

České vysoké učení technické v Praze
fakulta elektrotechnická
katedra mikroelektroniky



Diplomová práce

Metody LBIC a LBIV

Autor: Bc. Ondřej Škvor

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Š K V O R Ondřej**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Metody LBIC a LBIV**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši zabývající se metodami LBIC a LBIV *)
2. Rekonstruuje existující pracoviště pro měření metodou LBIC a LBIV.
3. Proveďte měření vzorků fotovoltaických článků pomocí metod LBIC a LBIV a naměřené výsledky komentujte.

*) Ligh-Beam-Induced Current a Ligh-Beam-Induced Voltage

Seznam odborné literatury:

- [1] Odborné články dostupné z databází systému „Brána EIZ„
- [2] Asresahegn, A. - Benda, V. - Hrzina, P. Diagnostics of Large Area Solar Cell Homogeneity by Local Irradiation In: Proceedings of Workshop 2003. Prague: CTU, 2003, vol. B, p. 760-761. ISBN 80-01-02708-2.

Vedoucí: **Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 28. 1. 2014

Obsah:

1	Seznam použitých symbolů a zkratk	4
2	Úvod	5
3	Teoretická část	5
3.1	Fotovoltaický článek	5
3.1.1	Princip fotovoltaických článků	6
3.1.2	Fyzické uspořádání fotovoltaických článků	8
3.1.3	Fotovoltaické články	9
3.1.4	Základní parametry fotovoltaických článků	11
3.1.5	Ztráty ve fotovoltaických článcích	15
3.2	Lasery	18
3.2.1	Princip	18
3.2.2	Parametry laseru	19
3.2.3	Stabilita laserů	20
3.3	Měření napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} na fotovoltaických článcích	20
3.4	Metody LBIV, LBIC	20
3.4.1	Metoda LBIV	20
3.4.2	Metoda LBIC	21
3.4.3	Profesionální diagnostická zařízení	21
3.4.4	Parametry LBIV a LBIC	23
4	Praktická část	24
4.1	Původní pracoviště	24
4.2	Navržené pracoviště	25
4.3	Princip fungování navrženého pracoviště	25
4.4	Prvky navrženého pracoviště a jejich funkce	27
4.4.1	Napájecí zdroj	27
4.4.2	Vstupně výstupní rozhraní	32
4.4.3	Plotr	37
4.4.4	Multimetr	37
4.4.5	Osobní počítač	37
4.4.6	Zdroje záření	38
4.5	Program	38
4.5.1	Uživatelské rozhraní	39
4.5.2	Parametry realizovaného pracoviště	41
5	Měření na pracovišti LBIV, LBIC	42
5.1	Měřicí režimy pracoviště	42
5.2	Výsledky měření	44

6	Závěr.....	45
7	Zdroje	46
8	Seznam obrázků a tabulek.....	47
9	Přílohy	48

1 Seznam použitých symbolů a zkratek

α	absorpční koeficient
λ	vlnová délka
τ_N, τ_P	doba života nosičů náboje
ζ	emisní koeficient
A	plocha PV článku
c	rychlost šíření světla ve vakuu
E_0	energie záření na povrchu Země
E_F	Fermiho hladina
E_G	šířka zakázaného pásma
E_C	energie vodivostního pásma
E_V	energie valenčního pásma
E_{PH}	energie fotonu
f	frekvence
G	generace nosičů
h	Planckova konstanta
I_0	saturační proud
I_{sc}	proud nakrátko (zkratový)
I_{MP}	proud v bodě maximálního výkonu
J	proudová hustota
J_{01}	difuzní proudová hustota
J_{02}	generačně-rekombinační proudová hustota
J_{SR}	proudová hustota na povrchu SČ
k	Boltzmannova konstanta
MPP	bod maximálního výkonu
Δn	přírůstek koncentrace elektronů
q	elementární náboj
R_s	sériový odpor PV článku
R_p	paralelní odpor PV článku
T	teplota
U_{0C}	napětí naprázdno
U_{MP}	napětí v bodě maximálního výkonu
ν	frekvence světla
W	energie záření
X_L	absorpční délka

2 Úvod

Vzrůstající spotřeba energie, otázky spojené s ochranou životního prostředí a také reálná hrozba vyčerpání zdrojů fosilních paliv vedly ve 2. polovině 20. století k nové vlně zájmu o možnost získávání energie i z jiných, zejména tzv. obnovitelných zdrojů. Jedním z odvětví obnovitelných zdrojů je i fotovoltaika. Výzkum ve fotovoltaickém průmyslu je dnes mimo jiné zaměřen na zlepšování parametrů sériově vyráběných fotovoltaických článků. Pro jejich diagnostiku jsou mimo jiné používány metody pro vyhodnocení lokálních chyb těchto článků. Jednou z metod je i metoda lokálního ozařování LBI (LBIV, LBIC).

3 Teoretická část

LBI (Light Beam Induced) je nedestruktivní měřicí metoda, která nám poskytuje řadu informací o kvalitě technologických operací fotovoltaických článků.

Abychom se mohli zabývat metodou LBI, je nutné si přiblížit princip základních prvků této metody a to fotovoltaického článku (základní vlastnosti a jeho strukturu), zdroje záření (spektrum, stabilitu) a správné podmínky pro měření napětí a proudů na fotovoltaickém článku.

Pod pojmem fotovoltaický článek si lze představit velkoplošnou diodu s PN přechodem upraveným tak, aby mohl absorbovat elektromagnetické záření. Při ozáření se uplatňuje fotovoltaický jev, pomocí kterého se uvolňují nosiče náboje. Dochází tak k přeměně slunečního záření na energii elektrickou.

3.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je velkoplošný polovodičový prvek, který konvertuje elektromagnetické záření na elektrickou energii. Pokud na článek dopadají fotony o větší energii než je velikost zakázaného pásu, jsou generovány páry elektron-díra. Páry elektron-díra generované v oblasti přechodu PN jsou od sebe odděleny elektrickým polem mezi vázanými prostorovými náboji. Díry jsou urychleny ve směru pole a elektrony opačně. Na svorkách fotovoltaického článku se objeví elektrické napětí a po uzavření elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný elektrický proud.

3.1.1 Princip fotovoltaických článků

Princip fotovoltaických článků lze rozdělit do dvou hlavních částí. První částí je vytvoření párů elektron – díra způsobené absorpcí elektromagnetického záření (fotonů) v materiálu. Ve druhé části pak jejich oddělení na volné elektrony a díry a přesunutí na kontakty fotovoltaického článku.

3.1.1.1 Absorpce elektromagnetického záření

Absorpce (předání energie) elektromagnetického záření (fotonů) je způsobena interakcí elektromagnetického záření s částicemi hmoty polovodiče. Energie dopadajících fotonů musí být však větší, než šířka zakázaného pásu polovodiče (E_g). Ta je dána rozdílem energií mezi vodivostním pásmem (E_c) a pásmem valenčním (E_v) viz obr. č. 1. Pro určitý materiál je šířka zakázaného pásma (E_g) materiálovou konstantou (závislá na teplotě). Energie fotonů (E_{PH}) je dána jeho frekvencí (1), kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence světla (čím větší vlnové délky, tím menší energie). Pro vyjádření energie dopadajícího záření v elektronvoltech musíme energii (E_{PH}) podělit elementárním nábojem (2).

$$E_{PH} = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

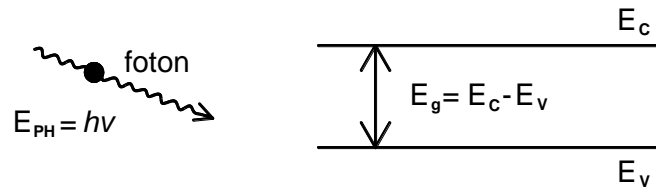
$$E_{PH}(eV) = \frac{E_{PH}}{q} \quad (2)$$

Při ozáření polovodiče fotony s různou energií a uvažování konstantní šířky zakázaného pásma (při konstantní teplotě) můžou nastat tři případy:

$E_{PH} = E_g$: V tomto případě dojde k absorpci fotonu a generaci páru elektron – díra bez ztráty energie.

$E_{PH} > E_g$: V tomto případě dojde k absorpci fotonu a generaci páru elektron – díra. Přebytečná energie $E_{PH} - E_g$ se přemění na teplo. V určitých případech ($E_{PH} \gg E_g$) může dojít k vytvoření druhého páru elektron – díra.

$E_{PH} < E_g$: V tomto případě energie fotonu není dostatečná a nedochází k absorpci a generaci páru elektron - díra. Foton s nedostatečnou energií nereaguje s mřížkou polovodiče a materiálem prochází.



Obr. 1 Energie fotonu E_{PH} a energie šířky zakázaného pásma E_G

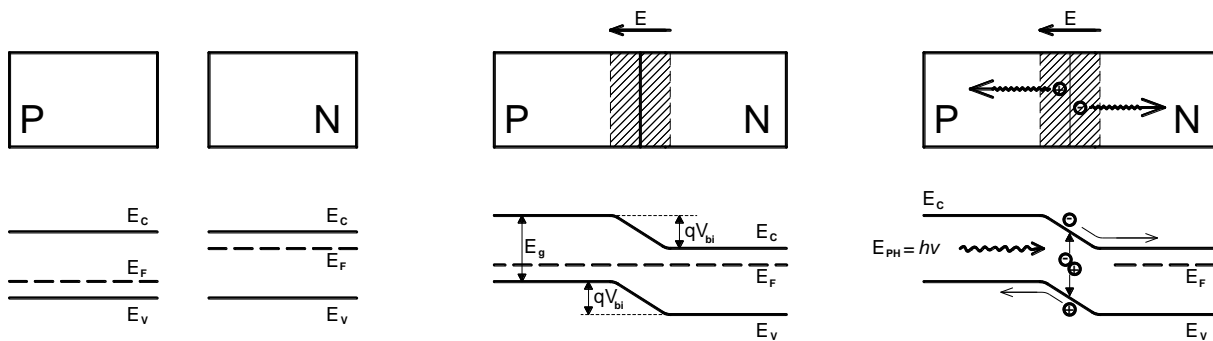
3.1.1.2 Separace elektronů a děr

Dříve než se začneme zabývat generací volných nosičů náboje (elektronů a děr) je důležité si uvědomit, že nejdříve musí dojít k absorbování elektromagnetického záření (fotonů) a generaci párů elektron – díra v polovodiči (kapitola 3.1.1.1).

Cílem separace je rozdělit páry elektron – díra na volné nosiče náboje, a poté je přemístit. Elektrony na jednu stranu, díry na stranu opačnou. Toho se docílí vytvořením elektrického pole v polovodiči. Protože mají elektrony a díry opačný elektrický náboj, působením elektrického pole jsou díry urychleny jedním směrem a elektrony směrem opačným. U fotovoltaických článků se používá k vytvoření elektrického pole PN přechod.

Přechodu mezi polovodiči s různou vodivostí říkáme PN přechod. Podle typu nosiče náboje dělíme polovodiče na vlastní a příměsové. Příměsové polovodiče mohou být dotované typu N (majoritní nosiče náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritní nosiče jsou díry). Pokud dojde ke spojení odlišně dotovaných polovodičů, tak volné nosiče náboje (elektrony a díry) mají snahu podle zákonitosti difúze unikat z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací a vytvořit oblast prostorového náboje (PN přechod). Tato oblast bez dopadajících fotonů (světla) zůstává v termodynamické rovnováze. Přivedeme-li na fotovoltaický článek elektromagnetické záření s dostatečnou energií (větší než šířka zakázaného pásu), dopadající záření je absorbováno a generuje páry elektron – díra. Páry elektron – díra generované v oblasti PN přechodu jsou roztrženy elektrickým polem (mezi vázaným prostorovým nábojem). Uvolněné nosiče náboje jsou odváděny ve směru pole E (P se nabíjí kladně, N záporně).

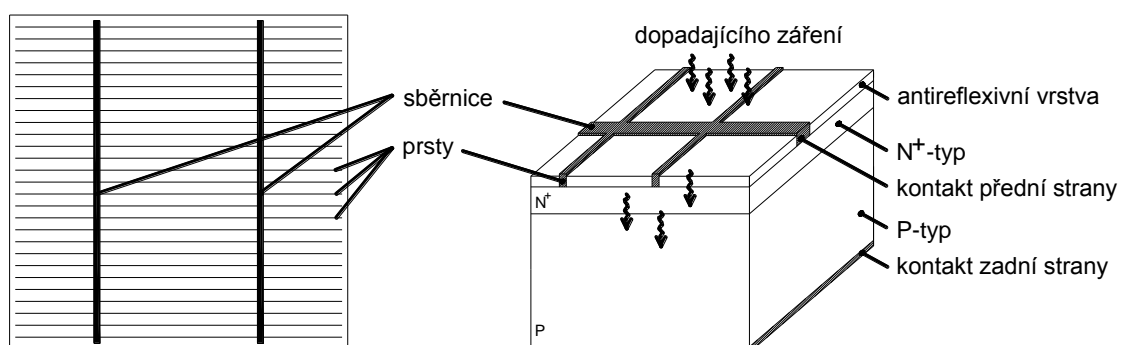
Lze tedy říci, že vznik fotovoltaického napětí je vázán na existenci vnitřního elektrického pole, které rozdělí páry elektron-díra.



Obr. 2 Princip vzniku elektrického pole a nosičů náboje v polovodiči.

3.1.2 Fyzické uspořádání fotovoltaických článků

U většiny objemových křemíkových fotovoltaických článků (multikrystalické, monokrystalické) se používá základní materiál polovodič typu P společně s hodně dopovaným polovodičem typu N (označení N^+). Oba polovodiče tvořící PN přechod a jsou kontaktovány tenkou vrstvou vodivého materiálu. Polovodič typu P je kontaktován souvislou vrstvou vodivého materiálu nejčastěji hliníku, jedná se o zadní kontakt fotovoltaického článku, a proto není nutné, aby propouštěl záření. Naopak kontaktování polovodiče typu N musí být transparentní (musí propouštět světlo). Nejen že kontakt přední strany musí propouštět co možná nejvíce záření (musí zabírat co možná nejmenší plochu), ale také musí odvést generovaný proud (odpovídající průřez vodivého materiálu). Optimalizace (vyvážení) obou požadavků se provádí strukturou kontaktování složenou ze „sběrnice“ a „prstů“ viz obr. č. 3.



Obr. 3 Fyzické uspořádání fotovoltaického článku

Protože mají povrchy polovodičů vysokou odrazivost způsobenou vysokým indexem lomu (křemík - vzduch má odrazivost větší než 30%), tak se na povrchu přední strany fotovoltaických článků vytváří antireflexivní vrstva [6]. Ta snižuje velikost odraženého záření a tím i velikost optických ztrát. Uspořádání jednotlivých vrstev fotovoltaického článku je vidět na obr. č. 3.

3.1.3 Fotovoltaické články

Fotovoltaické články lze rozdělit podle několika kritérií do různých skupin. Podle základního materiálu, jeho struktury, druhu technologie výroby nebo počtu přechodů, více informací lze nalézt např. v [4] a [10]. Nejrozšířenějším typem článků jsou křemíkové fotovoltaické články (monokrystalické a multikrystalické). Jejich rozšíření je dané dostupností základní suroviny křemíku (druhý nejrozšířenější prvek na Zemi) a také proto že je jeho zpracování na velmi vysoké úrovni. (Czochralskiho metoda). Technologie krystalických fotovoltaických článků tvořila v roce 2012 89% z celkové světové produkce fotovoltaických modulů [10].

3.1.3.1 Vlastnosti fotovoltaických článků

Rozsah vlnových délek, které lze využít ke generaci fotovoltaického napětí je omezený a je dán šířkou zakázaného pásma (krystalický křemík má při pokojové teplotě $E_g=1,1242\text{eV}$). Z této energie lze dopočítat mezní vlnovou délku tzv. absorpční hranu (3) (krystalický křemík $\lambda_{\max} = 1102,3\text{nm}$). Větší vlnové délky než λ_{\max} nejsou v materiálu absorbovány a nepodílí se na generaci fotovoltaického napětí (nemají dostatečnou energii).

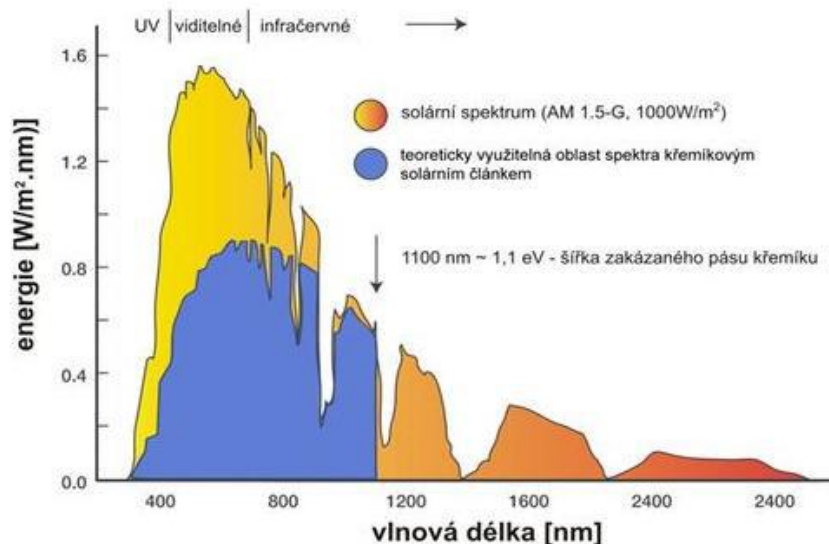
$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} \quad (3)$$

Naopak půjdeme-li směrem k nižším vlnovým délkám (větším energiím) je energie záření absorbována blíže k povrchu, kde zrekombinuje a nepřispívá ke generaci fotovoltaického proudu. U krystalických křemíkových článků dochází k povrchové rekombinaci u vlnových délek blízkých 400 nm.

Při běžném používání fotovoltaických článků je zdrojem elektromagnetického záření slunce. Jeho spektrum (rozložení energie dopadajícího záření v závislosti na vlnové délce) na povrchu země je uvedeno

viz obrázek č. 4. Z obrázku je patrné rozložení energie na vlnových délkách slunečního záření pro AM 1,5 (koeficient atmosférické masy) a také využitelné spektrum pro křemíkový fotovoltaický článek.

Rozložení energie ve spektru slunečního záření dopadajícího na povrch země ovlivňuje návrh fotovoltaických článků, především pak umístění PN přechodu. PN přechod je ve struktuře fotovoltaického článku umístěn v takové hloubce, která odpovídá vlnovým délkám s největší energií. Maximální energie spektra slunečního záření pro AM 1,5 je v okolí 600nm, této vlnové délce pro určitý materiál odpovídá absorpční hloubka (obr. č. 5). V této hloubce je umístěn PN přechod.



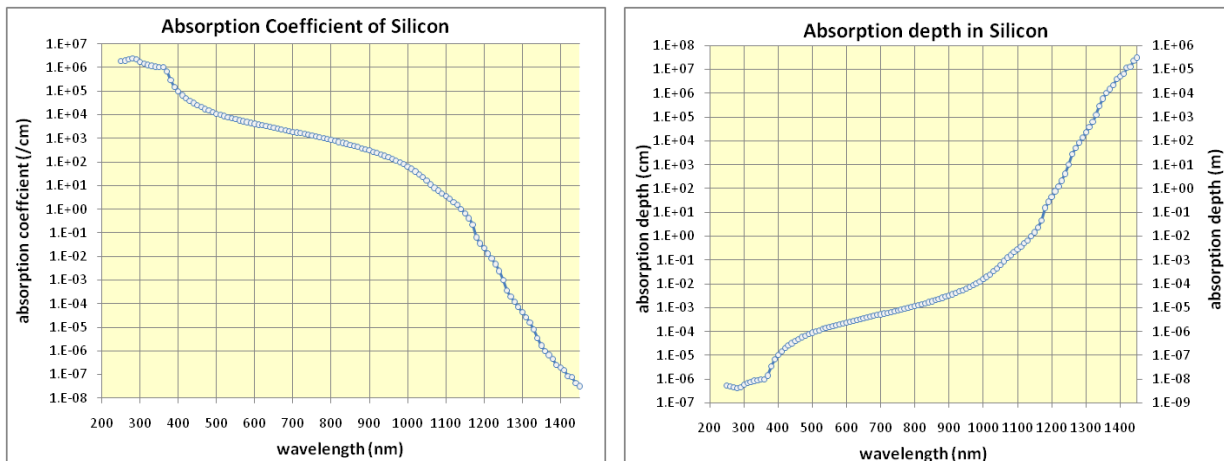
Obr. 4 Spektrum slunečního záření pro AM 1,5 (převzato z [15])

Část využitelné energie se odrazí od povrchu materiálu, zbylá část energie proniká do materiálu, ve kterém energie klesá se vzdáleností od povrchu podle vzorce č. 4, kde α je absorpční koeficient a x představuje vzdálenost od povrchu fotovoltaického článku.

$$E(x) = E_0 \exp(-\alpha x) = E_0 \exp\left(-\frac{x}{x_L}\right) \quad (4)$$

Absorpce elektromagnetického záření je závislá na vlnové délce, absorpčním koeficientu α , indexu lomu a teplotě. Důležitým parametrem je absorpční koeficient, který určuje, jak hluboko do materiálu může proniknout elektromagnetické záření před tím, než se vstřebá. Tento koeficient je

materiálovou konstantou a udává se v závislosti na vlnové délce dopadajícího elektromagnetického záření. Absorpční koeficient křemíku při 300°K je uveden na obrázku č. 5. [5]



Obr. 5 Absorpční koeficient a absorpční délka křemíku v závislosti na vlnové délce elektromagnetického záření při teplotě 300°C (převzato z [5])

3.1.4 Základní parametry fotovoltaických článků

Fotovoltaické články se nejčastěji zkoumají při ozáření (IV. Kvadrant VA charakteristiky), protože se v této oblasti chovají jako zdroj proudu. Do parametrů, se kterými budeme dále pracovat, patří: napětí naprázdno U_{0C} , proud nakrátko I_{SC} nebo proudová hustota J_{sc} . Pro jednodušší popis je výhodné vyjít z náhradního modelu fotovoltaického článku a voltampérové charakteristiky (VA charakteristika).[4].

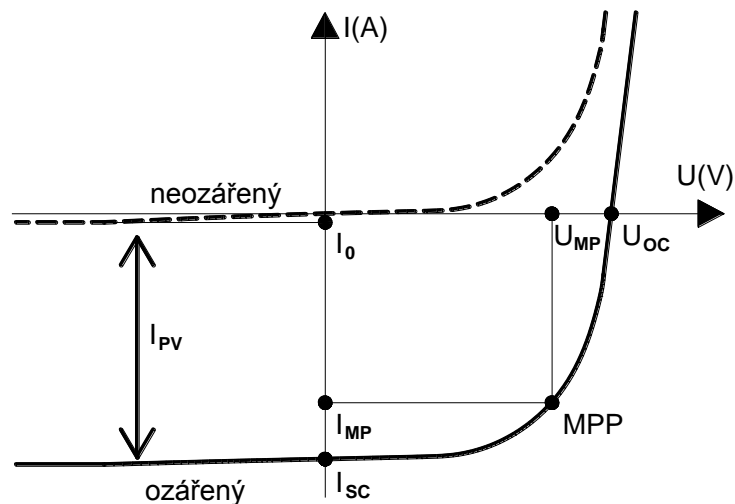
3.1.4.1 VA charakteristika

Na obrázku č. 6 jsou zobrazeny dvě VA charakteristiky fotovoltaického článku (PN-diody). Přerušovanou čarou je zobrazena VA charakteristika neozářeného fotovoltaického článku a druhou charakteristikou je VA charakteristika ozářeného fotovoltaického článku. Křivka VA charakteristiky fotovoltaického článku vychází ze Shockleyho rovnice popisující chování diody (neozářený fotovoltaický článek), která má tvar exponenciály a je dána rovnicí:

$$I_{PN \text{ neozářený}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\zeta kT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

Křivka ozářeného fotovoltaického článku je dána superpozicí proudu neozářeného fotovoltaického článku I_{PN} neozářený a proudu I_{PV} , který vzniká ozářením fotovoltaického článku.

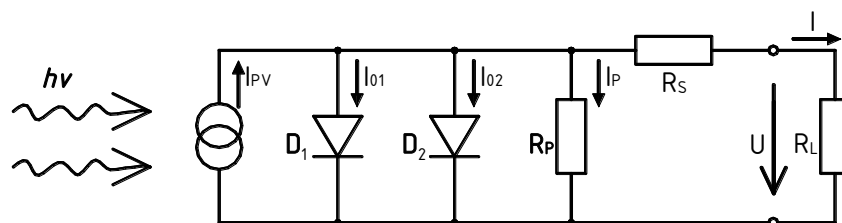
$$I_{PN \text{ ozářený}} = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\zeta kT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$



Obr. 6 VA charakteristika fotovoltaického článku (PN diody)

3.1.4.2 Náhradní model

Pro jednodušší představu si lze reálný fotovoltaický článek přiblížit pomocí náhradního schématu viz obr. č. 7. Poté si ho lze popsat jako proudový zdroj, který je řízený intenzitou záření. U fotovoltaického článku musíme počítat se ztrátami, ty jsou popsány paralelním a sériovým odporem, které představují R_s -elektrické ztráty (kontaktování) a R_p -poruchy v článku (zkraty). Proud I_{01} procházející přes diodu D_1 představuje difuzní složku proudu, ta převažuje při vysokých injkcích nosičů náboje (při ozářením fotovoltaického článku). Proud I_{02} procházející přes diodu D_2 představuje generačně-rekombinační složku proudu, ta převažuje při nízkých injkcích nosičů náboje (při neozářením fotovoltaického článku) rovnice č. 8.



Obr. 7 Dvoudiodové náhradní schéma fotovoltaického článku

3.1.4.3 Vyjádření výstupního proudu

Generovaný proud ve fotovoltaickém článku lze odvodit podle Kirchhoffova zákona z náhradního schématu fotovoltaického článku obr. č. 7. Dostáváme rovnici:

$$I = AJ_{PV} - I_{01} \left[\exp \left(q \frac{U+R_s I}{\zeta k T} - 1 \right) \right] - I_{02} \left[\exp \left(q \frac{U+R_s I}{\zeta k T} - 1 \right) \right] - \frac{U+R_s I}{R_p} \quad (7)$$

Kde J_{PV} je proudová hustota generovaná ve struktuře fotovoltaického článku. Pokud dopadá monochromatické záření s vlnovou délkou λ , tak lze proudovou hustotu J_{PV} vyjádřit rovnicí:

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) \quad (8)$$

Kde J_{PVN} je proudová hustota generovaná v oblasti typu N, J_{PVP} je proudová hustota generovaná v oblasti typu P a J_{OPN} je proudová hustota generovaná v oblasti prostorového náboje (v oblasti PN přechodu). Integrací přes oblast typu N můžeme získat rovnici J_{PVN} vyvolanou zářením o vlnové délce λ :

$$J_{PVN}(\lambda) = q \int_0^{x_j} G(\lambda) dx - q \int_0^{x_j} \frac{\Delta n}{\tau_N} dx - J_{SR}(0) \quad (9)$$

Kde $J_{SR}(0)$ reprezentuje povrchovou rekombinaci pro $x=0$ (v nulové hloubce), $\Delta n/\tau$ vyjadřuje dobu života nosičů náboje a $G(\lambda)$ popisuje míru generace nosičů v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. Podobně lze vyjádřit rovnici pro proudovou hustotu generovanou v oblasti typu P:

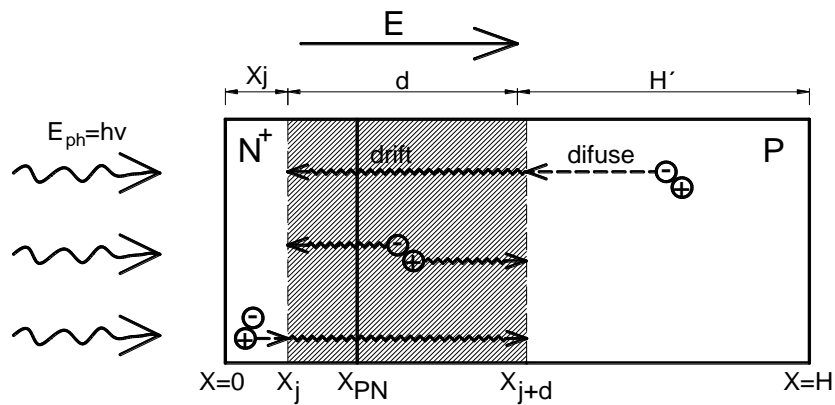
$$J_{PVP}(\lambda) = q \int_{x_{j+d}}^H G(\lambda) dx - q \int_{x_{j+d}}^H \frac{\Delta n}{\tau_P} dx - J_{SR}(H) \quad (10)$$

Kde $J_{SR}(H)$ reprezentuje povrchovou rekombinaci pro $x=H$ (v hloubce H). V oblasti prostorového náboje je rovnice proudové hustoty dána:

$$J_{OPN}(\lambda) = q \int_{x_j}^{x_{j+d}} G(\lambda) dx \quad (11)$$

Výše uvedené rovnice (9), (10) a (11) lze dále matematicky analyzovat, a vyjádřit pomocí parametrů jako je doba života nosičů náboje, jejich pohyblivosti, koncentrace elektronů a děr v jednotlivých oblastech polovodiče a další. Více informací lze nalézt v [9], pro návrh a realizaci pracoviště LBIV však postačuje pochopit výše popsany princip, který popisuje fungování fotovoltaického článku.

Struktura fotovoltaického článku s vyznačením jednotlivých oblastí v ose x je na obrázku č. 8.



Obr. 8 Příčný řez fotovoltaickým článkem

3.1.4.4 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_{oc} (open circuit voltage) je výstupní napětí na svorkách fotovoltaického článku při nulovém výstupním proudu ($I=0$). Velikost napětí naprázdno je závislé jak na parametrech fotovoltaického článku (šířka zakázaného pásu, množství dotace v oblasti $N+$ a P , antireflexivní vrstvě (reflexe), elektrických ztrátách, poruchách), ale i na okolních vlivech (teplota, spektrum záření). Napětí naprázdno lze vyjádřit z rovnice č. 7 za předpokladu $I=0$, $R_p \rightarrow \infty$:

$$U_{0C} \approx \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{-I_{02} + \sqrt{I_{02}^2 + 4I_{01}(I_{02} + I_{01} + AJ_{PV})}}{2I_{01}} \right) \quad (12)$$

Tuto rovnici můžeme dále zjednodušit, a to za předpokladu $I_{PV} \gg I_{01} + I_{02}$:

$$U_{0C} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{PV}}{I_{01}} \quad (13)$$

3.1.4.5 Proud nakrátko

Proud nakrátko I_{sc} (short circuit current) je proud procházející svorkami při nulovém zatěžovacím odporu (zkratovaný výstup). Velikost proudu nakrátko je závislá na ploše fotovoltaického článku, optických vlastnostech, intenzitě a spektru dopadajícího záření. Proud nakrátko lze vyjádřit z rovnice č. 7 za předpokladu $U=0$:

$$I_{sc} = AJ_{PV} - AJ_{01} \left[\exp\left(\frac{qR_s I}{kT} - 1\right) \right] - AJ_{02} \left[\exp\left(\frac{qR_s I}{2kT} - 1\right) \right] - \frac{R_s I}{R_p} \quad (14)$$

3.1.5 Ztráty ve fotovoltaických článcích

Pro dosažení maximální účinnosti fotovoltaických článků je potřeba maximálně využít světelné energie. Bohužel se vyskytují defekty, které zvyšují rekombinaci, způsobují ztráty a snižují účinnost využití světelné energie. Ztráty (defekty ve struktuře fotovoltaického článku) lze rozdělit podle původu nebo podle typu defektu (charakteru).

Podle typu defektu rozlišujeme:

bodové defekty: vakance - chybějící atom, intersticiální částice - částice mimo pravidelný bod mřížky, příměsi - cizí atomy v krystalu

čárové defekty: dislokační čáry – chybějící celé souvislé skupiny částic

plošné a objemové defekty: precipitáty – ostrůvky a jiné krystalické struktury

Podle původu defektu rozlišujeme:

materiálové defekty: vznikají při výrobě substrátu a polovodičových struktur průnikem nečistot

procesní defekty: vznikají mechanickým nebo jiným poškozením v průběhu technologického procesu

Defekty, které zhoršují vlastnosti krystalických křemíkových fotovoltaických článků, mají charakter poruchy krystalické mřížky. Tyto defekty lze zjistit měřicími metodami jako je LBIV, LBIC, elektroluminiscence, měření pomocí termokamery, mikroplasma atd.).

3.1.5.1 Přehled defektů

Pro jednodušší představu a snazší vyhodnocení naměřených dat na pracovišti LBIV, LBIC je v této kapitole uvedeno několik defektů vyskytujících se v krystalických fotovoltaických článcích.

Vírový defekt

Tento druh defektu se vyskytuje pouze u monokrystalických fotovoltaických článků a je charakterizován soustřednými kružnicemi. Jedná se o materiálový defekt, který vzniká při výrobě základního materiálu (ingotu). Důvodem je vnik příměsí (nejčastěji kyslík) do taveniny křemíku (obr. č. 9).

Pnutí v materiálu

Tento materiálový defekt je stejně jako vírový defekt způsoben při výrobě základního materiálu (ingotu). Důvodem vzniku je špatné řízení výroby, které způsobí nerovnoměrné tuhnutí taveniny na monokrystalu (obr. č. 10).

Chyby metalizace

Defekty metalizace jsou často detekovatelné vizuálně bez použití analytických metod (chybějící části prstů sběrnice) mohou však být i vizuálně těžko rozeznatelné (přerušování kontaktů). Tyto defekty vznikají při nesprávném nanášení vodivé vrstvy (metalizace) sítotiskem (obr. č. 11).

Prachové částice

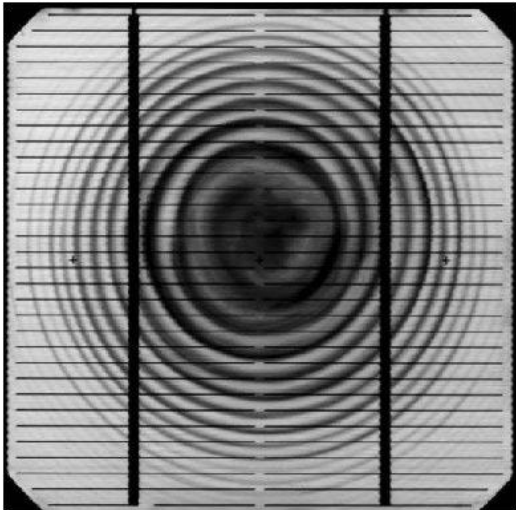
Defekty způsobené přítomností prachových částic jsou spojeny se zanesením nehomogenit (prachových částic) při výrobě do struktury fotovoltaických článků. Prach je při difúzi zataven do základního materiálu, kde pak působí jako defekt (obr. č. 12).

Praskliny

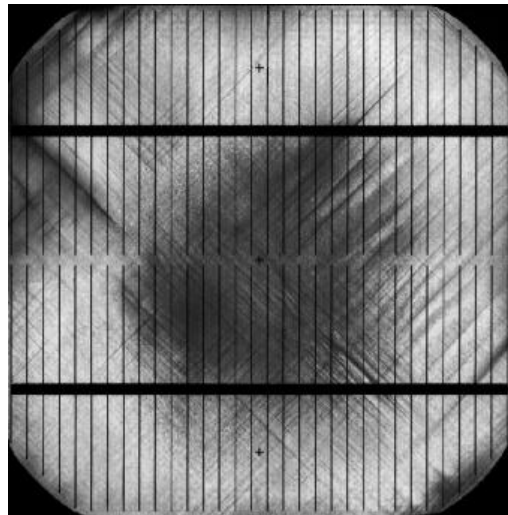
Procesní defekt, ke kterému obvykle dochází v důsledku mechanického zatížení při manipulaci. Důvodem je působení nesprávně rozložené nebo nepřiměřené síly na křehký článek (obr. č. 13).

Neobroušené hrany

Procesní defekt, který způsobuje zkraty na hranách fotovoltaického článku a tím i elektrické ztráty. Důvodem vzniku těchto defektů je nesprávná (nedostatečná) úprava hrany fotovoltaického článku (obr. č. 14).



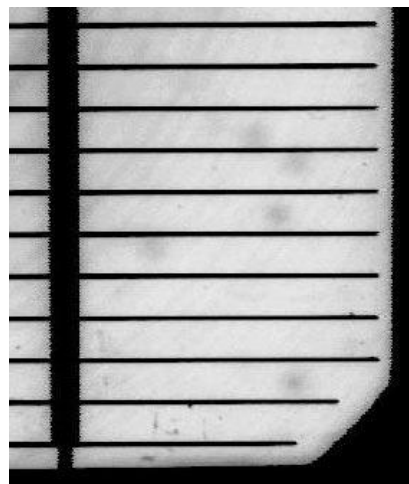
Obr. 9 Virový defekt
(převzato z [7])



Obr. 10 Pnutí v materiálu
(převzato z [8])



Obr. 11 Chyby metalizací
(převzato z [7])



Obr. 12 Prachové částice
(převzato z [7])



Obr. 13 Praskliny (převzato z [7])



Obr. 14 Detail neobroušené hrany
(převzato z [7])

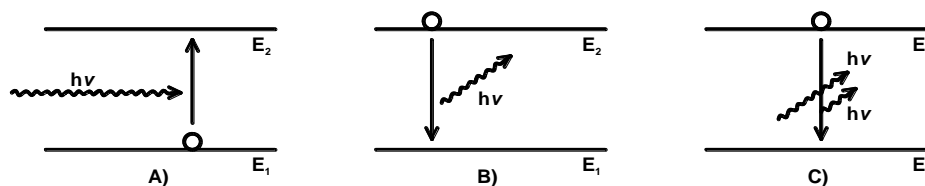
3.2 Lasery

Lasery jsou monochromatické zdroje záření s velmi úzkou vyzařovací charakteristikou. Úzká vyzařovací charakteristika laserů se využívá pro bodové ozařování plochy fotovoltaického článku. Monochromatické záření na dominantní vlnové délce určuje hloubku vniku (vzdálenost od povrchu), kde dochází ke generaci párů elektron - díra.

Lasery lze rozdělit podle různých hledisek, například podle aktivního prostředí, druhu buzení, úrovně výkonu, vlnové délky nebo podle režimu práce (kontinuální, impulsní)[1]. Pro naše potřeby byly použity polovodičové lasery. Výhodou těchto zdrojů je potřebný optický výkon, rozsah vlnových délek a dobrá cenová dostupnost.

3.2.1 Princip

Činnost polovodičového laseru je založena na takzvané stimulované emisi. Průběh stimulované emise lze vysvětlit pomocí energetických hladin (dvouhladinovém modelu). Na obrázku č. 15 jsou vyznačeny dvě energetické hladiny E_1 a E_2 určité kvantové soustavy (aktivní prostředí). Po dopadu budícího světla (fotonů) s dostatečnou energií $E \geq E_2 - E_1$ přechází soustava ze základního energetického stavu E_1 do stavu E_2 obrázek. 15A. Návrat soustavy do původního stavu je možný dvěma způsoby. Samovolný obr. 15B, po určité době dochází k samovolnému vyzáření fotonu s energií $h\nu$ nebo stimulovanou emisí obr. 15C, kde na vybuzenou soustavu dopadne foton s energií $h\nu$, soustava okamžitě přechází do původního stavu a současně z ní vystupují dva fotony s energií $h\nu$. Ty mohou zprostředkovávat v další soustavě v energetickém stavu E_2 generaci fotonů. Tímto způsobem dostáváme kvantový zesilovač monochromatického záření.



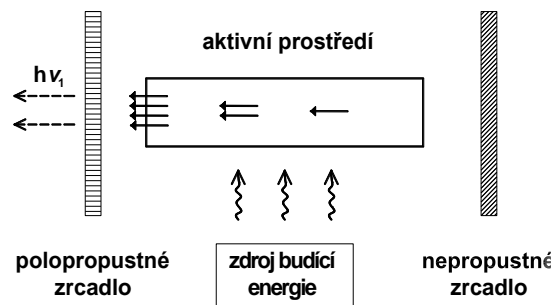
Obr. 15

Přechody mezi energetickými hladinami

Pro dosažení stimulované emise je potřeba aktivní prostředí udržovat v energetickém stavu s větší energií (hladina E_2). To lze realizovat stálým dodáváním energie do aktivního prostředí (buzením), nejčastěji světelným zářením.

Uspořádání obecného laseru se skládá ze tří základních částí a to aktivního prostředí, zdroje budící energie a optického rezonátoru (Obr. č. 16).

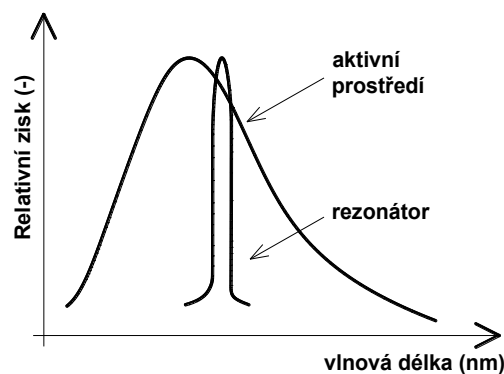
Optický rezonátor určuje oscilační frekvenci. Lze si ho představit jako soustavu dvou zrcadel, které odrážejí zesílené záření tak, aby prošlo aktivním prostředím několikrát a mohlo dojít k oscilaci soustavy na kmitočtu optického rezonátoru.



Obr. 16 Schematické uspořádání laseru

3.2.2 Parametry laseru

Laser popisuje vlnová délka, vyzářený výkon, šířka vyzářeného svazku a spektrum. Důležitým parametrem je spektrální charakteristika laseru a jeho strmost (selektivita) na dominantní vlnové délce. Spektrální charakteristika laseru vzniká průnikem spektrální charakteristiky aktivního prostředí a spektrální charakteristiky optického rezonátoru [2].



Obr. 17 Spektrální charakteristiky laseru

3.2.3 Stabilita laserů

Stabilita polovodičových laserů je dána především kvalitou optickém rezonátoru. Největší vliv na stabilitu rezonátoru má teplota. Ta způsobuje změnu rozměrů rezonátoru, tím i změnu rezonanční frekvence (vlnových délek). Se změnou vlnové délky dochází k nepatrné změně vyzářeného výkonu. Proto je pro stabilitu laseru důležitá konstantní teplota ale i stabilita napájecího proudu.

3.3 Měření napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} na fotovoltaických článcích

Abychom správně změřili požadované veličiny a mohli tak dosáhnout co možná nejvěrohodnějších (nejpřesnějších) výsledků je nutné dodržet správné měření napětí naprázdno (u metody LBIV) nebo proudu nakrátko (u metody LBIC) na svorkách fotovoltaického článku.

Při měření zkratového proudu I_{SC} by měl mít ampérmetr v ideálním případě nulový vnitřní odpor, aby napětí na článku bylo nulové. Při měření metodou LBIC však postačuje, aby velikost zatěžovacího odporu byla poloviční než v bodě maximálního výkonu, to v praxi znamená odpor menší jak $0,1\Omega$.

Pro měření napětí naprázdno U_{OC} nastává opačný případ, voltmetr by měl mít v ideálním případě co možná největší (nekonečný) odpor. Podmínku pro splnění zatěžovacího odporu splňuje většina měřicích přístrojů pro měření napětí[8].

3.4 Metody LBIV, LBIC

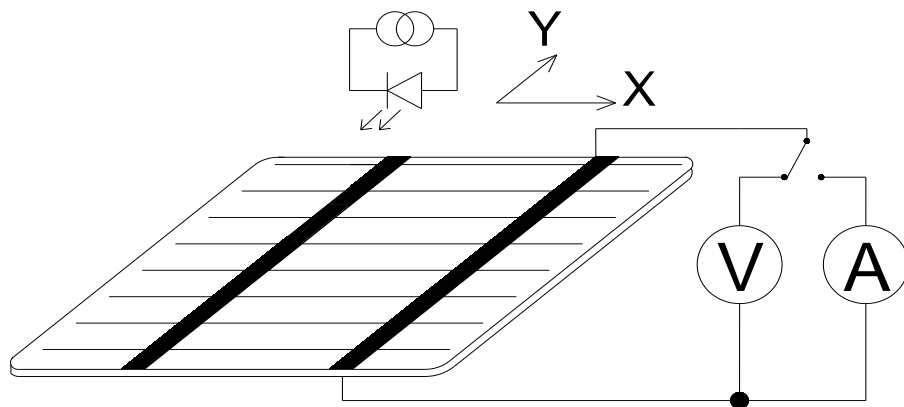
Jak bylo výše popsáno, tak metody LBI jsou založené na lokálním ozařování fotovoltaických článků a zjišťování velikosti napětí naprázdno (LBIV), nebo proudu nakrátko (LBIC) vyvolaným bodovým ozařováním. Zjištěné výsledky nám dávají obraz o kvalitě technologických operací (kvalitu zkoumaného článku). Výhodou metod lokálního ozařování oproti jiným měřicím metodám (elektroluminiscenci, mikroplasma) je plošné lokalizování defektů v různých hloubkách (podle použitého zdroje záření). Nevýhodou je pak nízká rychlost měření (měření s největším rozlišením může trvat i několik hodin).

3.4.1 Metoda LBIV

Metoda měření fotovoltaického napětí vyvolaného světelným paprskem monochromatického záření dopadající na fotovoltaický článek (Light Beam

Induced Voltages) nám dovoluje určit rozložení napětí v ploše fotovoltaického článku (Obr. č. 18).

Zdroj monochromatického záření, nejčastěji laser, umístěný nad povrchem fotovoltaického článku ozařuje bod. Dopadající záření vyvolá v tomto bodě napěťovou odezvu. Pokud dojde k bodovému proměření plochy fotovoltaického článku, tak zobrazením velikosti napětí na poloze dostáváme mapu fotovoltaického napětí. Ta je potřeba zejména pro posouzení kvality fotovoltaických článků.



Obr. 18 Principiální uspořádání metody LBIV, LBIC

3.4.2 Metoda LBIC

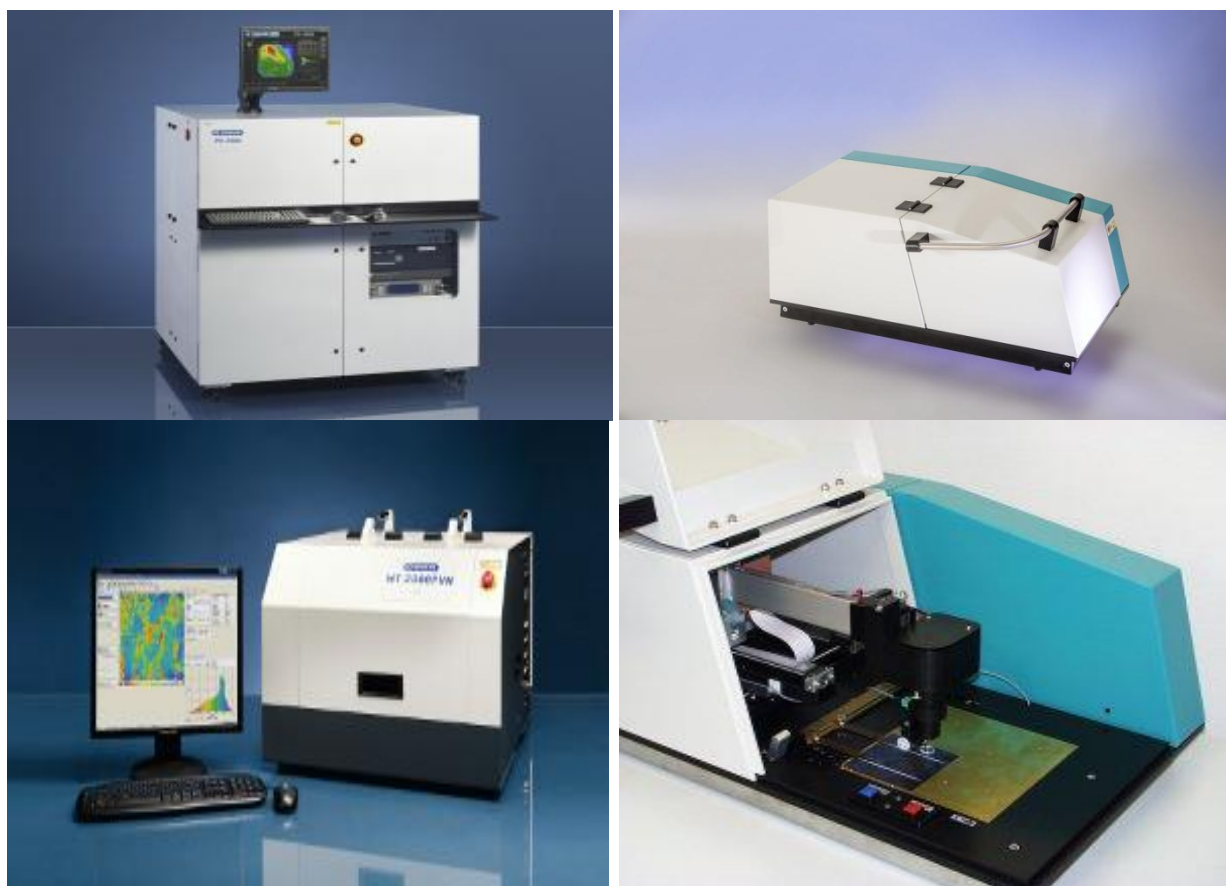
Metoda měření proudu nakrátko (zkratového proudu), který je vytvořen světelným paprskem monochromatického záření dopadající na fotovoltaický článek (Light Beam Induced Current). Tato měřicí metoda nám dovoluje určit rozložení proudu v ploše fotovoltaického článku.

Jedná se o metodu založenou na stejném principu jako metoda LBIV, jen s tím rozdílem, že místo měření napětí naprázdno se měří proud nakrátko.

3.4.3 Profesionální diagnostická zařízení

Diagnostická zařízení pro měření fotovoltaických článků nejsou příliš rozšířená, proto i firem, které tyto zařízení vyrábějí, není mnoho. To je dáno cenou zařízení a jeho specifickým použitím. Nejčastější využití těchto zařízení je ve výzkumných pracovištích a diagnostických laboratořích. Mezi firmy, které

tyto zařízení vyrábějí, patří Semilab [12], SunLab [13]. Fotografie jejich zařízení jsou na obrázku č. 19. Na levé straně je univerzální zařízení od firmy Semilab pro diagnostiku polovodičů (nejen fotovoltaických článků) různými metodami. Jednou z diagnostických metod je i metoda LBIC. Na pravé straně je specializované zařízení od společnosti Sunlab navržené k diagnostice fotovoltaických článků metodami lokálního ozařování.



Obr. 19 Zařízení pro diagnostiku PV článků firmy SunLab a Semilab
(převzato z [12], [13])

Všechna zařízení založená na principu lokálního ozařování pracují na stejném principu, avšak provedení je různé. Liší se především v mechanickém provedení posuvného mechanismu, v řídicím programu (způsob měření a vyhodnocení měřených vzorků) a v získání monochromatického záření s úzkým paprskem (využití přesné optiky, speciální zdroje záření). Naopak některé části například kontaktování fotovoltaického článku jsou podobné.

3.4.4 Parametry LBIV a LBIC

Podle místa použití metody LBIV, LBIC posuzujeme důležitost jednotlivých parametrů. Při použití metody jako diagnostického prostředku ve výrobě fotovoltaických článků je kladen vyšší důraz na rychlost měření, automatizaci, jednoduchost. Naopak při použití v akademické oblasti je kladen větší důraz na přesnost, univerzálnost, formát výstupních dat a v některých případech i na cenu.

Parametry lze posuzovat v několika skupinách (optické, mechanické, elektrické a programové). Mezi důležité parametry patří: průměrná doba měření jednoho bodu, minimální krok měření v ose X, Y (rozlišení), spektrum záření (rozsah vlnových délek), intenzita záření, šířka světelného paprsku. Pro představu jsou uvedeny v tabule č.1. typické hodnoty, kterých metody lokálního ozařování dosahují [13].

TYPICKÉ PARAMETRY DOSAŽENÉ METODAMI LOKÁLNÍHO OZAŘOVÁNÍ					
OPTICKÉ		MECHANICKÉ		ELEKTRICKÉ / PROGRAMOVÉ	
NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH	NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH	NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH
spektrum záření	350-1200 nm	velikost PV článku	215x215 mm	rychlost dat. komun.	57600b/s
intenzita záření	200 mW/cm ²	krok v ose X ; Y	0,1 ; 0,1 mm	grafický výstup	1D,2D,3D
šířka svět. paprsku	0,2 mm	průměrná rychlost	10-20 mm/s	formát dat. výstup	txt, xls

Tab. 1 Technické parametry profesionálních zařízení LBIV, LBIC

4 Praktická část

Cílem praktické části je rekonstrukce existujícího pracoviště pro měření fotovoltaických článků a na zrekonstruovaném pracovišti provést kontrolní měření různých vzorků fotovoltaických článků a naměřené výsledky okomentovat.

Praktická část vychází ze znalostí popsaných v teoretické části diplomové práce a z technické zprávy funkčního vzorku „Zařízení pro měření homogenity fotovoltaických článků metodou LBIV“ [11]. Uvedená technická zpráva byla vytvořena k námi zrekonstruovanému pracovišti během magisterského studia a popisuje zrekonstruované pracoviště jako funkční vzorek. (Některé pasáže z této práce jsou uvedeny v praktické části).

4.1 Původní pracoviště

Původní pracoviště vzniklo více jak před patnácti lety na katedře elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze. Rozvojem výpočetní techniky, programovacích jazyků, dostupnosti elektrických součástek a dalších okolností původní pracoviště „zastaralo“ a bylo vyřazeno. Největší znaky „zastarání“ byly patrné na řídicím programu a jeho textovém uživatelském rozhraní, které neumožňovalo grafické znázornění naměřených hodnot. Dále pak složitější nastavení pracoviště před zahájením měření.

Řídicí program byl určen pro operačním systémem MS-DOS a umožňoval jen základní nastavení měření (měřenou oblast a krok měření). Výstupem pak byl jednoduchý textový soubor, který obsahoval souřadnice a měřenou veličinu.

Původní pracoviště LBIV (obr. č. 20) se skládá z několika hlavních částí:

- osobní počítač s OS MS-DOS
- plotr Philips PM8154 s kontaktním systémem pro kontaktování fotovoltaických článků
- voltmetr Agilent 34440
- sada LED diod a laserů v pouzdech pro uchycení do hlavy plotru
- laboratorní napájecí zdroj



Obr. 20

Původní pracoviště LBIV

4.2 Navržené pracoviště

Jak bylo uvedeno v kapitole 4, cílem diplomové práce je rekonstrukce stávajícího pracoviště. Rekonstrukce mohla probíhat dvěma způsoby a to buď vytvořením nového řídicího programu k stávajícímu hardwarovému řešení, nebo postavit pracoviště s vylepšenou hardwarovou strukturou s novým řídicím programem. Výhodou první varianty je její jednoduchost (časově mnohem méně náročná) než druhá varianta, která při rekonstrukci předpokládá vylepšení hardwarové struktury.

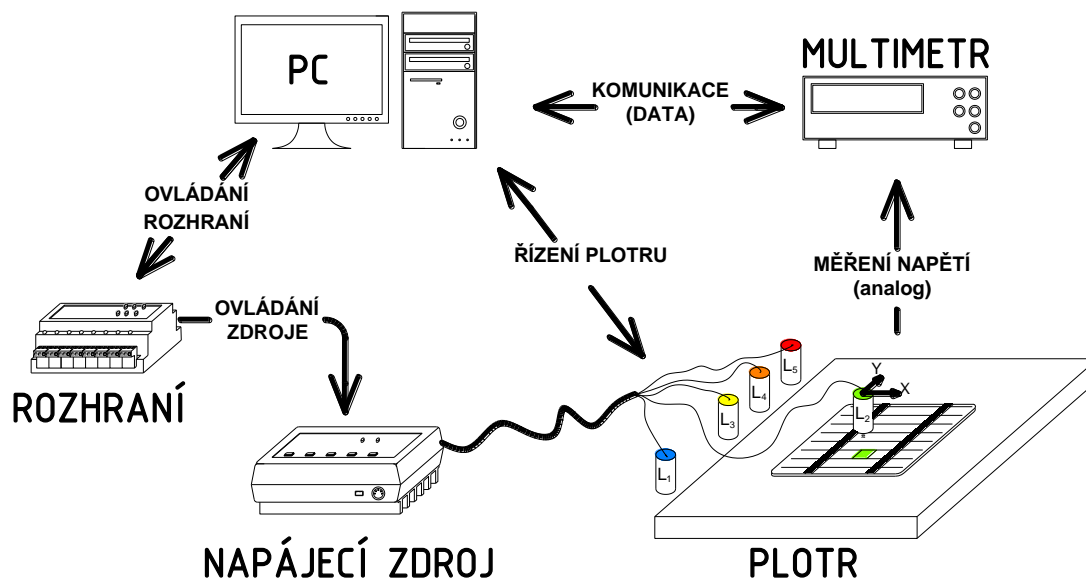
Při rekonstrukci jsme vycházeli podle druhé varianty a to návrhem nové struktury hardwarového uspořádání. Výhodou této varianty je zvýšení automatizace měření. Navržené řešení působí jako kompaktní celek s jednoduchým a intuitivním ovládáním, kde řídicí program vyhodnotí naměřené hodnoty jak ve formě 2D nebo 3D grafu. Samozřejmostí je uložení výsledků do textového souboru nebo tabulky.

4.3 Princip fungování navrženého pracoviště

Princip fungování navrženého pracoviště si lze pro zjednodušení popsat podle obrázku č. 21, ten ukazuje uspořádání jednotlivých prvků na pracovišti.

Testovaný fotovoltaický článek je uchycen v kontaktním systému plotru, který je řízen přes sériovou komunikaci z počítače. Součástí plotru je zásobník na světelné zdroje, kde jsou umístěny lasery. Pro napájení laserů je použit napájecí obvod a pro spínání slouží vstupně výstupní rozhraní, které je také řízeno přes sériovou komunikaci z počítače. Vyvedené kontakty z fotovoltaického článku jsou přivedeny do digitálního multimetru, který podle druhu metody zajišťuje měření napětí nebo proudů. Digitální multimetr zajišťuje přenos naměřených hodnot do počítače. Řídicím prvkem celého pracoviště je osobní počítač s řídicím programem napsaný v jazyce LabView (ten obsluhuje připojená zařízení a provádí měření).

Po nastavení a spuštění měření následuje několik po sobě jdoucích kroků, které diagnostikují fotovoltaický článek. Jednotlivé kroky jsou řízeny programem v počítači a zajišťují automatizované měření. Nejprve dojde k uchycení uživatelem vybraného zdroje záření do hlavy plotru (dají se vybrat různé zdroje záření o různých vlnových délkách). Následně se přivede napájení pro vybraný zdroj záření. Poté následuje proces měření. Měření spočívá v koordinovaném posouvání zdroje záření a měření napětí multimetrem. Naměřené hodnoty jsou po změření každého bodu odeslány do počítače, kde jsou přiřazeny k souřadnicím měřeného bodu. Po proměření uživatelem zvolené oblasti se vypne napájení laseru a odloží laser do zásobníku (do výchozí pozice). Tímto krokem je dokončeno měření, po kterém jsou naměřená data uložena (do předem definované cesty). Současně jsou naměřené hodnoty zobrazeny v grafické podobě.



Obr. 21 Schéma navrženého pracoviště LBIV, LBIC

4.4 Prvky navrženého pracoviště a jejich funkce

Vytvořené pracoviště LBIV, LBIC (Obr. č. 21) se skládá z několika hlavních prvků, tyto prvky plní určitou funkci:

napájecí zdroj: zajišťuje napájení zdrojů záření, chrání je před zničením a umožňuje regulaci intenzity záření.

vstupně výstupní rozhraní: Převádí datové signály z počítače na odpovídající akce. Spínání kontaktů, vyhodnocování vstupů.

plotr: zajišťuje pohyb zdroje záření v ose X,Y a jeho výměnu. Součástí plotru je mechanismus, který slouží k fixaci a kontaktování fotovoltaického článku.

osobní počítač: umožňuje pomocí řídicího programu ovládat pracoviště (plotr, rozhraní, multimetr).

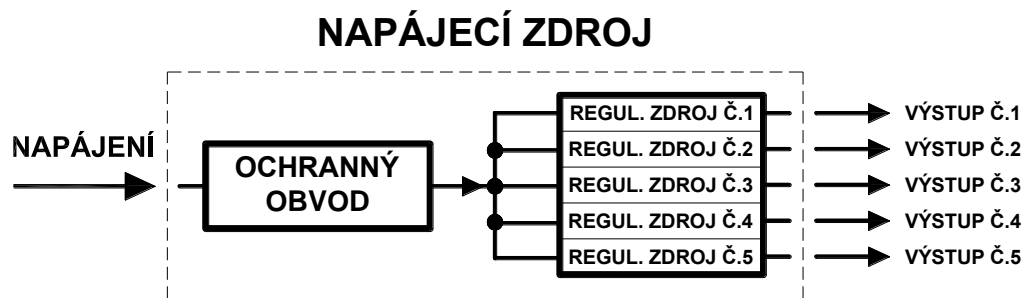
multimetr: zajišťuje řízené měření napětí nebo proudů a jejich zpracování, předání naměřených dat do počítače.

zdroj záření: generuje monochromatický záření o určité vlnové délce a potřebné intenzitě.

4.4.1 Napájecí zdroj

Pro potřeby měřicího pracoviště je navržen pětikanálový zdroj proudu s plynulou regulací proudu i napětí. Napájecí zdroj je doplněn o ochranný obvod pro ochranu laserů. Mechanické uspořádání je provedeno v plastovém krytu

vyztuženém hliníkovým chladičem. V tomto uspořádání jsou navržené obvody chráněny před neodbornou manipulací, ale také pomáhá ke stabilitě výstupních parametrů (tepelná kapacita). Doplněním napájecího zdroje o štítky, použitím vhodných konektorů a signalizačních LED diod bylo docíleno vhodného napájecího zdroje pro navržené pracoviště. Napájecí zdroj se skládá z ochranného obvodu a pěti regulovatelnými zdroji viz obr. č. 22.



Obr. 22 Blokové schéma napájecího zdroje

4.4.1.1 Regulovatelný zdroj

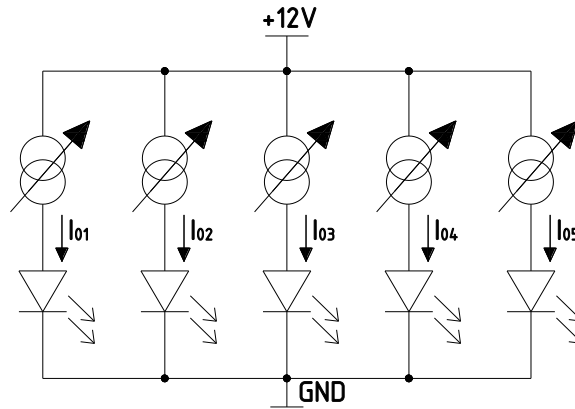
Regulovatelný zdroj zajišťuje regulaci a stabilitu výstupních parametrů (U , I), čehož bylo docíleno použitím integrovaného obvodu L200 [17] a úpravou jeho doporučeného zapojení.

4.4.1.1.1 Realizace

Jak bylo řečeno výše, zapojení vychází z doporučeného zapojení integrovaného obvodu L200. Doporučené zapojení bylo odzkoušeno na zkušebním vzorku. Výsledky měření neodpovídaly potřebám pracoviště LBIV, LBIC. Konkrétně nevyhovovala regulace proudu (citlivost, přesnost nastavení) a také rozsah nastavení výstupního napětí ($U_{min} > 2V$). Na základě těchto nedostatků byla provedena úprava zapojení. Mezi nejdůležitější úpravy patří použití víceotáčkových trimerů pro regulaci I a U (pro zpřesnění regulace) a využití záporného napětí pro posunutí referenčního napětí, tím pádem vznikla možnost regulace výstupního napětí od nuly.

Pro upravené zapojení byl navržen a vyroben plošný spoj. Po osazení součástkami dostáváme vyhovující zdroj pro napájení laseru. Z regulovatelného zdroje můžeme napájet pouze jeden laser, proto pro napájení více laserů, které jsou potřeba na pracovišti LBIV, LBIC, je použito těchto zdrojů pět (pět

kanálů). Všech pět kanálů je zapojeno tak, aby se navzájem neovlivňovaly (obrázek č. 23).



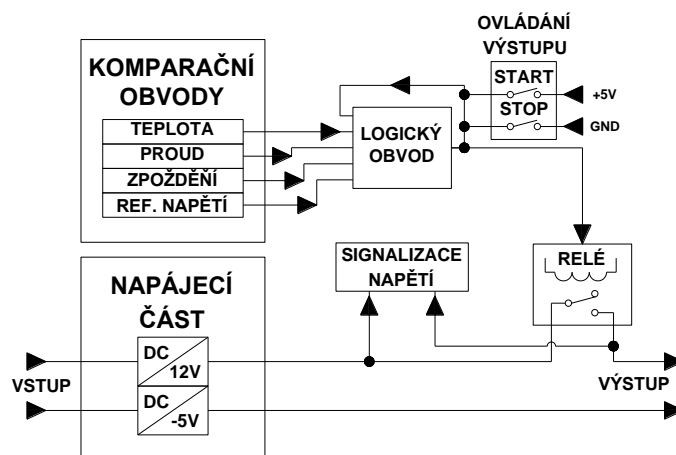
Obr. 23 Principiální zapojení regulovatelných zdrojů

4.4.1.2 Ochranný obvod

Ochranný obvod je součástí napájecího zdroje a zajišťuje ochranu především napájeného prvku (laseru), ale i celého napájecího zdroje. Ochrana je navržena proti překročení maximálního výstupního proudu, přehřátí výkonných prvků a odpojení pomocného zdroje. Ochranný obvod plní také funkci zpožděného spínače. Díky zpožděnému sepnutí je připojen napájený prvek (laser) až po ustálení přechodových jevů (nabíjení kapacit ve vstupním zdroji).

4.4.1.2.1 Návrh a realizace

Návrh ochranného obvodu vychází z požadavků na ochranu výstupních prvků (laserů) a stabilitu výstupních parametrů. Proto byl ochranný obvod navržen konkrétně pro využití na pracovišti LBIV, LBIC Blokové schéma zapojení (obrázek č. 24) je rozdělené na několik menších celků, které plní danou funkci.



Obr. 24 Blokové zapojení ochranného obvodu

Napájecí část ochranného obvodu obsahuje dva stabilizátory napětí. Výstupem napájecí části jsou dvě stabilizované hladiny 12V a -5V. Záporné napětí -5V slouží jako reference pro regulovatelný zdroj. Kladné napětí 12V slouží k napájení regulovatelných zdrojů pro lasery. Proud na této větvi může dosahovat až několika jednotek ampér v závislosti na připojené zátěži. V návrhu je počítáno s tímto proudem a proto i s tepelným namáháním stabilizátoru, který je umístěn na masivním chladiči a hlídán ochranou proti přehřátí.

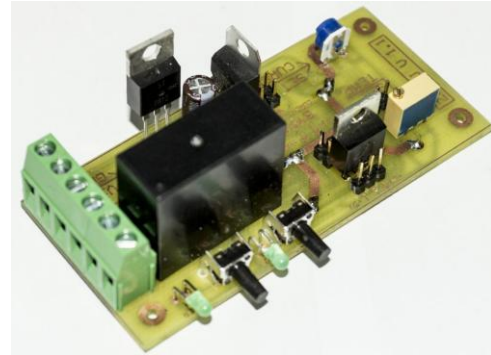
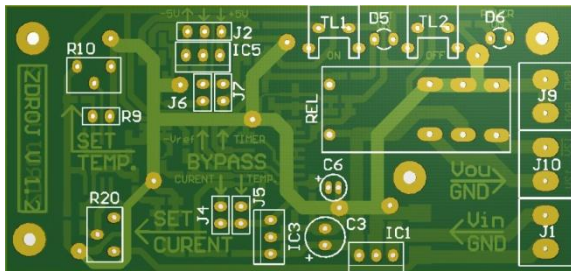
Jednoduchou, ale praktickou částí ochranného obvodu je signalizace napětí, která slouží k indikaci připojení napájecího napětí a stavu výstupu (sepnuto, rozepnuto). Indikace je tvořena pomocí dvou LED diod připojených přes odpory na hlídání napětí v různých místech obvodu.

Komparační obvody porovnávají několik parametrů (teplota, proud, napětí) a podle nastavení komparační úrovně je vyhodnocují. Výstupem komparačního obvodu jsou signály, které odpovídají logické nule nebo logické jedničce v TTL logice. Logická jednička signalizuje správnou úroveň hlídání parametru. Naopak logická nula signalizuje překročení hlídání parametru (překročení nastavené teploty, maximálního dovoleného proudu).

Vyhodnocení a řízení ochranného obvodu obstarává logika typu AND, na jejíž vstupy jsou přivedeny výstupy z komparátorů. Výstup z logického obvodu řídí přes pomocný tranzistor relé. Pokud jsou komparované veličiny v tolerančním pásmu, tak z výstupu komparátorů jsou na vstup logického obvodu přivedeny log. 1, tím pádem je výstupem logického obvodu též log. 1, a dochází přes pomocný tranzistor k sepnutí relé. Při překročení některého z hlídáních

parametrů dochází ke změně logické úrovně na výstupu komparátorů, a tím i k rozpojení relé.

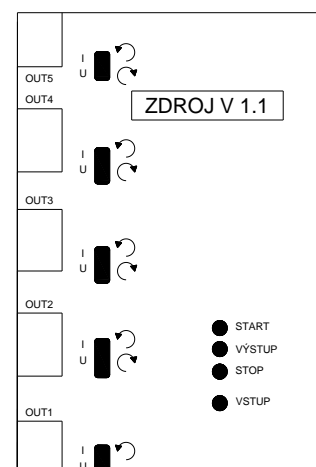
Poslední částí ochranného obvodu je ovládání výstupu, k němuž slouží dvojice tlačítek. Tlačítko „STOP“ rozeplácí relé v jakémkoliv stavu obvodu. Tlačítko „START“ sepne relé, pokud jsou dodrženy všechny hlídané parametry (teplota, proud, referenční napětí,...).



Obr. 25 Návrh desky plošných spojů ochranného obvodu a její realizace

4.4.1.3 Konstrukční uspořádání

Z důvodu budoucího využití na pracovišti LBIV, LBIC byla navržena odolná konstrukce napájecího zdroje laserů. Základem konstrukce je nosný plastový obal, na němž jsou uchyceny veškeré komponenty (konektory, regulovatelný zdroj, ochranný obvod, ovládací prvky). Uspořádání je navrženo jako kompaktní celek s jednoduchou a intuitivní obsluhou, kterou jsme docílili výběrem vhodných konektorů (ochrana proti přepalování), popisem ovládacích prvků (štítek), jednoduchou logikou ovládání a jednoduchou signalizací stavu napájecího zdroje. Návrh zdroje a návrh štítku je zobrazeno na obrázku č. 26.



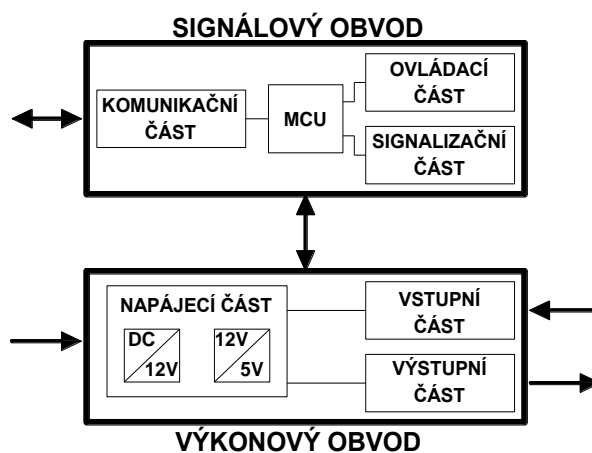
Obr. 26 Konstrukční uspořádání a návrh čelního panelu napájecího zdroje

4.4.1.4 Technická specifikace

Tento pětikanálový regulovatelný zdroj proudu je určen pro napájení světelných zdrojů na pracovišti LBIV (laserů, LED diod). Hlavním prvkem je integrovaný obvod L200, který určuje rozsah výstupních parametrů. Tento napájecí zdroj je doplněn ochranným obvodem, který chrání zdroj před přehřátím a proti překročení maximálního dovoleného proudu. Ovládání a nastavení napájecího zdroje se provádí pomocí tlačítek a trimerů umístěných na přední straně zdroje. Více technických parametrů je obsaženo v technické zprávě funkčního vzorku[11].

4.4.2 Vstupně výstupní rozhraní

Vstupně výstupní rozhraní je elektrický obvod, který pomáhá obsluhovat periferie (spínat lasery). Jedná se o vstupně výstupní obvod, který zpracovává řídicí signály a převádí je na požadované akce. Řídicí signály jsou přenášeny po obousměrné datové komunikační sběrnici (USB). Zdrojem řídicích signálů je PC. Vstupně výstupní rozhraní se skládá ze signálového a výkonového obvodu (obrázek č. 27).



Obr. 27 Blokové schéma vstupně výstupního rozhraní

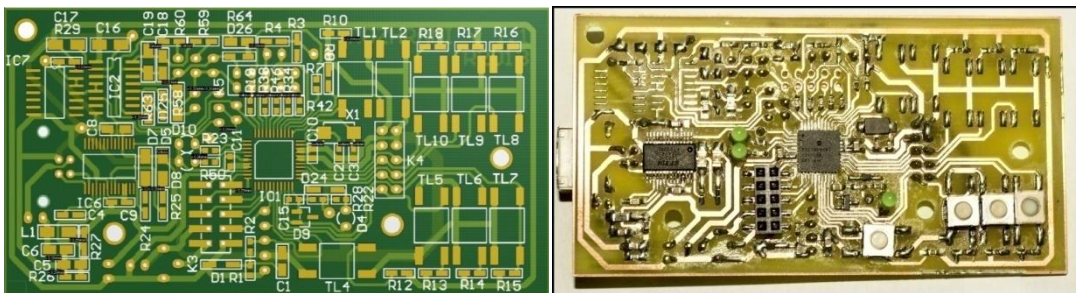
4.4.2.1 Signálový obvod

Hlavním úkolem signálového obvodu je zprostředkování datové komunikace s řídicím prvkem (PC), zpracování a vyhodnocení datových zpráv na požadované akce. Součástí signálového obvodu jsou tlačítka pro řízení běhu programu

a několik signalizačních LED diod pro indikaci stavu vstupně výstupního rozhraní.

4.4.2.1.1 Návrh a realizace signálového obvodu

Signálový obvod se skládá ze čtyř základních bloků. Tvoří ho komunikační, mikroprocesorová, ovládací a signalizační část. Všechny tyto části jsou navrženy na společné desce plošných spojů (obrázek č. 28).



Obr. 28 Návrh desky plošných spojů signálové části a její realizace

Úkolem komunikační části je zprostředkovat komunikaci mezi PC a mikrokontrolérem, která je realizovaná pomocí USB rozhraní konkrétně pomocí integrovaného obvodu (FT 232 RL). Zapojení vychází z doporučeného zapojení tohoto obvodu.

Jádrem mikroprocesorové části je 8bitový mikroprocesor firmy Microchip PIC 18F4685. V tomto mikroprocesoru je napsán program (firmware), který zpracovává komunikaci a obsluhuje připojené obvody (vstupní, výstupní, signalizační,...) viz kapitola 4.4.2.4. Mikroprocesorová část obsahuje podpurné obvody mikrokontroléru, které zajišťují jeho správnou funkčnost. Jsou to resetovací, programovací, napájecí obvod a obvod oscilátoru.

Ovládací část se skládá ze sady tlačítek. První skupina šesti tlačítek ovládá stav výstupů (každé tlačítko ovládá jeden výstup), další skupina tří tlačítek slouží k ovládání běhu programu, především k aktivaci a deaktivaci autonomie.

Signalizace je v základním provedení tvořena trojicí LED diod, které signalizují připojení napájení, běh programu a aktivaci autonomie. V rozšířeném provedení je počítáno s použitím zobrazovacího prvku (segmentovky nebo LCD display s řadičem), pro který je připraven konektor se čtyřmi datovými, třemi řídicími vodiči a jedním napájením.

4.4.2.2 Výkonový obvod

Výkonný obvod zajišťuje napájení prvků v rozhraní, upravuje úroveň vstupních a výstupních signálů na úroveň potřebnou pro správný chod rozhraní a také galvanicky odděluje signálovou část od výkonové části a od vnějšího obvodu (ochrana proti přepětí a šumu). Výkonovou část tvoří tři obvody, napájecí, vstupní a výstupní obvod (obrázek č. 27).

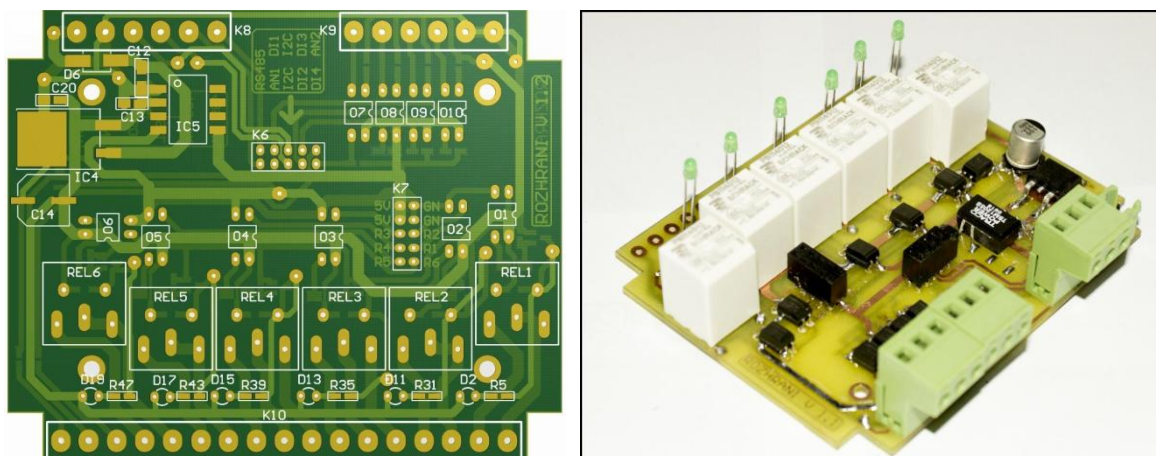
4.4.2.2.1 Návrh a realizace výkonového obvodu

Výkonový obvod je navržen s důrazem na stabilitu, odolnost a maximální ochranu nadřazeného prvku (signálového obvodu).

Napájecí obvod zajišťuje napájení výkonového a signálového obvodu. Pro každý z těchto obvodů vytváří samostatnou napěťovou hladinu. Pro signálový obvod je to 5V a pro výkonový obvod 12V. Pro vytvoření stabilní hladiny 12V je použit lineární stabilizátor. Pro vytvoření hladiny 5V je použit DC-DC měnič (TMA 1205), který je typu step-down a transformuje 12V na 5V (s maximálním proudovým odběrem 100mA). Výhodou tohoto obvodu je galvanické oddělení vstupu a výstupu.

Výstupní obvod zajišťuje spínání vnějších elektrických obvodů. Je tvořen šesti relé s pomocnými obvody. Ke spínání relé se využívají řídicí signály ze signálového obvodu, které jsou zesíleny přes pomocný tranzistor a přivedeny na cívku relé. Spínací kontakty relé jsou pak vyvedeny na svorkovnici. V budící větvi relé je vložen optočlen pro galvanické oddělení. Důležité je použití ochranné diody paralelně k cívkce relé proti zpětným proudům.

Vstupní obvod galvanicky odděluje vstupy rozhraní přes optočlenu, což pomáhá k ochraně signálového obvodu konkrétně k ochraně vstupů mikrokontroléru. Použité optočlenu jsou shodné v obou částech obvodu, jak ve vstupní, tak i ve výstupní, jejichž izolační napětí je 5kV.

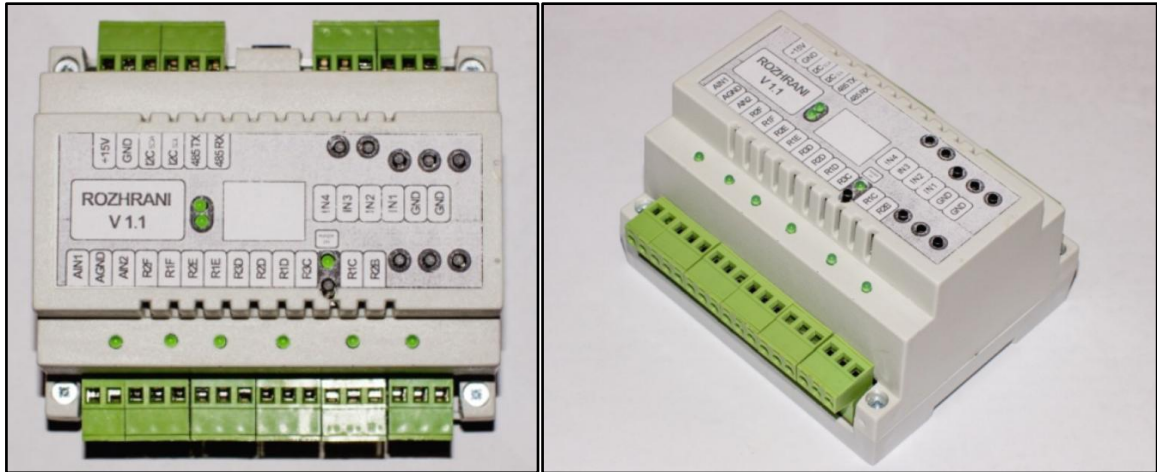


Obr. 29 Návrh desky plošných spojů výkonové části a její realizace

4.4.2.3 Konstrukční uspořádání vstupně výstupního rozhraní

Vstupně výstupní rozhraní je navrženo do praktického plastového obalu, který poskytuje dostatečnou mechanickou ochranu elektrickým obvodům. Vstupně výstupní rozhraní se skládá ze dvou plošných spojů umístěných nad sebou, které jsou mezi sebou elektricky propojeny oboustranným kolíkem. Ten se připojuje do vyvedených konektorů na obou deskách plošných spojů a zajišťuje rozebíratelné spojení. Přesné umístění a tvar desky plošných spojů je podřízen tvaru plastového krytu (obrázek č. 30). Na vyvedení kontaktů byla použita násuvná svorkovnice, která zjednodušuje montáž a demontáž rozhraní. Pro zjednodušení obsluhy byl plastový kryt doplněn o štítek, který popisuje prvky rozhraní.

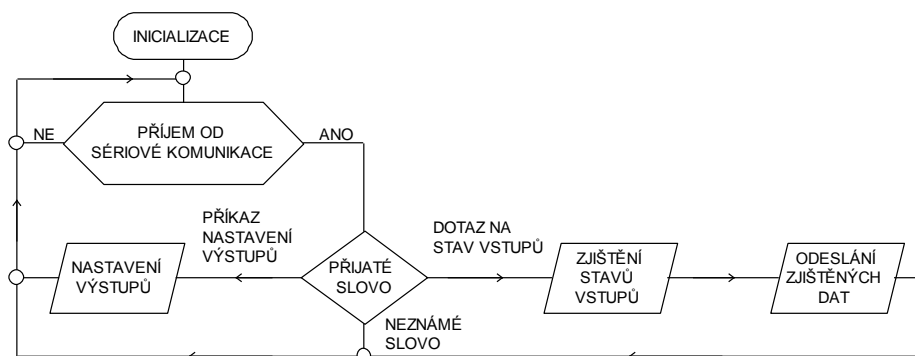
Vstupně výstupní rozhraní je procesorové zařízení, na němž lze upravovat funkčnost řízení pomocí změny firmwaru (programu). Bližší technický popis je obsažen v technické zprávě funkčního vzorku [11].



Obr. 30 Realizace vstupně výstupního rozhraní

4.4.2.4 Firmware

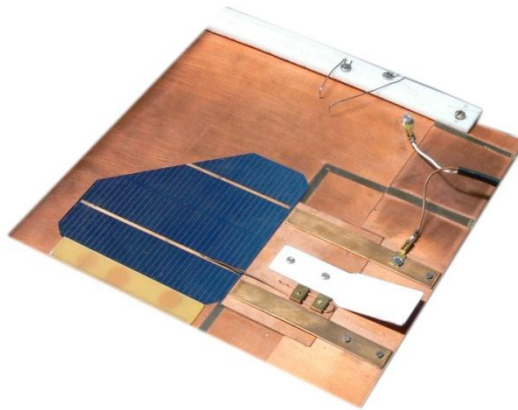
Firmware je program, který slouží k řízení vstupně výstupního rozhraní. Je nahrán v mikrokontroléru (součást vstupně výstupního rozhraní) a je napsán v jazyce assembler. Jeho funkci lze pochopit z vývojového diagramu obr. č. 31. V klidovém stavu testuje program sériovou komunikaci. Pokud nedojde k přijetí dat po sériové komunikaci tak zůstává v klidu. Pokud dojde k přijetí dat, tak následuje jejich vyhodnocení. Mohou nastat tři případy vyhodnocení, první možnost je, že přijaté slovo je vyhodnocené jako neznámé slovo a program přejde zpět do klidového stavu. Druhá možnost je, že přijaté slovo odpovídá příkazu pro nastavení výstupů. V tomto případě jsou nastaveny výstupy rozhraní podle tvaru přijatých dat a následně přechází program do klidového stavu. Třetí možností je, že přijaté slovo odpovídá dotazu na zjištění stavů vstupů. V tomto případě jsou zjištěny stavy vstupů a ty jsou odeslány po sériové komunikaci do počítače. Po odeslání přechází program do klidového stavu.



Obr. 31 Blokový diagram firmwaru vstupně výstupního rozhraní

4.4.3 Plotr

Na pracovišti LBIV, LBIC je použit plotr (PHILIPS PM8154) z původního pracoviště. Jedná se o vektorové zapisovací zařízení, které pomocí tužky (pera) uchycené v hlavě plotru zapisuje na papír umístěný na zapisovací ploše. Konstrukce je upravena tak, aby bylo možné do zapisovací plochy upevnit a nakontaktovat fotovoltaický článek. Upevňovací a kontaktní systém je zobrazen viz obr. č. 32. Původní pera jsou nahrazena lasery v hliníkových pouzdrech, která mají stejný tvar jako původní pera (odpadá úprava hlavy plotru). Ovládání plotru je přes sériové rozhraní pomocí řídicích příkazů ve standardu HPGL. Více technických parametrů je obsaženo v technické zprávě funkčního vzorku [11].



Obr. 32 Detail zapisovací plochy plotru

4.4.4 Multimetr

Na pracovišti LBIV, LBIC je použit digitální multimetr Agilent 34410A. Jedná se o rozšířený měřicí přístroj s datovou sériovou komunikací. Pro měření obou metod se používá měření stejnosměrného napětí. V případě metody LBIC je měřený proud převeden na úbytek napětí pomocí bočníku.

4.4.5 Osobní počítač

Osobní počítač je řídicím prvkem celého pracoviště. Nároky na počítač nejsou vysoké, postačuje běžný počítač se třemi sériovými porty (USB), Windows XP a vyšší, výhodou je program LabView.

4.4.6 Zdroje záření

Pro zkoumání fotovoltaických článků metodou lokálního ozařování je potřeba zdroj záření s úzkým světelným paprskem s dostatečnou intenzitou záření a velmi úzkou spektrální charakteristikou (ideálně s jednou vlnovou délkou). Na pracovišti LBIV, LBIC jsou použity převážně polovodičové lasery, které tyto potřeby splňují.

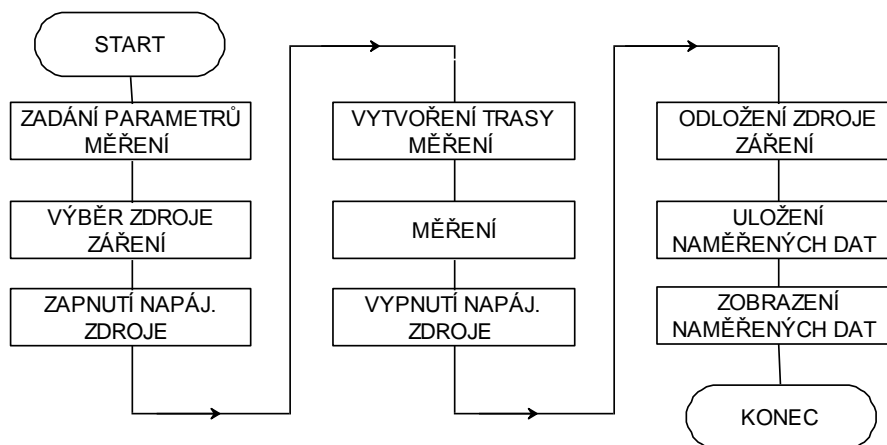
Lasery jsou monochromatické zdroje záření s velmi úzkou vyzařovací charakteristikou. Úzká vyzařovací charakteristika laserů je dána jeho strukturou viz kapitola 3.2. Použité laserové zdroje záření mají vlnovou délku od 400nm po 950nm.

DOSTUPNÉ LASERY NA PRACOVIŠTI LBIV, LBIC				
OZNAČENÍ	λ (nm)	P_0 (mW)	I_F (mA)	TYP
DL-3146-151	405	5	35	Laser
FP-53/10AF-AV	532	10	-	Laserový modul
FP-67/10TF	675	10	-	Laserový modul
LT025MD	780	40	110	Laser
FP-82/10AF-AV	820	10	-	Laserový modul
OD-880F	880	17	100	Laser
FP-90/5AF-AV	905	5	-	Laserový modul

Tab. 2 Seznam laserů na pracovišti LBIV, LBIC

4.5 Program

Řízení celého pracoviště zajišťuje osobní počítač s řídicím programem. Program pro obsluhu pracoviště LBIV, LBIC je napsán v programu LabView a zajišťuje několik funkcí. Zajišťuje měření, obsluhuje periférií (plotr, multimetr, rozhraní) a vyhodnocuje naměřené data. Program pro měření fotovoltaických článků vyhodnocuje naměřená data pomocí 2D nebo 3D grafu. Vzhled uživatelského rozhraní je zobrazen viz obr. č. 34. Podrobný technický popis je uveden v kapitole 4.5.1.

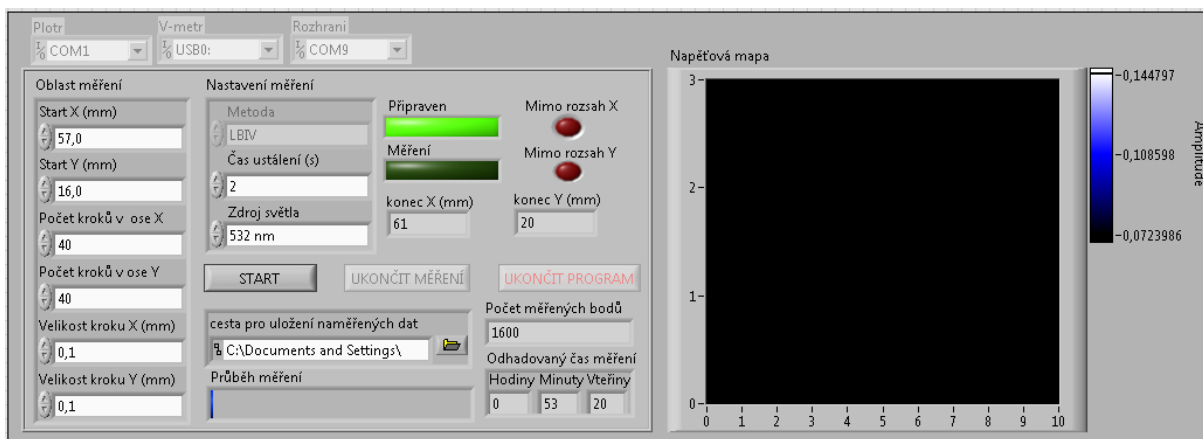


Obr. 33 Zjednodušení blokový diagram řídicího programu

Podle zjednodušeného blokového diagramu řídicího programu si lze představit funkci programu. Nejdůležitějším z bloků je blok měření (tzv. jádro), který obstarává samotné měření. Pokud budeme vycházet z blokového diagramu obr. č. 34, tak před samotným měřením musí dojít k vytvoření trasy, po které se bude laser posouvat. Vytvořená trasa je převedena do jednorozměrného pole (vektoru) obsahující souřadnice X a Y. Samotné měření pak spočívá v čtení jednotlivých souřadnic z pole (trasy měření), které jsou upraveny do HPGL standartu a následně jsou odeslány do plotru. Po odeslání souřadnic je dojde k posunu plotru na danou pozici a následně je poslán příkaz multimetru, ten odečte měřenou hodnotu. Měřená hodnota je uložena a přiřazena k souřadnicím. To se opakuje do té doby, dokud nedojde k proměření všech bodů z trasy měření. Výsledkem měření je dvourozměrné pole obsahující souřadnice měřených bodů a velikost měřené hodnoty, která je uložena a zobrazena v grafické podobě.

4.5.1 Uživatelské rozhraní

Součástí řídicího programu je uživatelské rozhraní (obr. č. 34), které umožňuje zadat parametry měření a zobrazit naměřené výsledky.



Obr. 34 Uživatelské rozhraní

Pro nastavení parametrů měření slouží několik ovládacích prvků popsanych v tabulce č.3. Zadané hodnoty jsou programově kontrolovány a jsou ošetřeny proti nesprávnému zadání (překročení limitů). Například pokud dojde k zadání měřené oblasti mimo zapisovací plochu plotru nebo pokud jsou zadané hodnoty neproveditelné (krok měření = 0, počet kroků =0,...), tak při překročení dojde k rozsvícení varovné kontrolky.

VZHLED BLOKU	POPIS FUNKCE BLOKU
Start X (mm)	Oblast měření:
10	Start X (mm) - počáteční hodnota na ose X, od které bude probíhat měření, zadávání je v milimetrech
Start Y (mm)	Start Y (mm) - počáteční hodnota na ose Y, od které bude probíhat měření, zadávání je v milimetrech
10	Počet kroků v ose X - spolu s velikostí kroku udává délku hrany., tato délka vytyčuje měřenou oblast v ose X
Počet kroků v ose X	Počet kroků v ose Y - spolu s velikostí kroku udává délku hrany, tato délka vytyčuje měřenou oblast v ose Y
10	Poznámky: V oblasti měření nastavujeme jak velikost měřené plochy tak rozlišení měření. Důležité je správné nastavení počátečního bodu, ten určujeme od počátku souřadnic, a je zadáván v milimetrech (souřadnice levého spodního rohu měřené oblasti)
Počet kroků v ose Y	
10	
Velikost kroku X (mm)	
1	
Velikost kroku Y (mm)	
1	

Tab. 3 Popis bloků uživatelského rozhraní

Další možnosti nastavení uživatelského rozhraní je výběr zdroje záření, metody měření, cesty pro uložení naměřených dat a čas ustálení.

Uživatelské rozhraní disponuje několika signalizačními prvky, které zobrazují informace o nastaveném měření, především odhadovaný čas měření, počet měřených bodů, správnost nastavení měřené oblasti a krajní bod.

Dalším důležitým prvkem je 2D graf, který zobrazuje napěťové mapy měřených fotovoltaických článků.

4.5.2 Parametry realizovaného pracoviště

Dosažené parametry navrženého pracoviště LBIV, LBIC jsou shrnuty v tabulce č. 4.

TYPICKÉ PARAMETRY DOSAŽENÉ METODAMI LOKÁLNÍHO OZAŘOVÁNÍ					
OPTICKÉ		MECHANICKÉ		ELEKTRICKÉ / PROGRAMOVÉ	
NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH	NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH	NÁZEV PARAMETRU	ROZSAH
spektrum záření	405-905 nm	velikost PV článku	200x200 mm	rychlost dat. komun.	2400b/s
intenzita záření	5-40 mW	krok v ose X ; Y	0,1 ; 0,1 mm	grafický výstup	2D,3D
šířka svět. paprsku	≈ 0,5 mm	průměrná rychlost	0,1-1 mm/s	formát dat. výstup	txt, xls

Tab. 4 Technické parametry navrženého zařízení LBIV, LBIC

5 Měření na pracovišti LBIV, LBIC

Metoda LBIV, LBIC a její pracoviště jsou podrobně popsány výše. Proto se v této části zaměříme na ukázkou a analýzu získaných výsledků.

Výsledkem měření jsou tzv. „mapy napětí naprázdno, proudu nakrátko“ buď ve formě matice hodnot, které je nutné převést do grafického formátu, nebo rovnou v grafické formě (obrázku).


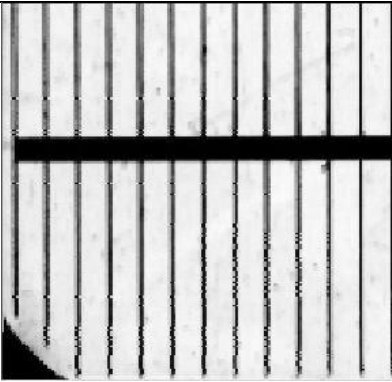
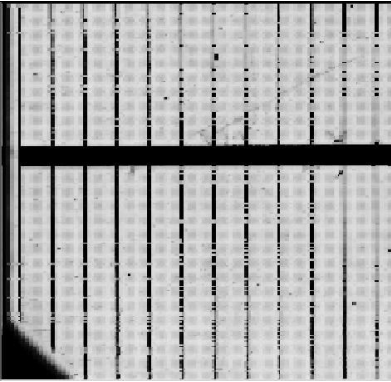
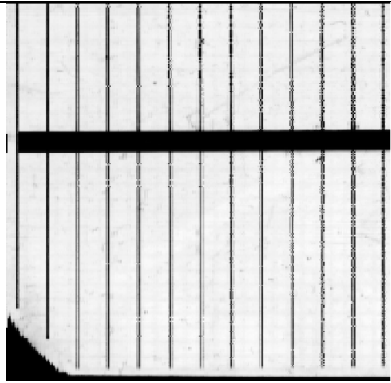
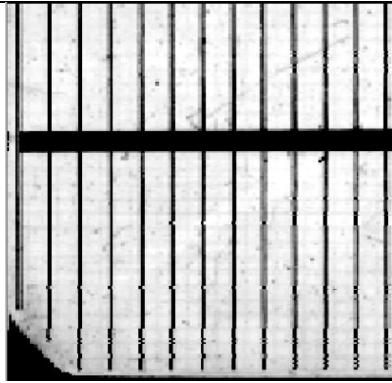
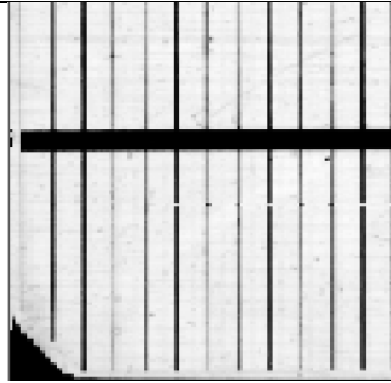
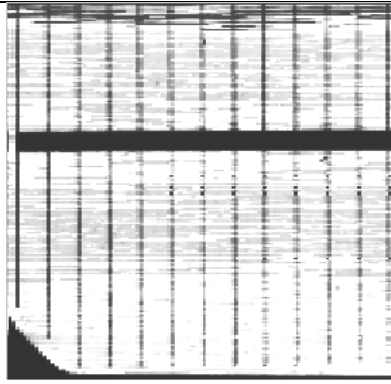

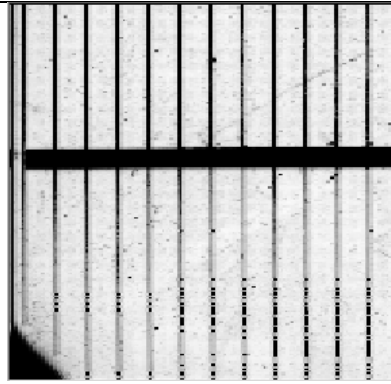
5.1 Měřicí režimy pracoviště

Dříve než se dostaneme k hodnocení naměřených dat (kvalitu fotovoltaických článků) uvedeme možnosti měření a jejich vliv na získané výsledky.

Základním parametrem, který lze volit je zdroj záření (vlnová délka). Tento parametr nám podle výše popsané teorie udává tzv. absorpční hloubku (hloubku měření). Na první trojici výsledků z obr. č. 35 jsou zobrazeny napěťové mapy pro tři různé vlnové délky pro stejný vzorek fotovoltaického článku. Vlnová délka 532nm nám udává informace o povrchu fotovoltaického článku, proto jsou zřetelněji patrné povrchové poruchy. Vlnová délka 670nm nám udává informace o oblasti blízké PN přechodu (odhalují rekombinační centra, nehomogenity nebo lokální zkratky). Vlnová délka 820nm proniká nejhluběji strukturou fotovoltaického článku do oblasti blízké zadního kontaktu (odhaluje homogenitu oblasti typu N nebo provedení zadního kontaktu).

Na druhé trojici výsledků z obr. č. 35 jsou zobrazeny fotovoltaické mapy pro různé kroky měření. Při měření s nejmenším krokem (0,1x0,1mm) dostáváme nejpřesnější výsledky. Nevýhodou však je doba trvání, která oproti měření s krokem 0,2x0,2 mm je dvakrát delší. Při zvyšování kroku měření snižujeme rozlišení a může dojít ke ztrátám informací (lokálních zkratů).

Poslední trojice z obr. č. 35 zobrazuje napěťové mapy pro různé vlnové délky podobně jako na první trojici s tím rozdílem že je použita metoda LBIC.

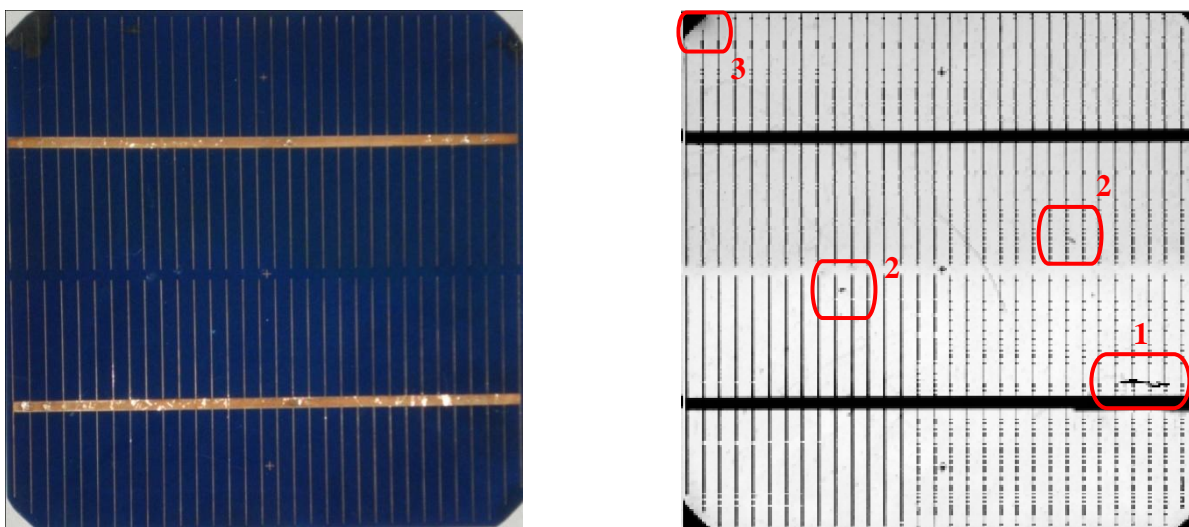
		
zdroj záření 532nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet bodů 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV	zdroj záření 670nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet měření 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV	zdroj záření 820nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet měření 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV
		
zdroj záření 532nm velikost kroku 0,1x0,1mm počet bodů 400x400 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV	zdroj záření 523nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet měření 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV	zdroj záření 532nm velikost kroku 0,3x0,3mm počet bodů 133x133 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIV
		
zdroj záření 532nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet bodů 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIC	zdroj záření 670nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet měření 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIC	zdroj záření 820nm velikost kroku 0,2x0,2mm počet měření 200x200 bodů teplota $\approx 40^{\circ}\text{C}$ metoda LBIC

Obr. 35 Přehled různých nastavení měření a jejich výsledků na vzorku č. 1

5.2 Výsledky měření

Na obrázku č. 36 je zobrazen jeden ze vzorků fotovoltaického článku, který byl změřen na pracovišti LBIV, LBIC. Jedná se o starší vzorek čtyřpalcového monokrystalického křemíkového článku.

Na pravé straně téhož obrázku je zobrazen výsledek měření (proudová mapa). Odstín barvy odpovídá generovanému proudu. Tmavý odstín odpovídá nižším intenzitám proudu naopak světlejší odstín větším intenzitám.



Obr. 36 Fotografie vzorku č. 1 (vlevo), výsledky měření (vpravo) pro zdroj záření 670nm, velikost kroku 0,4x0,4mm, počet měření 250x250 bodů, metoda LBIC

V pravé dolní části je patrná podélná prasklina (1), jedná se o procesní defekt způsobený patrně mechanickým namáháním. Rozsah tohoto defektu minimálně ovlivňuje celkovou účinnost fotovoltaického článku, pokud však dojde k jejímu rozšíření (tepelným nebo mechanickým namáháním), může výrazněji snížit celkovou účinnost.

Uprostřed článku se nacházejí dva bodové defekty (2), nejspíše se jedná o bodový zkrat způsobený mechanickým poškozením (poškrábáním) povrchu článku. Malé množství těchto defektů neovlivňuje celkovou účinnost. Pokud jsou tyto bodové defekty způsobené ve výrobě, tak se jedná o tzv. intersticiální částice (částice mimo pravidelný bod mřížky).

V levém horním rohu je patrný plošný defekt (3). Poškození se projevuje nižší intenzitou proudu na hraně článku. Tento defekt je způsobený narušením povrchu antireflexivní vrstvy.

6 Závěr

Úvod diplomové práce byl věnován teorii související s touto prací na téma „Metody LBIV a LBIC“. Zaměřili jsme se na teorii týkající se metody lokálního ozařování, detailněji pak na princip fotovoltaických článků a zdrojů záření.

V praktické části bylo navrženo měřicí pracoviště skládající se z několika částí. Napájecí zdroj laserů a rozhraní byly postaveny konkrétně pro potřeby pracoviště, aby usnadnily práci obsluze pracoviště. Navržené pracoviště LBIV, LBIC bylo použito při vzorovém měření, ze kterého byla získána data, která byla v této práci rozebrána a popsána.

Veškeré zadané úkoly této práce se podařilo splnit. Pracoviště je navrženo pro výuku a výzkum v oblasti fotovoltaiky, a předpokládá se jeho použití v budoucnosti.

Parametry navrženého pracoviště se v porovnání s profesionálními měřicími zařízeními liší pouze v rychlosti měření a v rozsahu vlnových délek zdroje záření..

Navržené pracoviště sloužilo k ověření výzkumného projektu „Pasivace fotovoltaických článků vodní párou“ (SGS grant SGS13/072/OHK3/1T/13). Zjištěné výsledky sloužily jako kontrola výsledků pasivace.

7 Zdroje

- [1] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika: přednášky*. 1. vyd. Brno: VUT FEKT. ISBN 80-214-2264-5.
- [2] BURIAN, Zdeněk. *Optoelektronika: přednášky*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 149 s. ISBN 80-010-0717-0.
- [3] KLÍMEK, Adolf a Josef ZÍKA. *Malá encyklopedie elektrotechniky: polovodičové součástky*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977, 444 s.
- [4] ŠKVOR, Ondřej. *Přípravek pro měření parametrů solárních článků*. Praha, 2012, Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Jirásek Lubor.
- [5] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. PVCDROM: A collection of resources for the photovoltaic educator. [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon>
- [6] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. PVCDROM: A collection of resources for the photovoltaic educator. [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/design/optical-losses>
- [7] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektu solárních článků [i.e. článků]: Diagnostic method used to a location of solar cells defects : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [V Brně: Vysoké učení technické], c2009. 32 s. ISBN 978-80-214-3824-8.
- [8] VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaických článků založené na generačně-rekombinačních jevech: Diagnostic methods of photovoltaic cells based on generation-recombination effects : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2008. 32 s. ISBN 978-80-214-3666-4.
- [9] ASRESAHEGN, Assefa Lemma. *Diagnostics of large-area silicon solar cells n+ -layer homogeneity by using LBIV method: Ph.D. dissertation*. Praha, 2004. 153 s.
- [10] *PC's Solar Photovoltaics Blog: Yingli gains crown as top producer in 36 GW global PV market* [online]. 2013 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: <http://pcsolarpv.blogspot.cz/2013/05/yingli-gains-crown-as-top-producer-in.html>
- [11] ŠKVOR, Ondřej. *Zařízení pro měření homogenity fotovoltaických článků metodou LBIV*. Praha, 2014. Technická zpráva - funkční vzorek. ČVUT. Vedoucí práce Vítězslav Benda
- [12] SEMILAB. SEMILAB SEMICONDUCTOR PHYSICS LABORATORY. [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.semilab.hu/applications/pvi/line-mapping>
- [13] SUNLAB: Supporting the PV industr. SUNLAB B.V. [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.sunlab.nl>
- [14] BENDA, V. *Diagnostics of Homogeneity of Recombination Rate in Individual Layers of Large-area Silicon Solar Cells using LBIV Method*, in preprint of *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona (Spain), 2005, p. 670 – 673.

- [15] BENDA, V. *Fotovoltaické fórum: sborník abstraktů a přednášek z fotovoltaické konference konané v Plzni*. Plzeň: Czech Nature Energy, 2009-. 1x ročně.
- [16] ŠKVOR, Ondřej. *Diagnostics of Solar Cells Homogeneity by LBIV Method using Improved Hardware Arrangement*. In POSTER 2013 - 17th International Student Conference on Electrical Engineering. Prague: Czech Technical University, 2013. ISBN 978-80-01-05242-6.
- [17] STMICROELECTRONICS. *Adjustable voltage and current regulator*. [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/wp-content/uploads/2009/03/1200.pdf>
- [18] BENDA, Vítězslav. *Výkonové polovodičové součástky a integrované struktury*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993/1994, 369 s. ISBN 80-010-1140-2.

8 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1	Energie fotonu E_{PH} a energie šířky zakázaného pásma E_G	7
Obr. 2	Princip vzniku elektrického pole a nosičů náboje v polovodiči.	8
Obr. 3	Fyzické uspořádání fotovoltaického článku	8
Obr. 4	Spektrum slunečního záření pro AM 1,5 (převzato z [15])	10
Obr. 5	Absorpční koeficient a absorpční délka křemíku v závislosti na vlnové délce elektromagnetického záření při teplotě 300°C (převzato z [5])	11
Obr. 6	VA charakteristika fotovoltaického článku (PN diody)	12
Obr. 7	Dvoudiodové náhradní schéma fotovoltaického článku	12
Obr. 8	Příčný řez fotovoltaickým článkem	14
Obr. 9	Virový defekt (převzato z [7])	17
Obr. 10	Pnutí v materiálu (převzato z [8])	17
Obr. 11	Chyby metalizací (převzato z [7])	17
Obr. 12	Prachové částice (převzato z [7])	17
Obr. 13	Praskliny (převzato z [7])	17
Obr. 14	Detail neobroušené hrany (převzato z [7])	17
Obr. 15	Přechody mezi energetickými hladinami	18
Obr. 16	Schematické uspořádání laseru	19
Obr. 17	Spektrální charakteristiky laseru	19
Obr. 18	Principiální uspořádání metody LBIV, LBIC	21
Obr. 19	Zařízení pro diagnostiku PV článků firmy SunLab a Semilab (převzato z [12], [13])	22
Obr. 20	Původní pracoviště LBIV	25
Obr. 21	Schéma navrženého pracoviště LBIV, LBIC	27
Obr. 22	Blokové schéma napájecího zdroje	28
Obr. 23	Principiální zapojení regulovatelných zdrojů	29
Obr. 24	Blokové zapojení ochranného obvodu	30
Obr. 25	Návrh desky plošných spojů ochranného obvodu a její realizace	31
Obr. 26	Konstrukční uspořádání a návrh čelního panelu napájecího zdroje	31
Obr. 27	Blokové schéma vstupně výstupního rozhraní	32
Obr. 28	Návrh desky plošných spojů signálové části a její realizace	33
Obr. 29	Návrh desky plošných spojů výkonové části a její realizace	35
Obr. 30	Realizace vstupně výstupního rozhraní	36
Obr. 31	Blokový diagram firmwaru vstupně výstupního rozhraní	36
Obr. 32	Detail zapisovací plochy plotru	37
Obr. 33	Zjednodušení blokový diagram řídicího programu	39

Obr. 34	Uživatelské rozhraní.....	40
Obr. 35	Přehled různých nastavení měření a jejich výsledků na vzorku č. 1	43
Obr. 36	Fotografie vzorku č. 1 (vlevo), výsledky měření (vpravo) pro zdroj záření 670nm, velikost kroku 0,4x0,4mm, počet měření 250x250 bodů, metoda LBIC	44
Tab. 1	Technické parametry profesionálních zařízení LBIV, LBIC	23
Tab. 2	Seznam laserů na pracovišti LBIV, LBIC.....	38
Tab. 3	Popis bloků uživatelského rozhraní	40
Tab. 4	Technické parametry navrženého zařízení LBIV, LBIC	41

9 Přílohy

- Vzorový protokol pro měření na pracovišti LBIV, LBIC

Viz CD:

- Fotografie realizovaného pracoviště
- Naměřené výsledky navrženým pracovištěm
- Příspěvek Poster 2013
- Technická dokumentace navržených komponentů
- Ukázka formátu naměřených dat
- Zdrojový kód řídicího programu