrazen na Obr. 6.2. Tento program komunikuje s měřicím zařízením Agilent 34410A, které obstarává sběr hodnot. Naměřené hodnoty jsou ukládány do samostatného souboru a také posílány dále ke zpracování a následnému vykreslení. Vykreslený solární článek je na konci měření uložen. Celý program je navržen tak, aby se mohl implementovat do části, která ovládá pohyb zaostřovacího pera plotru.

Na této inovaci pracoviště LBIC spolupracuji se studentem Bc. Martinem Řezníčkem, který bude realizovat právě část, která ovládá pohyb zaostřovacího pera plotru. Toto nové pracoviště by mělo zrychlit průběh celého měření, protože vykreslování skenovaného článku se nebude realizovat bod po bodu, jako tomu bylo u předešlé metody, ale po celých řádcích.

6.2.1 Způsob měření na pracovišti LBIC

Princip měření metodou LBIC na modifikovaném pracovišti nespočívá již ve skenování solárního článku bod po bodu, ale ve sběru hodnot v celém řádku s následným vykreslením všech hodnot v řádku najednou. Zaostřovací pero se posouvá stejným způsobem jako v předešlé metodě měření, ale jeho posun není závislý na době vykreslení jednoho bodu do výsledného obrázku. Naměřené hodnoty jsou posílány postupně do PC, kde jim jsou přiřazovány pozice pro vykreslení do výsledného obrázku. Po změření posledního bodu každého řádku solárního článku se všechny hodnoty z tohoto řádku posílají na další zpracování. Ke každé hodnotě je přiřazena příslušná barva z palety odstínů šedé. Hodnoty se následně vykreslí do výsledného obrázku a nakonec se výsledný obrázek i naměřené hodnoty uloží.

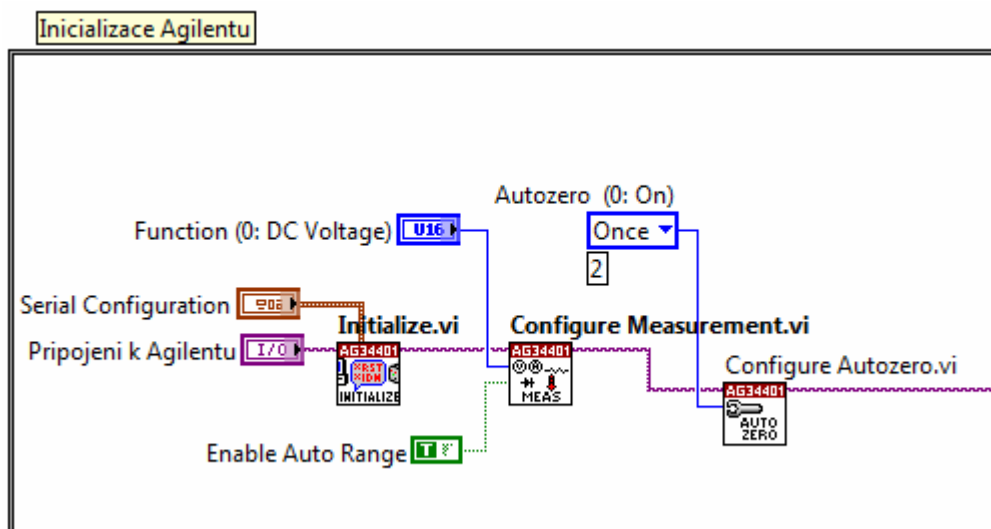


Obr. 6.2: Vývojový diagram programu

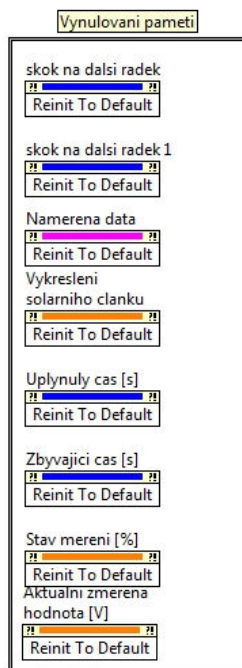
6.2.2 Popis programu

Kompletní program zajišťující sběr, ukládání a následné zpracování naměřených hodnot je zobrazen v Příloze 1. V následující části bude popsána každá část programu.

První částí programu je inicializace měřicího zařízení Agilent 34410A přes rozhraní USB (viz. Obr. 7.1). Zároveň s tímto krokem proběhne vynulování všech proměnných, které jsou obsaženy v tomto programu (viz. Obr. 7.2).

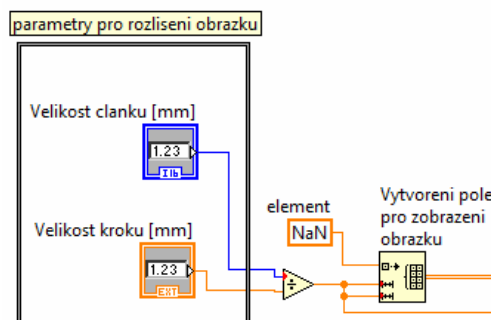


Obr. 7.1: Inicializace měřicího zařízení Agilent 34410A



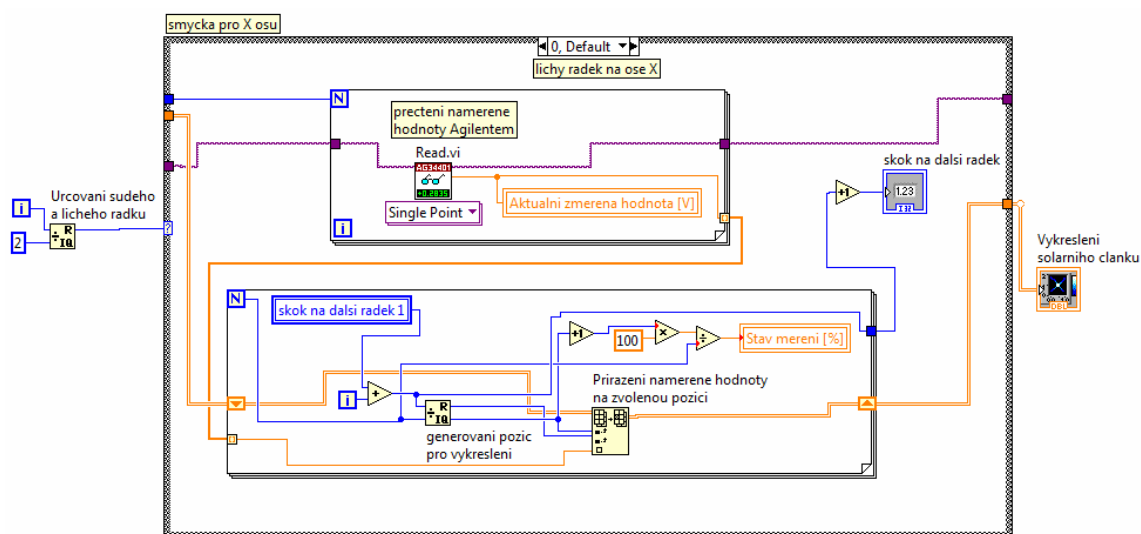
Obr. 7.2: Vynulování proměnných

Další část tvoří nastavení parametrů pro rozlišení skenovaného obrázku. Mezi tyto hodnoty patří velikost článku (v mm) a kroku posuvu pera (v mm). Tyto dvě hodnoty se následně vzájemně vydělí a vstupují do bloku Initialize Array, který slouží k vytvoření pole hodnot, do kterého se budou ukládat naměřené hodnoty (viz. Obr. 7.3).

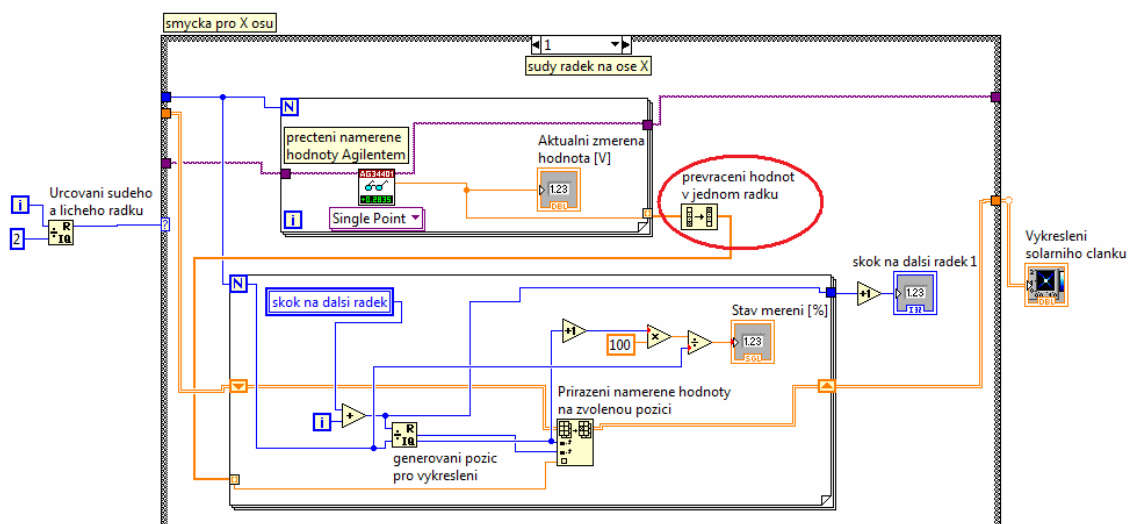


Obr. 7.3: Nastavení parametrů pro rozlišení obrázků

Následuje hlavní část programu, kterou tvoří smyčka určená pro posun v ose Y. Tato smyčka dále obsahuje dvě smyčky pro posun v ose X. První smyčka je určena pro sběr a zpracování hodnot v lichých řádcích (viz. Obr. 7.4) a druhá smyčka v sudých řádcích (viz. Obr. 7.5). Rozdělení programu pro práci s lichými a sudými řádky je nutné z důvodu měnícího se pohybu zaostřovacího pera plotru v každém druhém řádku. V lichých řádcích se pohybuje zaostřovací pero zleva doprava a v sudých naopak. Jelikož graf pro zobrazení skenovaného článku vykresluje hodnoty pouze zleva doprava bylo nutné pro posun zprava doleva tyto hodnoty v celém řádku převrátit. Toto převrácení hodnot obstarává blok Reverse 1D Array, který je znázorněn na Obr. 7.5.

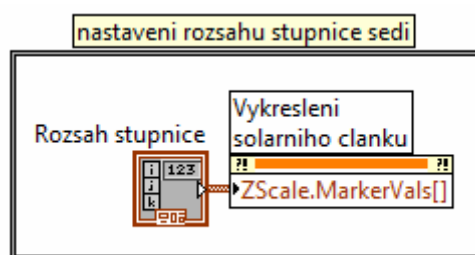


Obr. 7.4: Sběr a zpracování hodnot v lichém řádku



Obr. 7.5: Sběr a zpracování hodnot v sudém řádku

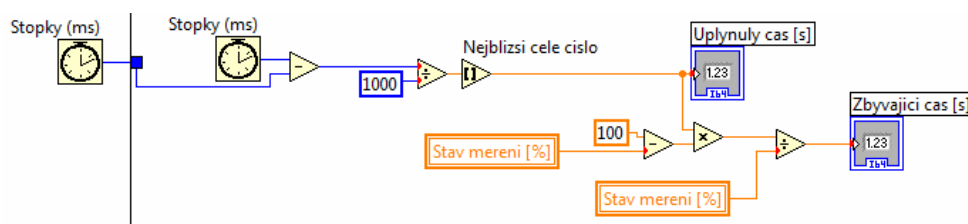
Mimo blok Reverse 1D Array jsou obě smyčky totožné. Zleva je ke smyčce připojen blok Quotient & Remainder, který určuje, zda se jedná o lichý nebo sudý řádek. Smyčka dále obsahuje dvě menší smyčky. První smyčka obstarává samotný sběr hodnot (pomocí bloku Read Agilent) a ukazatel aktuální změřené hodnoty. Druhá smyčka obsahuje generování pozic pro vykreslování v grafu, přiřazování naměřené hodnoty na zvolenou pozici a ukazatel stavu měření (v procentech). Na výstupu vpravo od smyčky je umístěn blok Intensity graph, který obstarává samotné vykreslení jednotlivých bodů solárního článku. K přiřazování naměřených hodnot k barvám ze stupnice šedé a k nastavení rozsahu stupnice šedé je používán blok Marker Values (viz. Obr. 7.6).



Obr. 7.6: Přiřazování barev k hodnotám a nastavení rozsahu stupnice šedé

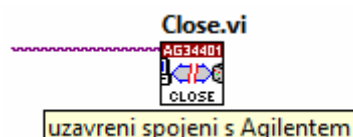
Další částí programu je indikátor uplynulého času měření (v sekundách) a indikátor zbývajcího času měření (v sekundách). Tato část je umístěna v hlavní smyčce pro osu Y, proto se časy aktualizují po vykreslení každého řádku. Indikátor uplynulého času měření pracuje na principu porovnávání času před vykonáním smyčky a času po vykonání smyčky. Indikátor zbývajcího času měření se dopočítá

z hodnoty uplynulého času a z hodnoty stavu měření vyjádřeného v procentech (viz. Obr. 7.7).

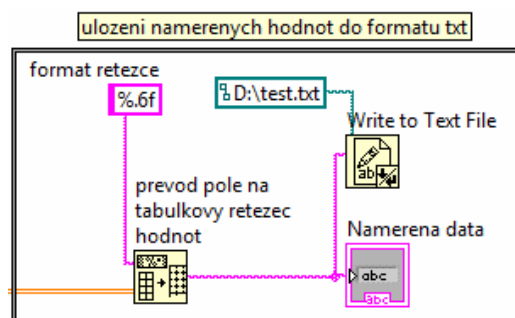


Obr. 7.7: Zobrazení uplynulého a zbývajcího času měření

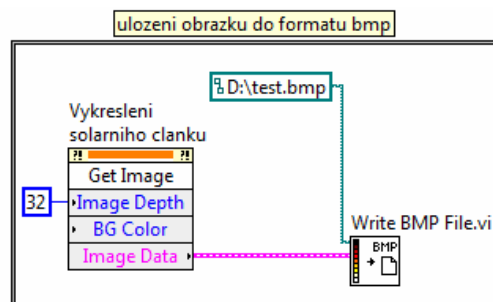
Poslední část programu je určena pro uzavření komunikace s měřícím zařízením Agilent 34410A (viz. Obr. 7.8), zobrazení a uložení naměřených hodnot (viz. Obr. 7.9) a uložení vykresleného solárního článku (viz. Obr. 7.10). Naměřené hodnoty jsou zobrazeny a uloženy s přesností na 6 desetinných míst. Uložení je provedeno do textového souboru s příponou txt. Uložení obrázku s vykresleným solárním článkem je provedeno do souboru s příponou bmp.



Obr. 7.8: Uzavření komunikace s měřícím zařízením Agilent 34410A



Obr. 7.9: Zobrazení a uložení naměřených hodnot



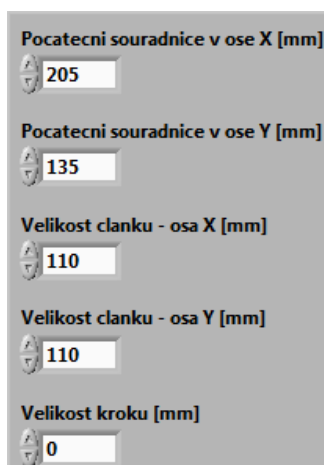
Obr. 7.10: Uložení vykresleného solárního článku

6.2.3 Uživatelské prostředí kompletního programu pracoviště LBIC

V předchozí podkapitole byly popsány jednotlivé části programu. V této podkapitole budou uvedeny jednotlivé části uživatelského prostředí, ve kterém se nastavují patřičné hodnoty pro měření a je zde zobrazeno vykreslování solárního článku a naměřených hodnot. Kompletní vzhled uživatelského prostředí je zobrazen v Příloze 2.

Uživatelské prostředí se skládá ze tří částí. První částí je *Ovládací panel*, na kterém jsou umístěny tyto komponenty:

- a) panel pro nastavení počátečních souřadnic měření, velikosti článku a velikosti kroku posuvu zaostřovacího pera (viz. Obr. 7.11)

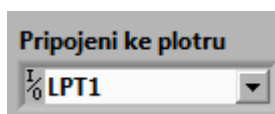


The screenshot shows a control panel with five input fields, each preceded by a small circular icon with a vertical line. The fields are labeled as follows:

- Pocatecni souradnice v ose X [mm]: 205
- Pocatecni souradnice v ose Y [mm]: 135
- Velikost clanku - osa X [mm]: 110
- Velikost clanku - osa Y [mm]: 110
- Velikost kroku [mm]: 0

Obr. 7.11: Nastavení počátečních souřadnic, velikosti článku a velikosti kroku

- b) panel pro nastavení portu pro připojení plotru (viz. Obr. 7.12)



The screenshot shows a panel titled 'Připojení ke plotru'. It contains a dropdown menu with the text 'LPT1' and a small square button to its right.

Obr. 7.12: Připojení k plotru

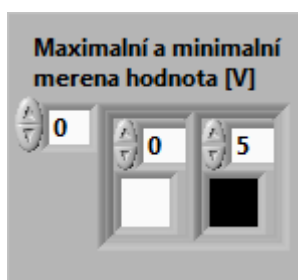
- c) panel pro nastavení portu pro připojení měřícího zařízení Agilent 34410A (viz. Obr. 7.13)



The screenshot shows a panel titled 'Připojení k Agilentu'. It contains a dropdown menu with the text 'USB0::0x0957:' and a small square button to its right.

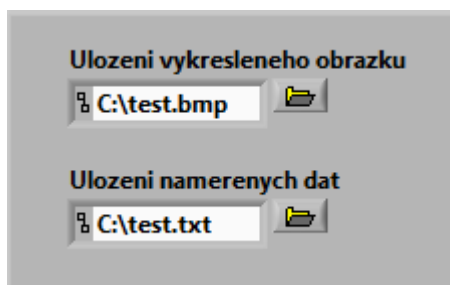
Obr. 7.13: Připojení k Agilentu 34410A

- d) panel pro nastavení rozsahu měření a rozsahu stupnice šedé (viz. Obr. 7.14)



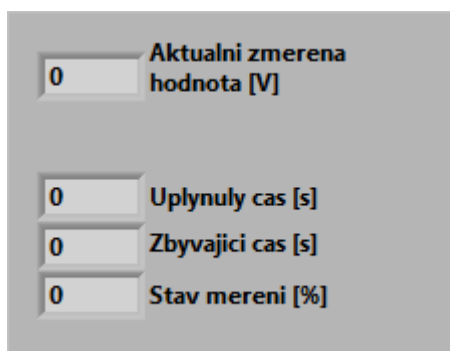
Obr. 7.14: Nastavení rozsahu měření a rozsahu stupnice šedé

- e) panel pro nastavení místa uložení naměřených dat a vykresleného obrázku (viz. Obr. 7.15)



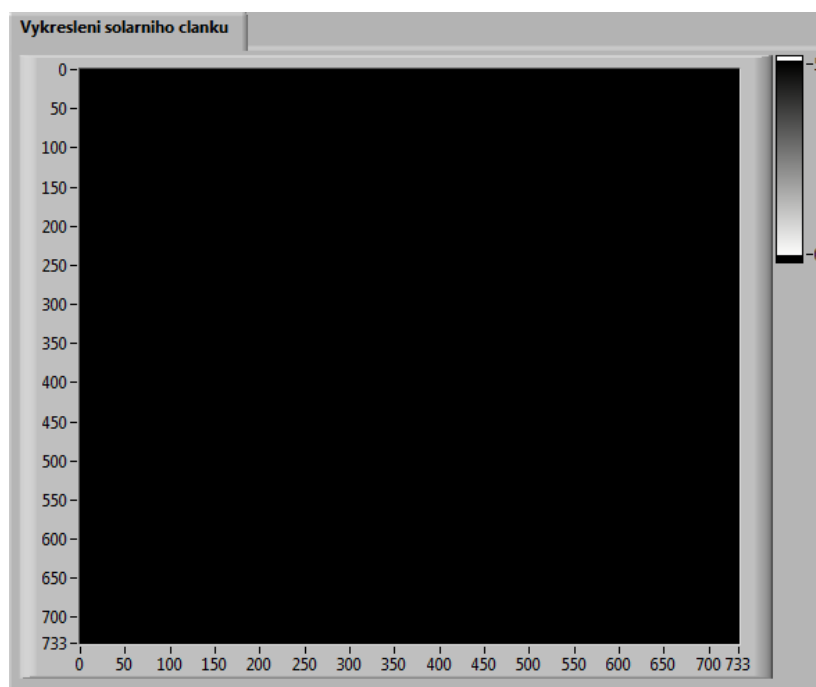
Obr. 7.15: Nastavení místa uložení

- f) panel ukazující aktuální změřenou hodnotu, uplynulý a zbývající čas měření a stav měření vyjádřený v procentech (viz. Obr. 7.16).



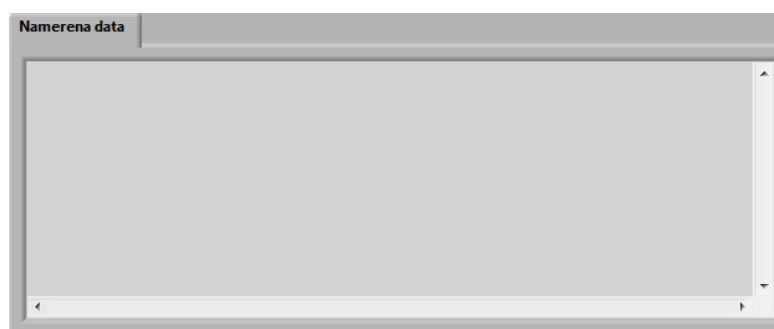
Obr. 7.16: Informační panel

Druhou částí je panel *Vykreslení solárního článku* (viz. Obr. 7.17), na kterém je umístěn graf. V tomto grafu se vykreslují jednotlivé body ze stupnice šedé. Rozlišení grafu se mění automaticky s nastavením velikosti solárního článku a kroku posuvu. V pravém horním rohu grafu je umístěna nastaven rozsah měření a stupnice šedé.



Obr. 7.17: Graf pro vykreslení solárního článku

Třetí částí je panel *Naměřená data* (viz. Obr. 7.18), na kterém je umístěno pole. Do toho pole se zobrazí, po skončení měření, všechny naměřené hodnoty s přesností na 6 desetinných míst.



Obr. 7.18: Zobrazení naměřených hodnot

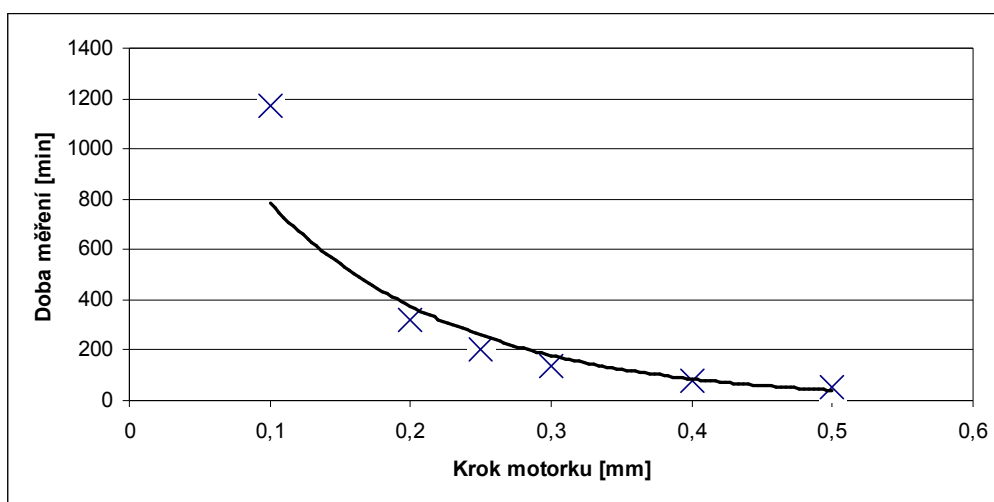
7 Výsledky měření na modifikovaném pracovišti LBIC

V této kapitole je uvedeno měření na modifikovaném pracovišti LBIC. Stejně jako předchozí měření je toto měření orientováno hlavně na časovou délku měření, než na detekci vad solárních článků.

Pro měření jsem si zvolil stejný 5-ti palcový monokrystalický článek (viz. Obr. 1.1). Měření je opět provedeno pro šest různých velikostí kroku motorku, který posouvá zaostřovacím perem a ke každému měření je zaznamenána doba měření a kvalita změřeného článku. Kroky jsou voleny stejně jako v předešlém měření. Změřené časy pro jednotlivé kroky motorku jsou uvedeny v Tab. 8.1 a vyneseny do Grafu 8.1.

Krok motorku [mm]	Doba měření [min]
0,5	55
0,4	80
0,3	140
0,25	205
0,2	320
0,1	1170

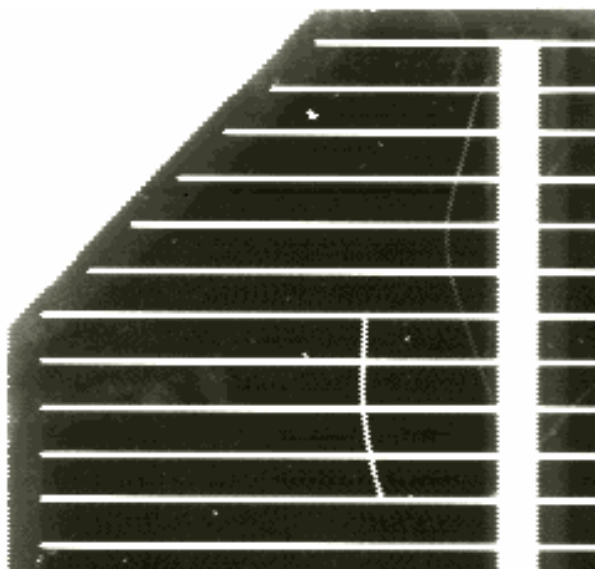
Tab. 8.1: Přehled časů měření v závislosti na kroku motorku



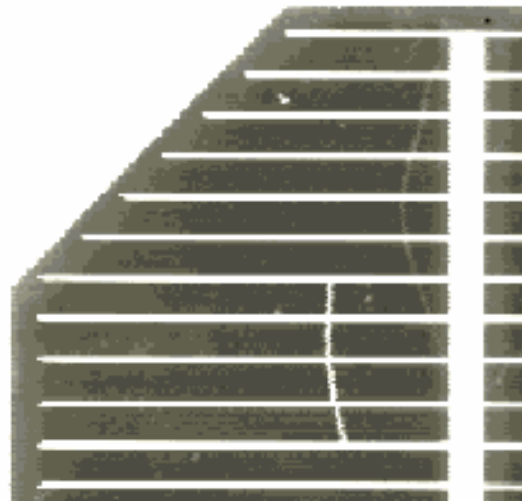
Graf 8.1: Závislost doby měření na zvoleném kroku motorku

Na Obr. 8.1 až Obr. 8.3 jsou zobrazeny jednotlivé výsledky měření, které jsou dále graficky upraveny, aby nalezený defekt byl lépe znatelný. Jak už bylo zjištěno v minulém měření, na testovacím článku se nachází vada poškrábání vnějšího

povrchu. Stejně jako v předchozím měření je vada dobře znatelná do kroku 0,25 mm a při větších krocích je již nerozpoznatelná.

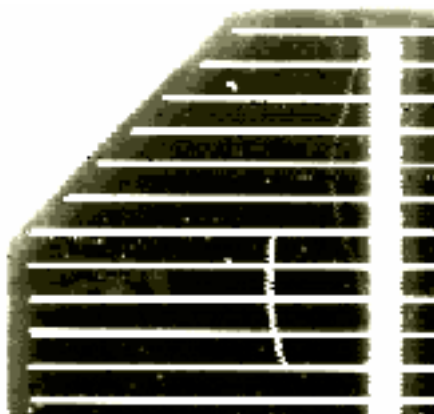


a)

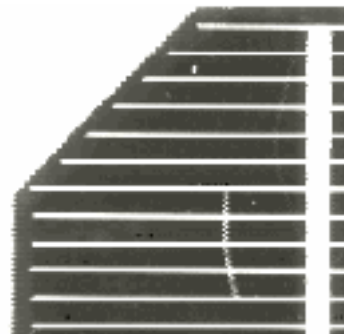


b)

Obr. 8.1: Výsledky měření – a) Krok 0,1 mm, b) Krok 0,2 mm

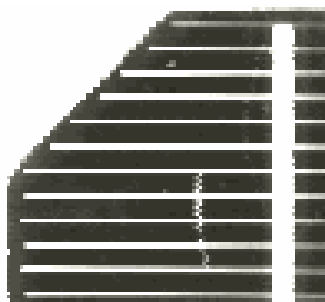


a)

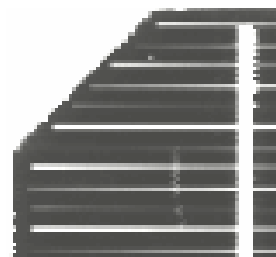


b)

Obr. 8.2: Výsledky měření – a) Krok 0,25 mm, b) Krok 0,3 mm



a)



b)

Obr. 8.3: Výsledky měření – a) Krok 0,4 mm, b) Krok 0,5 mm

8 Porovnání výsledků měření

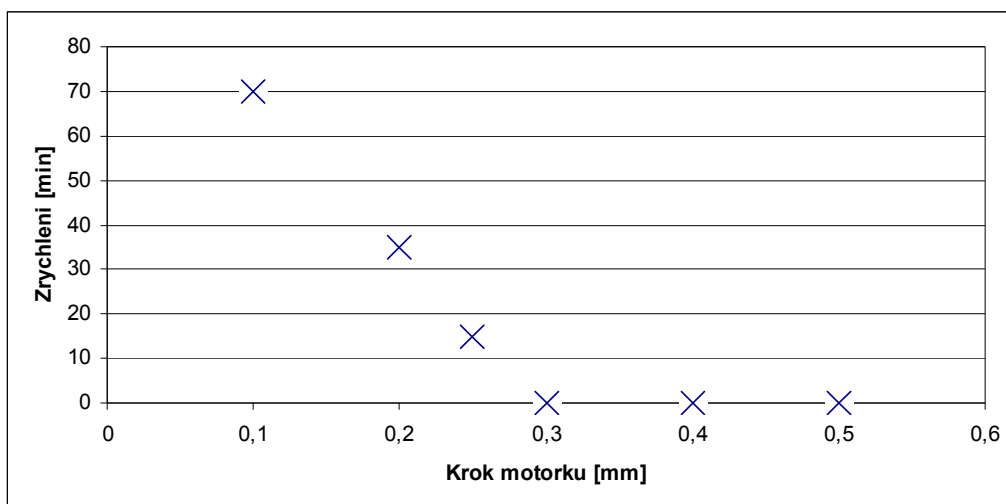
V této kapitole se budu zabývat porovnáním výsledků měření na stávajícím a modifikovaném pracovišti LBIC. Hlavním předmětem porovnávání bude doba měření na obou pracovištích při různých krocích motorku a dále kvalita vykreslení skenovaného článku.

Stávající metoda měření na pracovišti LBIC je založena na skenování solárního článku bod po bodu, kdy zaostřovací pero se posune do další pozice až po vykreslení změřené hodnoty do výsledného obrázku. Modifikovaná metoda měření na pracovišti LBIC je založena také na skenování solárního článku bod po bodu, ale zaostřovací pero nejprve změří hodnoty v celém řádku článku a poté jsou tyto hodnoty najednou vykresleny do výsledného obrázku.

Tento rozdíl mezi pracovišti je hlavním aspektem zrychlení měření na modifikovaném pracovišti. Dalším aspektem zrychlení modifikovaného pracoviště je bezpochyby využití výkonnějšího PC a měřícího zařízení Agilent 34410A. Srovnání časů měření pro jednotlivé kroky motorku a hodnoty zrychlení jsou uvedeny v Tab. 9.1. Hodnoty zrychlení jsou dále vyneseny do Grafu 9.1.

Krok motorku [mm]	Doba měření [min] Stávající pracoviště	Doba měření [min] Modifikované pracoviště	Zrychlení [min]
0,5	55	55	0
0,4	80	80	0
0,3	140	140	0
0,25	220	205	15
0,2	355	320	35
0,1	1240	1170	70

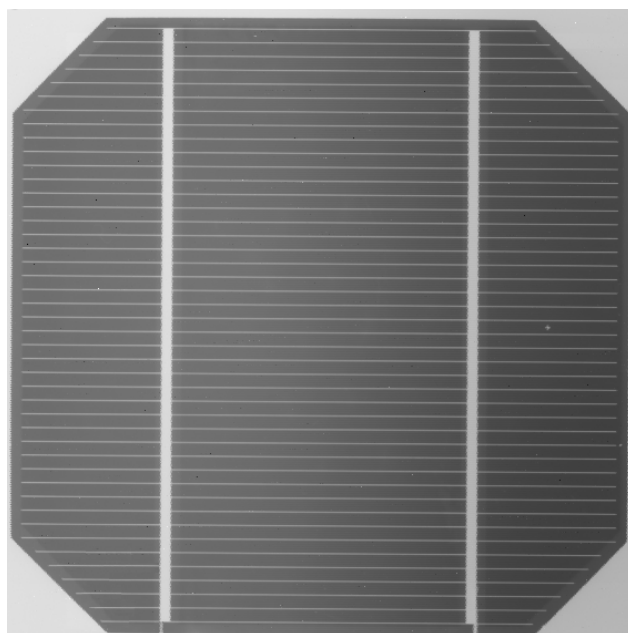
Tab. 9.1: Přehled časů měření a hodnot zrychlení v závislosti na kroku motorku



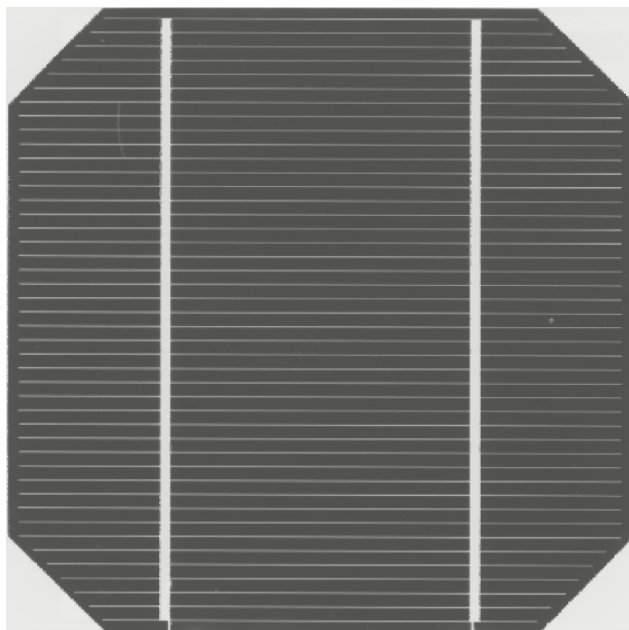
Graf 9.1: Závislost zrychlení na zvoleném kroku motorku

Z Grafu 9.1 je patrné, že hodnoty zrychlení jsou při malých krocích nulové. U těchto kroků se zrychlení pohybuje v řádech sekund a to z důvodu malého počtu měřených hodnot, proto jsou tyto hodnoty zaokrouhleny na nulu. Od kroku 0,25 mm mají hodnoty zrychlení s rostoucím krokem motorku téměř lineární růst.

Druhým předmětem porovnávání měření na obou pracovištích je kvalita vykresleného článku. Pro porovnání kvality vykreslování jsem zvolil solární článek skenovaný při kroku 0,25 mm. Článek vykreslený na stávajícím pracovišti je zobrazen na Obr. 9.1 a článek vykreslený na modifikovaném pracovišti je zobrazen na Obr. 9.2. Při porovnání těchto výsledků lze konstatovat, že na modifikovaném pracovišti probíhá stejně kvalitní měření jako na stávajícím pracovišti.



Obr. 9.1: Vykreslený solární článek (stávající pracoviště) – krok 0,25mm



Obr. 9.2: Vykreslený solární článek (modifikované pracoviště) – krok 0,25mm

Závěr

Cíle této diplomové práce byly seznámit se s funkcí solárního článku, diagnostickými metodami měření solárních článků, zejména s metodou LBIC a navrhnout a následně realizovat modifikaci měřicího pracoviště LBIC na VUT, tak aby bylo pracoviště složeno z modernějších komponent, jako jsou výkonnější PC pro obslužný program a moderní měřicí zařízení Agilent 34410A. Zároveň by mělo toto pracoviště splňovat rychlejší měření solárního článku.

K zvládnutí první části úkolu byla nápomocná exkurze do firmy Solartec s.r.o., kde byla možnost získat mnoho informací o výrobě a testování solárních článků. Tyto informace byly později použity v této práci. Dále byly podrobně prostudovány funkce stávajícího pracoviště LBIC a provedena na něm měření, která později posloužila ke srovnání s novým pracovištěm.

Hlavním úkolem bylo navržení hardwarového řešení nového pracoviště, které se vyznačuje použitím novějších a výkonnějších komponent oproti stávajícímu pracovišti. K novému pracovišti byl vyvinut ve vývojovém prostředí Labview 8.5 obslužný program, který řeší sběr a zpracování naměřených dat. Na tomto pracovišti byla provedena testovací měření.

V poslední části byly srovnány výsledky měření z obou pracovišť. Výsledkem je celkové zlepšení uživatelské obsluhy zařízení, jako jsou např. větší přehlednost a stabilita programové části. Nejdůležitější rozdíl oproti stávajícímu pracovišti je zrychlené měření modifikované verze při srovnatelné kvalitě vykresleného solárního článku.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Monokrystalický článek – a) Pohled zepředu, b) Pohled zezadu	9
Obr. 1.2: Polykrystalický článek.....	9
Obr. 1.3: Pružný solární článek s příměsí polymeru	10
Obr. 1.4: Struktura fotovoltaického článku	11
Obr. 1.5: Náhradní schéma fotovoltaického článku	11
Obr. 2.1: Vírový defekt.....	13
Obr. 2.2: Vnitřní pnutí materiálu.....	14
Obr. 2.3: Výskyt prachových částic v solárním článku	14
Obr. 2.4: Povrchové poškrábání a poškození hrany článku	15
Obr. 2.5: Nehomogenita difúzní vrstvy	15
Obr. 3.1: Zapojení měřícího pracoviště – metoda elektroluminiscence	18
Obr. 3.2: Zapojení měřícího pracoviště LBIV.....	20
Obr. 4.1: Zapojení měřícího pracoviště LBIC.....	21
Obr. 4.2: Program na obsluhu měření metodou LBIC	22
Obr. 4.3: Upravený plotr Mutoh IP210	22
Obr. 4.4: a) Zaostrňovací pero připevněné ve speciálním držáku , b) LED dioda.....	22
Obr. 5.1: Výsledky měření – a) Krok 0,1 mm, b) Krok 0,2 mm	25
Obr. 5.2: Výsledky měření – a) Krok 0,25 mm, b) Krok 0,3 mm	25
Obr. 5.3: Výsledky měření – a) Krok 0,4 mm, b) Krok 0,5 mm	26
Obr. 6.1: Hardwarové řešení nového pracoviště LBIC	27
Obr. 6.2: Vývojový diagram programu	29
Obr. 7.1: Inicializace měřícího zařízení Agilent 34410A	30
Obr. 7.2: Vynulování proměnných	30
Obr. 7.3: Nastavení parametrů pro rozlišení obrázků	31
Obr. 7.4: Sběr a zpracování hodnot v lichém řádku.....	31
Obr. 7.5: Sběr a zpracování hodnot v sudém řádku	32
Obr. 7.6: Přiřazování barev k hodnotám a nastavení rozsahu stupnice šedé.....	32
Obr. 7.7: Zobrazení uplynulého a zbývajcího času měření.....	33
Obr. 7.8: Uzavření komunikace s měřícím zařízením Agilent 34410A.....	33
Obr. 7.9: Zobrazení a uložení naměřených hodnot	33
Obr. 7.10: Uložení vykresleného solárního článku	33
Obr. 7.11: Nastavení počátečních souřadnic, velikosti článku a velikosti kroku	34

Obr. 7.12: Připojení k plotru.....	34
Obr. 7.13: Připojení k Agilentu 34410A	34
Obr. 7.14: Nastavení rozsahu měření a rozsahu stupnice šedé	35
Obr. 7.15: Nastavení místa uložení	35
Obr. 7.16: Informační panel	35
Obr. 7.17: Graf pro vykreslení solárního článku	36
Obr. 7.18: Zobrazení naměřených hodnot.....	36
Obr. 8.1: Výsledky měření – a) Krok 0,1 mm, b) Krok 0,2 mm	38
Obr. 8.2: Výsledky měření – a) Krok 0,25 mm, b) Krok 0,3 mm	38
Obr. 8.3: Výsledky měření – a) Krok 0,4 mm, b) Krok 0,5 mm	38
Obr. 9.1: Vykreslený solární článek (stávající pracoviště) – krok 0,25mm.....	40
Obr. 9.2: Vykreslený solární článek (modifikované pracoviště) – krok 0,25mm.....	41

Seznam literatury

- [1] LIBRA, M.; POULEK, V. *Solární energie*, Praha, 2006, Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [2] TIWARI, A. N. *High efficiency thin film solar cells on flexibel polymer sheet* [online]. 2008. Dostupné na www.tfp.ethz.ch/PV/HESC/HESC.html.
- [3] MURTINGER, K.; BERANOVSKÝ, J.; TOMEŠ, M. *Fotovoltaika - elektrina ze slunce*, Brno, 2007, ERA.
- [4] HEGEDUS, L.; LUQUE, A. *Handbook of photovoltaic science and engineering*, Great Britain, 2003, John Wiley and Sons.
- [5] BENDA, V. *Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky* [online]. 2006, září. Dostupné na www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3553&h=13&pl=49
- [6] *Jak měříme solární články* [online]. Dostupné na www.solartec.cz/cs/projekty/zajimavosti/mereni-clanku.html
- [7] KAZELLE, J.; LIEDERMANN, K.; JIRÁK, J.; HAVLÍČEK, S.; VANĚK, J.; ROZSÍVALOVÁ, Z.; SEDLAŘÍKOVÁ, M. *Materiály a výrobní procesy*, Brno, 2001, Vysoké učení technické v Brně.
- [8] *Chlazená CCD kamera na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně* [online]. 2007, prosinec. Dostupné na <http://ccd.mii.cz/art?id=330&lang=405>
- [9] HAVLÍČEK, J.; VLACH, J.; VLACH, M.; VLACHOVÁ, V. *Začínáme s LabVIEW*, Brno, 2008, BEN.

Abecední přehled použitých zkratk, veličin a symbolů

CCD – elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace

Labview – vývojové prostředí

LBIC – diagnostická metoda založena na snímání proudu

LBIV – diagnostická metoda založena na snímání napětí

LED dioda – elektroluminiscenční dioda

LPT – paralelní port

PN přechod – oblast na rozhraní příměsového polovodiče typu P a N

USB – univerzální sériová sběrnice

Seznam příloh

Příloha 1: Program pro sběr, ukládání a následné zpracování naměřených hodnot

Příloha 2: Uživatelské prostředí programu